

ESTUDIO COMPARATIVO  
**EL CULTIVO  
DE SOJA  
GENÉTICAMENTE  
MODIFICADA Y  
EL CONVENCIONAL**

**En Argentina,  
Brasil, Paraguay  
y Uruguay**



# Estudio comparativo entre el cultivo de soja genéticamente modificada y el convencional

*El paquete tecnológico basado en semilla de soja GM, siembra directa y fertilización ha facilitado el manejo del cultivo, ha reducido el impacto ambiental negativo de la actividad productiva y ha generado un beneficio económico para el agricultor y los países.*



**Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina  
Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura**

**Estudio comparativo entre el cultivo  
de soja genéticamente modificada y  
el convencional en Argentina, Brasil,  
Paraguay y Uruguay**

**Coordinadores técnicos:**

Pedro Jesús Rocha  
Víctor Manuel Villalobos

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura  
(IICA), 2012



Estudio comparativo entre el cultivo de soja genéticamente modificada y el convencional en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay por IICA se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.  
Basada en una obra en [www.iica.int](http://www.iica.int).

El Instituto promueve el uso justo de este documento. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda:

MAGP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, AR; IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, CR). 2012. Estudio comparativo entre el cultivo de soja genéticamente modificada y el convencional en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Coords. téc. P Rocha, VM Villalobos. San José, CR, IICA.

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio Web institucional en <http://www.iica.int>.

Coordinación editorial: Pedro Rocha y Víctor M. Villalobos  
Corrección de estilo: Máximo Araya  
Diseño de portada: Carlos Umaña  
Diagramación: Karla Cruz  
Impresión: Imprenta IICA, Sede Central

Estudio comparativo entre el cultivo de soja genéticamente modificada y el convencional en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay / MAGP, IICA – San José, C.R.: IICA, 2012.  
xiv, 90 p. ; 15.5 x 23 cm

ISBN: 978-92-9248-415-6

1. Soja 2. Glycine max 3. Manejo de cultivo 4. Biotecnología vegetal 5. Organismos genéticamente modificados  
6. Transgénicos 7. Bioseguridad 8. Argentina 9. Brasil  
10. Paraguay 11. Uruguay I. MAGP II. IICA III. Título

AGRIS  
F30

DEWEY  
633.34

San José, Costa Rica  
2012

# Índice

<b>Lista de cuadros y figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Reconocimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>xi</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Evolución del cultivo de la soja en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 3. Paquete tecnológico del cultivo de la soja</b>	<b>15</b>
3.1. <i>Siembra directa</i>	15
3.2. <i>Herbicidas</i>	19
3.3. <i>Semilla de soja genéticamente modificada (GM-RG)</i>	21
3.3.1. <i>Genes marcadores de selección basados en antibióticos</i>	24
3.3.2. <i>Soja transgénica tolerante a la sequía</i>	26
<b>Capítulo 4. Importancia de la regulación para la siembra de soja GM</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo 5. Análisis ambiental comparativo</b>	<b>37</b>
5.1. <i>Soja, cambio del uso del suelo y siembra directa</i>	38
5.2. <i>Monocultivo de la soja y su impacto sobre la biodiversidad</i>	42
5.3. <i>Ventajas ambientales de la soja GM</i>	44
5.4. <i>Tolerancia a la sequía en soja</i>	45

<b>Capítulo 6. Análisis de costos: comparación de la evolución de la producción y los costos del cultivo de soja transgénica y convencional</b>	<b>47</b>
6.1. <i>Argentina</i>	49
6.2. <i>Brasil</i>	50
6.3. <i>Paraguay</i>	51
6.4. <i>Uruguay</i>	52
6.5. <i>Análisis de los costos de producción entre países</i>	54
6.5.1. <i>Costos asociados a las labores en el cultivo de la soja</i>	54
6.5.2. <i>Costos de comercialización</i>	57
6.5.3. <i>Comparación de los costos de la soja convencional y de la soja GM</i>	59
<b>Capítulo 7. Análisis de escenarios posibles</b>	<b>65</b>
7.1. <i>Efecto de la ausencia del cultivo de soja GM en los cuatro países</i>	65
7.2. <i>Efecto de la presencia de únicamente soja GM en los cuatro países</i>	66
7.3. <i>Efecto de la coexistencia del cultivo de soja GM y de soja convencional</i>	67
<b>Capítulo 8. Consideraciones finales</b>	<b>69</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>Referencias</b>	<b>75</b>

# Lista de cuadros y figuras

<b>Cuadro 1.1.</b> Área y volúmenes de producción de soja (convencional y transgénica) en la campaña 2009-2010 en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. . . . .	2
<b>Cuadro 2.1.</b> Comparación de los costos del cultivo de soja GM-RG y de soja convencional en 1999. . . . .	10
<b>Cuadro 4.1.</b> Aspectos normativos vinculados al cultivo de la soja GM en los cuatro países analizados en este estudio. . . . .	33
<b>Cuadro 5.1.</b> Comparación entre países de la relación de áreas sembradas con soja/maíz, soja/trigo y soja/trigo+maíz. . . . .	40
<b>Cuadro 5.2.</b> Comparación entre el cultivo de soja convencional y el de soja GM en términos de su impacto ambiental. . . . .	44
<b>Cuadro 6.1.</b> Potencialidad productiva y características agroecológicas de los países. . . . .	54
<b>Figura 2.1.</b> Evolución del área sembrada, la producción y el rendimiento promedios del cultivo de la soja en Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay entre 1970 y 2010. . . . .	6
<b>Figura 2.2.</b> Distribución de los grupos de madurez de soja para el Cono Sur. . . . .	9
<b>Figura 2.3.</b> Evolución del registro de cultivares de soja convencionales y de soja GM para el período 1994-2006 en Argentina. . . . .	11
<b>Figura 2.4.</b> Sistema de silo en bolsa: (A) confección del silo, (B) silo bolsa terminado y (C) extracción del grano del silo. . . . .	13

**Figura 6.1.** Evolución de la superficie del cultivo de soja en relación con el resto de cultivos agrícolas extensivos en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, desde la campaña de 1980-1981 hasta la de 2009-2010... 48

**Figura 6.2.** Producción de soja en Argentina en la campaña 2010-2011... 49

**Figura 6.3.** Producción de soja en Brasil en la campaña 2010-2011. .... 51

**Figura 6.4.** Producción de soja en Paraguay en la campaña 2010-2011... 52

**Figura 6.5.** Producción de soja en Uruguay para la campaña 2010-2011... 53

**Figura 6.6.** Costos de producción de soja convencional y soja transgénica en las distintas zonas productoras de los cuatro países... 55

**Figura 6.7.** Costos de comercialización entre países. .... 58

**Figura 6.8.** Distribución de los costos de soja GM y soja convencional en los distintos países, expresada en porcentaje. .... 60

**Figura 6.9.** Costos totales de soja convencional y soja transgénica en los distintos países. .... 61

**Figura 6.10.** Evolución del precio del glifosato en Argentina (USD constantes a diciembre de 2011/litro de compuesto). .... 63

# Reconocimientos

Este estudio fue realizado gracias al apoyo del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina. El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) desea expresar su reconocimiento a la decidida participación del Dr. Lorenzo Basso y del Lic. Jorge Neme, cuyos aportes fueron fundamentales para la cristalización de esta iniciativa. También se extiende un reconocimiento a las autoridades y los funcionarios del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay y de la *Companhia Nacional de Abastecimento* (CONAB) de Brasil. La recopilación de la información y las visitas de campo fueron realizadas por el Ing. Adrián Rovea y el Economista Juan del Río durante el primer semestre de 2012, a quienes se agradece su trabajo. La coordinación técnica y la redacción final del documento fueron responsabilidad del Dr. Víctor Manuel Villalobos y del Dr. Pedro Rocha, ambos funcionarios del IICA.



# Resumen ejecutivo

Durante los últimos años, el incremento sostenido de la producción de soja (*Glycine max* L. Merr.) en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay se ha debido a varios factores, entre los cuales cabe destacar: (i) la incorporación de nuevas áreas a este cultivo, (ii) la disponibilidad de semilla de soja genéticamente modificada (o también conocida como transgénica) con resistencia a herbicidas (GM-RH), (iii) la existencia de marcos regulatorios de bioseguridad y (iv) el decidido interés de los agricultores por adoptar tecnologías innovadoras al sistema de producción agrícola de las diferentes zonas productoras de soja en los cuatro países.

La complementación de tecnologías, como la siembra directa, la nutrición (química y biológica), el uso de biocidas (herbicidas, fungicidas e insecticidas) y la utilización de variedades de soja genéticamente modificada (GM), o transgénicas, conforman el paquete tecnológico que ha convertido a la soja en el mayor cultivo de exportación para estos cuatro países, contribuyendo así con casi 50% de la producción mundial de esta leguminosa. Existe evidencia - presentada con detalle en este documento - que permite afirmar que el paquete tecnológico anteriormente mencionado ha reducido el impacto ambiental, como consecuencia de menos labores del suelo y de la disminución del uso de herbicidas.

El sistema de siembra directa minimiza la erosión de los suelos, permitiendo una mayor eficiencia en el uso y retención del agua y, junto con la rotación de los cultivos, incrementa la materia orgánica del suelo. La nutrición vegetal, basada en fertilización química, ha permitido ajustar los suelos de zonas naturalmente deficitarias y recuperar áreas degradadas. La utilización de bacterias fijadoras de nitrógeno ha contribuido a disminuir la fertilización química con nitrógeno, que es responsable de la generación de óxido nitroso, principal gas que contribuye al efecto invernadero (GEI). La semilla de soja GM ha simplificado las labores en el cultivo, particularmente en las actividades asociadas con el control de malezas, mediante la utilización del herbicida glifosato. Todo esto ha aumentado la eficiencia productiva del cultivo, lo que ha redundado en beneficio agronómico, ambiental y económico para los agricultores de los cuatro países.

En este estudio, se presentan aspectos relevantes de la evolución del cultivo de la soja en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Se incluye una breve historia de la siembra de soja en los cuatro países, una descripción de los componentes del paquete tecnológico; un resumen de la legislación actual sobre bioseguridad; los impactos productivos, ambientales y económicos de la tecnología de producción de soja, así como un análisis de posibles escenarios productivos.

Las conclusiones del estudio se resumen de la manera siguiente: (i) El cultivo de soja GM en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay ha evolucionado positivamente desde que se sembró por primera vez en la región, lo cual se ve reflejado actualmente al pasar de 1.37 millones de hectáreas en 1976 a 45 millones en 2011, con una ganancia económica, estimada para los agricultores de la región, de más de USD5000 millones en ese año (Del Río 2012); (ii) El paquete tecnológico aplicado a la soja es más eficiente que la aplicación independiente de cualquiera de sus componentes; (iii) La introducción de semilla de soja GM revolucionó al cultivo en los cuatro países, por la facilidad de su manejo agronómico, el control de las malezas y la disminución de los costos de producción; (iv) El paquete tecnológico genera beneficios ambientales y económicos que superan al mismo paquete aplicado al cultivo de soja convencional.

Finalmente y basado en las estadísticas oficiales (Del Río 2012) y en estudios de campo (Rovea 2012), el presente estudio pretende aportar información actualizada sobre el sistema productivo de esta oleaginosa en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, que en conjunto aportan aproximadamente el 50% de la soja producida en el mundo. Si bien el desempeño del cultivo de soja GM en los cuatro países ha mostrado ser muy eficiente, el desafío será mantener este comportamiento, mediante la optimización de las prácticas agrícolas y de las tecnologías disponibles, para poder satisfacer la progresiva demanda de esta oleaginosa en un escenario de aumento poblacional, conservación ambiental y cambio climático, garantizando la seguridad alimentaria.



## Introducción

Durante los últimos 15 años, los países de América del Sur han sido protagonistas mundiales en la producción agropecuaria, particularmente en la oferta de granos para los mercados internacionales. Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay han incrementado su producción de soja en 234% y de maíz en 166% en los últimos diez años (FAO 2012); y ninguna otra región en el mundo ha hecho aportes tan significativos al incremento de la productividad mundial como estos cuatro países en su conjunto.

Los factores que han incidido para el logro de ese gran desarrollo de la agricultura son diversos, incluidos los avances tecnológicos, la visión agroempresarial de los productores, la creciente demanda y los precios atractivos de los granos en los países emergentes y el respaldo gubernamental, por medio de políticas públicas que han alentado la inversión y han generado estabilidad en el sector.

El reconocido éxito en la agricultura sudamericana es mucho más evidente en el cultivo de la soja. De hecho, Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay aportan actualmente alrededor del 50% de la producción mundial y constituyen el segundo, tercero, cuarto y séptimo exportadores mundiales de esta

oleaginosa, respectivamente (FAO 2012). Además, de los casi 45 millones de hectáreas sembradas en la campaña 2009-2010, el 87.5% se cultivó con soja transgénica (James 2010, cuadro 1.1).

**Cuadro 1.1.** Área y volúmenes de producción de soja (convencional y transgénica) en la campaña 2009-2010 en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.

País	Soja convencional <sup>1</sup>		Soja GM-RH <sup>2</sup>		Cultivo de soja (convencional + GM-RH) <sup>3</sup>	
	Área (millones de ha)	Producción <sup>4</sup> (millones de t)	Área (millones de ha)	Producción <sup>4</sup> (millones de t)	Área total (millones de ha)	Producción total (millones de t)
Argentina	0	0	18.13	52.68	18.13	52.68
Brasil	5.49	16.12	17.8	52.4	23.29	68.52
Paraguay	0.14	0.37	2.54	7.09	2.67	7.46
Uruguay	0	0	0.86	1.82	0.86	1.82
Total	5.63	16.49	39.33	113.99	44.95	130.48

- 1 Valor estimado por diferencia entre el valor oficial reportado por FAOSTAT (FAO 2012) y por James (2010).
- 2 Valores reportados por James (2010).
- 3 Basado en FAOSTAT (datos oficiales reportados para 2010, FAO 2012).
- 4 La producción fue estimada para soja convencional y GM, tomando como factor el rendimiento promedio presentado en FAO (2012).

Lograr la actual participación de los cuatro países en el mercado mundial de la soja ha sido el resultado de la adopción de procesos graduales de innovación tecnológica (capítulo 2), desde la cosecha mecánica eficiente hasta el uso de semilla transgénica, y de la formulación y aplicación de normas específicas en cada país.

El manejo del cultivo de la soja en los cuatro países ha alcanzado un alto nivel de eficiencia debido, particularmente, a la adopción de un paquete tecnológico que combina el sistema de siembra directa, la nutrición vegetal (química y biológica), el control químico de malezas y enfermedades y el uso de la semilla transgénica. Ese paquete tecnológico (capítulo 3) ha permitido incrementar progresivamente los rendimientos,

generar ahorro en los costos de producción, obtener cosechas más limpias, mejorar gradualmente los suelos y usar el agua de forma más eficiente.

La utilización de semilla transgénica ha sido posible debido a que Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay cuentan con marcos regulatorios de bioseguridad (ONU 2012) que buscan garantizar que los organismos genéticamente modificados (OGM) que se liberen sean seguros para los ecosistemas, inocuos para el consumo humano y animal y convenientes desde el punto de vista comercial (CAS e IICA 2010, capítulo 4).

La disponibilidad del paquete tecnológico referido y la reglamentación en bioseguridad permiten hacer inferencias sobre el impacto real del cultivo de la soja genéticamente modificada con resistencia a herbicidas (GM-RH) sobre el ambiente (capítulo 5). Adicionalmente, se presenta un análisis del potencial y la necesidad de la introducción de la soja transgénica tolerante a la sequía (GM-RS), como una de las medidas de adaptación de la agricultura al cambio climático.

El incremento progresivo de las áreas de cultivo en los cuatro países, la regulación en bioseguridad y el efecto ambiental son elementos que se articulan y definen el impacto económico de la actividad en los países de la región. En el capítulo 6, se presenta un análisis comparativo de los costos de producción y en el capítulo 7 un ejercicio de evaluación de escenarios productivos potenciales para este cultivo.

Existe mucha información sobre el cultivo de la soja GM. Sin embargo, son pocos los estudios que incluyen la información obtenida directamente de los productores en la región. Desde el punto de vista metodológico, el presente estudio se ha basado en la revisión de literatura disponible y en el estudio de Rovea (2012), quien realizó entrevistas *in situ* a diferentes productores que tomaron la decisión de adoptar el paquete tecnológico aquí descrito, con lo cual han hecho posible la consolidación del cultivo.

Con respecto al cultivo de la soja, existen diferencias considerables entre los países y dentro de cada uno de ellos. Sin embargo, en el presente estudio se han documentado los aspectos comunes más relevantes y, cuando es necesario, se destaca la particularidad de cada país o localidad.

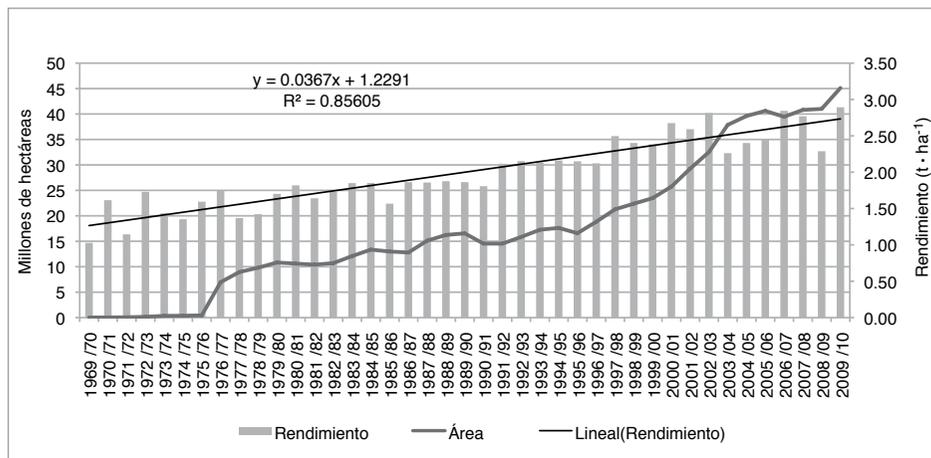
Este estudio respalda el esfuerzo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina y del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) dirigido a proveer información científicamente sustentada a los tomadores de decisiones, investigadores, medios de comunicación, agricultores y público en general, mediante un análisis que, sin tomar una posición ideológica sobre el tema de los transgénicos (Rocha 2011), basado en las estadísticas oficiales disponibles (Del Río 2012) y en estudios de campo (Rovea 2012), servirá de referencia para futuros análisis y decisiones (capítulo 7).

# Evolución del cultivo de la soja en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay

Antes de 1976, la soja era una especie poco cultivada en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Sin embargo, desde ese año hasta el 2010, el cultivo de la soja en estos cuatro países pasó de 1.37 millones de ha, con una producción de 1.58 millones de t, a casi 45 millones de ha, con una producción de más de 130 millones de toneladas (FAO 2012). Esto ha implicado un crecimiento anual promedio de 1.09 millones de hectáreas sembradas y de 3.22 millones  $t \cdot \text{año}^{-1}$  de producción (figura 2.1).

El sistema de producción de la soja en la década de 1970 se basaba exclusivamente en la utilización del arado del suelo para la siembra y el control de malezas. Adicionalmente, se realizaba rotación del cultivo con pasturas perennes, con ciclos de cuatro a cinco años y, de esta manera, se reducía el efecto de la labranza y la degradación del suelo (Rovea 2012). En 1970, el rendimiento promedio del cultivo de la soja para los cuatro países era de  $1.15 t \cdot \text{ha}^{-1}$ , valor que estaba 28% por debajo del rendimiento mundial para ese año ( $1.48 t \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Para 1980, el área sembrada en los cuatro países era de 11.3 millones de hectáreas (Brasil con 8.77 millones y Argentina con 2.03 millones), lo cual representó un incremento de ocho veces del área sembrada y un incremento de 45% en

**Figura 2.1.** Evolución del área sembrada, la producción y el rendimiento promedios del cultivo de la soja en Argentina, Brasil, Uruguay y Paraguay entre 1970 y 2010.



**Fuente:** Rovea 2012, basado en diversas fuentes.

los rendimientos ( $1.70 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), sobrepasando el promedio mundial ( $1.60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

En términos generales, en la década de 1970 y subsiguientes (hasta el año 2000) en los cuatro países se dio un incremento en la superficie sembrada con soja, que sustituyó a otros cultivos (por ejemplo, trigo, maíz, girasol). En Argentina, Paraguay y Uruguay, la soja reemplazó áreas de pastizales, debido a lo cual paulatinamente se redujo la rotación de su cultivo con la ganadería. También se dio un importante incremento de la superficie de siembra por el desmonte de áreas silvestres, principalmente en Brasil y Argentina y, en menor medida, en Paraguay (Rovea 2012).

Como consecuencia de lo anterior, las áreas de producción de soja actualmente se concentran de la siguiente manera (Rovea 2012): a) en Argentina, en el centro del país, entre el centro y sur de la provincia de Santa Fe, sureste de la provincia de

Córdoba y norte de la provincia de Buenos Aires; b) en Brasil, en los estados de Rio Grande do Sul y Santa Catarina y en el sur del estado de Paraná; c) en Paraguay, en el borde este del río Paraná, en los departamentos de Canindeyú, Alto Paraná y Itapúa; y d) en Uruguay, en el borde oeste del río Uruguay, en los departamentos de Paysandú, Río Negro, Soriano y Colonia.

Aunque el desarrollo del cultivo de la soja ha sido diferente en tiempo, magnitud y comportamiento en los cuatro países, los incrementos en la superficie sembrada y en la producción que se dieron en el segundo lustro de 1970 y en parte de la década de 1980 se lograron principalmente por la introducción de la mecanización agrícola, que se intensificó con la instalación de fábricas de tractores, cosechadoras e implementos agrícolas y que fue especializándose en el diseño y desarrollo de maquinaria con mayor ancho de labor, como sembradoras que lograban muy buena siembra y distribución de las semillas y fertilizadores que permitieron alcanzar mayor eficiencia en el uso del fertilizante y la disminución del tiempo operativo (Rovea 2012).

Del mismo modo, durante la década de 1980 se comenzaron a utilizar los herbicidas pre-siembra y post-emergentes, con los que se hacía un control eficaz de las gramíneas y las malezas de hoja ancha. Durante esta década se comercializó el glifosato.

Como resultado de la mecanización y el control químico, durante la década de 1980 comenzaron las primeras experiencias de siembra del cultivo doble trigo/soja, lo que se pudo realizar debido a que el trigo es un cultivo de invierno y, finalizada su cosecha, se sembraba el de soja (“soja de segunda” o soja-II), que es un cultivo de verano. Para finales de la década de 1980, la técnica de la siembra directa de soja-II sobre el cultivo de trigo se había generalizado y para 1990, el área sembrada con soja por los cuatro países era de 17.38 millones de hectáreas (30% del área mundial) y los rendimientos eran de  $1.87 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , muy cercanos al rendimiento promedio mundial de  $1.90 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Si bien los indicadores de la década de 1980 señalan la importancia de la soja en términos de incrementos de

superficie, producción y rendimiento, con la intensificación de los cultivos de esta especie en cada país se aceleraron los procesos de degradación física y química del suelo. Como resultado, a finales de la década de 1980 y comienzos de la de 1990, se inició la adopción e implementación de tecnología para revertir ese proceso. Posteriormente, se generalizó en los cuatro países la práctica de la siembra directa (Díaz-Rosello 2001, Ekboir 2001) y el uso de terrazas, en Brasil y Paraguay, principalmente para contrarrestar la erosión hídrica, lo cual, ciertamente, fue la solución a este problema (Rovea 2012). Es de destacar la relevancia que tuvieron las instituciones nacionales de investigación agrícola de cada país con el desarrollo y la adaptación de esta tecnología (Ekboir 2001, Rovea 2012): en Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA); en Brasil, la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA); en Paraguay, el Instituto Paraguayo de Tecnología Agropecuaria (IPTA); y en Uruguay, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INTA).

Durante la década de 1990, los avances tecnológicos asociados con el cultivo de la soja fueron más relevantes en los cuatro países. En Argentina, se consolidó la siembra directa de la soja de primera (soja-I) y la siembra de trigo/soja-II, y en Brasil se implementó la siembra del maíz de segunda (maíz-II o *safrinha*). Adicionalmente, fue necesaria la modificación de la maquinaria, lo que permitió consolidar empresas (particularmente en Argentina) dedicadas a la oferta de equipo especializado (Del Río 2012, Rovea 2012). Aparecen los herbicidas pre-emergentes y nuevos insecticidas para control de malezas e insectos de la soja, respectivamente.

Desde el punto de vista del fitomejoramiento, desde finales de la década de 1980 hasta mediados de la década de 1990, se presentaron avances importantes, debido a la generación de las variedades de soja que constituirían los grupos de madurez y la incorporación del hábito de crecimiento indeterminado (figura 2.2). Estos se caracterizan por la producción de nudos sobre el tallo principal, luego de comenzar la floración y, en consecuencia, su altura puede ser considerablemente mayor que la de los cultivares determinados de la misma longitud de ciclo y fecha de floración (Giorda y Baigorri 1997, Rovea 2012).

**Figura 2.2.** Distribución de los grupos de madurez de soja para el Cono Sur.



**Fuente:** Rovea 2012.

Mientras los avances técnicos en fitomejoramiento, mecanización, siembra directa y control químico se llevaban a cabo y los agricultores hacían uso rutinario de ellos en búsqueda de la mayor productividad y eficiencia, en marzo de 1996, la Secretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación de Argentina expidió la resolución n.º 167<sup>1</sup>, con la cual se autorizó a la compañía Nidera S.A. la producción y comercialización de semilla y de los productos y subproductos derivados de la soja transgénica GM-RH. De este modo, en la campaña 1996-1997, Argentina sembró la primera variedad de soja genéticamente modificada resistente al glifosato (soja GM-RG) y se dio comienzo al auge de la utilización de semilla que hacía

1 [http://www.minagri.gob.ar/site/agricultura/biotecnologia/55-OGM\\_COMERCIALES/\\_archivos/res167-1.pdf?PHPSESSID=854ffccf50d778158b369e48a6bc31e9](http://www.minagri.gob.ar/site/agricultura/biotecnologia/55-OGM_COMERCIALES/_archivos/res167-1.pdf?PHPSESSID=854ffccf50d778158b369e48a6bc31e9)

uso de un paquete tecnológico previamente desarrollado y del cual los agricultores tenían conocimiento y dominio.

Luego de liberarse la soja GM-RG en Argentina, la semilla entró a Brasil (Rio Grande do Sul) y Paraguay (departamento de Itapuá). En Brasil, la solicitud de liberación de soja GM-RG fue presentada por Monsanto en 1998. La Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio), mediante el proceso n.o 01200.002402/98-60, aprobó su liberación para uso comercial en 2005. En Paraguay, Monsanto presentó la solicitud de liberación en 2001 y la Comisión de Bioseguridad Agropecuaria y Forestal (COMBIO) aprobó la liberación comercial en 2004 (resolución MAG 1691/2004). En Uruguay, Monsanto presentó la solicitud en 1996 y la liberación comercial fue aprobada ese mismo año (Decreto n.o 249/000 del 2 de octubre de 1996).

En Argentina, Brasil y Paraguay, la semilla de soja GM-RG y su respectivo paquete tecnológico se difundieron rápidamente, debido a que simplificaba el manejo del cultivo, hacía más eficiente el control de las malezas y disminuía los costos de producción en promedio USD15-30 • ha<sup>-1</sup> para cada uno de los tres países (cuadro 2.2, Del Río 2012, Rovea 2012). Sin embargo, la principal ventaja no era el costo, sino la erradicación eficiente de las malezas. En Brasil, Paraguay y Argentina, la prioridad era la resistencia a herbicidas antes que el potencial de la producción. Solo los productores que tenían más ajustada la tecnología daban prioridad al rendimiento (Rovea 2012).

**Cuadro 2.1.** Comparación de los costos\* del cultivo de soja GM-RG y de soja convencional en 1999.

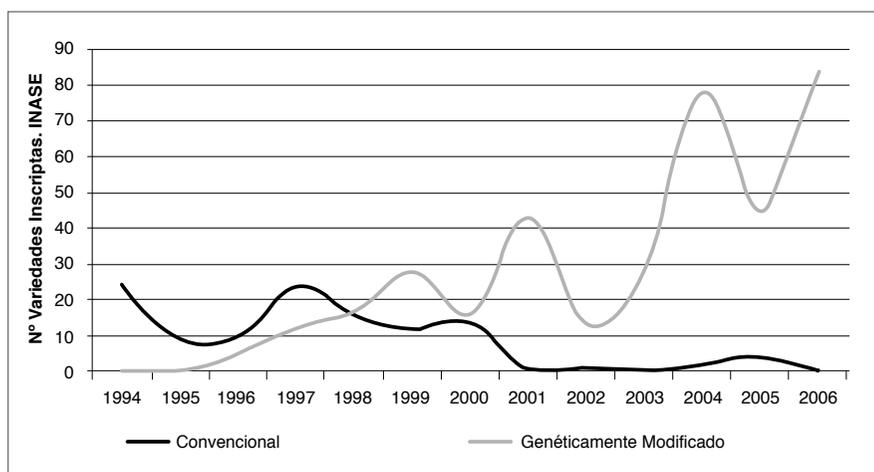
Rubro	Soja convencional	Soja GM-RG	Diferencia
Insumos	117.47	92.36	25.12
Labores	68.00	65.00	3.00
Total	185.47	157.36	28.12

\* En USD • ha<sup>-1</sup>.

**Fuentes:** Del Río 2012 y Rovea 2012.

Como resultado de los avances tecnológicos obtenidos durante la década de 1990, el cultivo de la soja avanzó en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y, durante la década del 2000, la utilización de la semilla GM-RG se consolidó sobre la convencional (figura 2.3). De este modo, las estadísticas para el año 2000 de los cuatro países reportaron 23.46 millones de hectáreas y un rendimiento promedio de  $2.38 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , superando en casi 10% la productividad mundial del cultivo ( $2.17 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

**Figura 2.3.** Evolución del registro de cultivares de soja convencionales y de soja GM para el período 1994-2006 en Argentina.



**Fuente:** Rovea 2012.

En la búsqueda del incremento de la productividad, se iniciaron experimentos de fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y azufre (Red de Nutrición Región Sur de Santa Fe, INTA, Casilda) y, mediante la alteración de fechas de siembra y densidad del cultivo, se mejoró el potencial de rendimiento con valores experimentales de hasta  $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Héctor Baignori, comunicación personal, INTA-Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez, mencionado por Rovea 2012). También durante esta década, se inició la adecuación de áreas de producción basadas en mediciones del nivel freático para

determinar los efectos sobre la productividad y se inició el uso de mapas de rendimiento, como herramienta de detección de problemas productivos y sistema de apoyo en la toma de decisiones (Manfredi, mencionado por Rovea 2012).

Como consecuencia del aumento de la producción y como parte del paquete tecnológico, se comenzó a utilizar el silo bolsa, un sistema simple y de bajo costo, cuyo principio es el de guardar granos secos en una atmósfera modificada (con bajo oxígeno y alta concentración de CO<sub>2</sub>) para su almacenamiento *in situ*, el cual resultó ser operativamente muy funcional y sin riesgo para la calidad (figura 2.4; Faroni *et al.* 2009). El uso del silo en bolsa generó un cambio muy importante en el sistema de almacenamiento y de comercialización de la soja (Rovea 2012).

A comienzos de la década del 2000, el cultivo de soja, tanto GM-RG como convencional, empezó a verse afectado por la roya asiática de la soja (Formento 2004), enfermedad causada por el hongo *Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow, responsable de disminuciones de rendimiento de 20% a 70%. Este problema no se ha eliminado y, a la fecha, la manera de hacerle frente a la enfermedad es mediante monitoreo para su detección en las etapas tempranas y el control químico (Quintana y Sasovsky 2006, USDA y CSREES 2012).

Por las condiciones favorables para el desarrollo de la roya, Brasil y Paraguay han sido los países más afectados. En el caso de Argentina, la rápida capacitación de los técnicos nacionales en detección anticipada, junto con el hecho de que la roya no encuentra un hospedero durante el invierno, hace que los efectos sean menos severos. Sin embargo, este problema ha incrementado los costos de producción en Brasil y Paraguay de USD50 a USD75 por hectárea, como resultado de dos a tres aplicaciones de plaguicida durante el ciclo del cultivo, y en USD25 • ha<sup>-1</sup> en Argentina (Del Río 2012, Rovea 2012).

Se han realizado muchos estudios sobre los efectos de los fungicidas en soja. Por ejemplo, se han determinado umbrales para cada tipo de enfermedad y los estadios fenológicos para obtener altas respuestas en producción y en calidad de semilla (Giorda y Baigorri 1997, Kantolic y Carmona 2006). Adicionalmente, el mejoramiento genético tradicional se ha orientado a la identificación de fuentes de resistencia (Rovea 2012).

**Figura 2.4.** Sistema de silo en bolsa: (A) confección del silo, (B) silo bolsa terminado y (C) extracción del grano del silo.



**Fuente:** Rovea 2012.

La década del 2000, en particular a partir de la campaña 2002-2003, fue muy importante para el crecimiento del cultivo de la soja en Uruguay, como resultado de la participación de productores argentinos que transfirieron su tecnología de producción. Las variedades de soja GM-RG fueron introducidas desde Argentina y pertenecían a los grupos V largo, VI y VII (Rovea 2012). El cultivo de la soja creció rápidamente en Uruguay en el área agrícola tradicional y en superficies destinadas a la ganadería.

En el año 2010, Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay sembraron soja en alrededor de 44.96 millones de hectáreas (43.91% del área mundial) y produjeron 130.47 millones de toneladas (49.88% de la producción mundial), con un

rendimiento promedio de  $2.9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , lo que significó un incremento de 11.7% con respecto al rendimiento mundial de ese año y un crecimiento de 252% sobre el rendimiento promedio de los cuatro países reportado para 1970. Vale notar que el mayor rendimiento para el año 2010 se dio en Brasil ( $2.94 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), seguido por Argentina ( $2.91 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), Paraguay ( $2.79 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) y Uruguay ( $2.1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Cabe destacar que el 87.5% de las siembras fueron de soja GM-RG (James 2011), dándose la coexistencia del cultivo de variedades convencionales y de transgénicas.

Se espera que, a partir de la campaña 2012, se introduzcan nuevos eventos de soja GM en los países, ya que en 2011 Argentina aprobó la comercialización de la soja *Liberty link* (Bayer). Asimismo, en Paraguay, se menciona la posible introducción de la soja Intacta RR2, resistente a insectos lepidópteros y a la nueva generación del herbicida *Roundup* (González 2012).

Aunque no existen estadísticas oficiales con respecto al área cultivada con soja convencional, con base en el trabajo de campo de Rovea (2012), se estima que en 2011-2012 al 15% del área cultivada con soja en Brasil correspondía a soja convencional (Celeres 2011), el 2% en Argentina y el 1% en Paraguay (Rovea 2012, Del Río 2012). En Uruguay, la totalidad de la soja sembrada es GM-RG.

# Paquete tecnológico del cultivo de la soja

A partir de 1996, se introdujo material de crecimiento indeterminado y la semilla de soja GM-RG, que junto con la siembra directa, constituyeron el paquete tecnológico de mayor adopción en la historia del cultivo. A continuación, se presenta una descripción de los componentes del paquete tecnológico que actualmente se aplica para el cultivo de la soja.

### 3.1. Siembra directa

La labranza del suelo es una actividad que permite obtener producciones importantes en el corto plazo debido a que: (i) disminuye la densidad y la resistencia a la penetración de la capa arable del suelo; (ii) oxigena el suelo, lo que aumenta la oxidación de la materia orgánica y libera gran cantidad de nutrientes, incluido  $\text{CO}_2$  a la atmósfera; y (iii) elimina las malezas de manera eficiente, aunque costosa (Ramírez *et al.* 2006). Por otro lado, el arado sucesivo hace que la materia orgánica disponible disminuya considerablemente y conlleva la pérdida de la estabilidad estructural del suelo (Martino 2001b), lo que disminuye la permeabilidad, dificulta el

intercambio de gases y aumenta la erosión del suelo. Por lo anterior, el laboreo excesivo del suelo es causa de la pérdida de su fertilidad y de la consecuente baja productividad.

Como alternativa para disminuir los impactos negativos del arado sobre los suelos y fomentar la conservación de estos, surge la siembra directa (también llamada labranza cero o de conservación), una práctica de cultivar la tierra sin arado previo, que mantiene cobertura permanente sobre la superficie del suelo (residuos de la cosecha anterior) y no realiza perturbación importante de él (ni arado, ni rotura), sino un pequeño surco en donde se deposita la semilla a una profundidad determinada (Díaz-Rosello 2001, Dabalá 2009, Aapresid 2012).

Numerosos estudios han demostrado que la siembra directa contribuye a mantener la estructura física (Martino 2001b, Ferreras *et al.* 2007) y las condiciones químicas (Bordoli 2001, García y Fabrizzi 2001), biológicas (Fontanetto y Keller 2001, Moron 2001, Calegari 2001, Filho *et al.* 2001) y de humedad del suelo (Aapresid 2012, Micucci y Taboada s.f.); aumenta la eficacia del uso de nutrientes; contrarresta la erosión (Marelli 2001) y, eventualmente, regenera los suelos (Ramírez *et al.* 2006). Sin embargo, es una técnica que exige la utilización de herbicidas químicos (Papa 2010) y la aplicación de fertilizantes, particularmente nitrógeno, fósforo, potasio y azufre (Bordoli 2001). Aun cuando requiere la utilización de herbicidas y fertilizantes, la siembra directa se considera una técnica ambientalmente más amigable que la labranza convencional (Calegari 2001, Ramírez *et al.* 2006, Aapresid 2012), puesto que la relación beneficio/costo para el ambiente (Foloni 2001, Moron 2001, Martino 2001a) y para el productor (Del Río 2012) es positiva, lo que explica su rápido crecimiento e implementación del paquete tecnológico en los países motivo de este estudio (Rovea 2012).

Con la intensificación de los cultivos de soja convencional en cada país, comenzaron los procesos de degradación física y química del suelo (Rovea 2012). En Argentina se han dado procesos de erosión hídrica y eólica, mientras en Paraguay y Brasil ha predominado la erosión hídrica, debido a la gran precipitación anual, al tipo de suelos y a las pendientes de estos. En Uruguay, la erosión hídrica es importante, aunque

no tan marcada porque hay rotación con ganadería. Como una manera de disminuir los impactos de la agricultura sobre el suelo, en los cuatro países se ha apoyado y promocionado la siembra directa como una práctica innovadora y eficiente de producción (Bragagnolo 1995, Ekboir 2001, Dabalá 2009).

### *Nutrición vegetal*

Por ser una leguminosa, la soja obtiene gran parte del nitrógeno que necesita (del 30% al 60%) mediante fijación biológica realizada por bacterias nitrificantes que viven en sus raíces. De este modo, depende poco del contenido de nitrógeno en el suelo, lo que constituye una ventaja competitiva frente a otros cultivos (por ejemplo, gramíneas como maíz y trigo) y en cuanto a la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), en particular, de óxido nitroso ( $N_2O$ ).

La eficiencia de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en soja, en términos del aumento del rendimiento y el cuidado del ambiente, ha sido ampliamente demostrada (García y Fabrizio 2001, Calegari 2001, Martino 2001b, Filho *et al.* 2001) y ha permitido la generación y consolidación de industrias de bioinsumos en países como Argentina, Brasil y Paraguay (CIAFA 2012, Engormix 2012). Particular desarrollo se ha presentado en bioinoculantes, mezclas de bacterias que inducen señales moleculares que activan o aceleran procesos metabólicos en las plantas y en las bacterias y fomentan una mayor capacidad de FBN.

Con respecto a la nutrición química y a otros elementos esenciales como el fósforo, la soja es el que tiene el umbral más bajo. En los inicios del cultivo de la soja, no se utilizaban fertilizantes. Sin embargo, la evidencia experimental concluyó que la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre aumentaba los rendimientos del cultivo y de los cultivos previos de trigo y maíz (García *et al.* 2006, Rovea 2012).

En Argentina, el proceso de degradación del suelo se había magnificado en la década de 1990 y, en muchas zonas, aparecieron los problemas de erosión hídrica, los suelos se debilitaron químicamente y, en consecuencia, comenzaron trabajos de adaptación de la siembra directa y, posteriormente, los de

fertilización, liderados por el INTA. Los primeros trabajos de fertilización con azufre en soja se presentaron en el INTA, seccional Casilda (Fernando Martínez, comunicación personal, en Rovea 2012). Como consecuencia, la fertilización con fósforo y azufre en soja de primera (soja-I) se implementó con buenos resultados y se generalizó en las zonas con mayor historia agrícola. En la zona central, se encuentran respuestas de la fertilización con fósforo (en el orden de 300 a 400 kg · ha<sup>-1</sup>). En las zonas de ganadería y en las áreas desmontadas, no hubo respuesta de la fertilización debido a la buena fertilidad natural de sus suelos.

En Brasil, los suelos de la región de los cerrados son muy ácidos (pH 4.0) y contienen elevados niveles de aluminio, lo que es tóxico para las plantas de porte alto y, en consecuencia, predomina la vegetación de gramíneas y de arbustos bajos. Este tipo de vegetación favorece el desmonte rápido y, por este motivo, se dio el crecimiento exponencial del área sembrada con soja en la década de 1990 (Rovea 2012). Sin embargo, por el tipo de suelo original, fue necesario hacer grandes inversiones para su corrección, ya que en su estado natural no era posible establecer cultivos. La corrección de los suelos (antes y ahora) consiste en hacer grandes aplicaciones de yeso (1500 a 3000 kg de sulfato de calcio · ha<sup>-1</sup>) para lavar el aluminio y luego aplicar cal (2000 a 4000 kg de hidróxido de calcio · ha<sup>-1</sup>) para corregir el pH del suelo y elevarlo hacia valores más neutros (entre 6.0 y 6.5). Luego de corregir el suelo, se fertiliza con fósforo (fuente fosfato triple de calcio) y potasio (fuente cloruro de potasio), de lo contrario, el cultivo no prospera porque son suelos muy deficitarios químicamente (Rovea 2012).

En Paraguay, el crecimiento agrícola se dio en la franja oriental del país, unos 100 km desde el río Paraná hacia el oeste, la zona con la mejor calidad de suelos y con precipitaciones anuales de 1600 a 2400 mm. En este país, el suelo original es ácido, por lo que se debió aplicar cal (hidróxido de calcio de 2000 a 3000 kg · ha<sup>-1</sup>) para corregir su acidez y permitir el desarrollo de los cultivos. Con respecto a Uruguay, por su tipo de suelo, se fertilizó con fósforo y potasio.

Por lo expuesto, es claro que la fertilización química es un componente fundamental del sistema productivo de la soja,

tanto de la convencional como de la transgénica. En sus estudios de campo, Rovea (2012) encuentra evidente que en una parte importante de las áreas dedicadas al cultivo de la soja existe un balance negativo de nutrientes, debido a la gran extracción de ellos que se hace a los suelos, como resultado de los altos rendimientos y de una muy baja reposición de los nutrientes (Rovea 2012).

Actualmente se realizan muchas investigaciones para conocer los mecanismos fisiológicos y moleculares de la nutrición vegetal, con el objeto de mejorar la fijación del nitrógeno y transferir la característica a especies que naturalmente no poseen tal mecanismo. Por otro lado, y producto de la revisión de la literatura, no se encontró reporte alguno que mencionara diferencias entre los regímenes de fertilización, ni el comportamiento entre soja GM-RG y soja convencional.

### 3.2. Herbicidas

Otro de los componentes esenciales para la eficiencia del sistema de siembra directa en soja es el control químico de malezas mediante herbicidas.

Dentro de los herbicidas aplicados al cultivo de la soja, el glifosato (N-fosfometilglicina,  $C_3H_8NO_5P$ ) es uno de los de mayor uso en la actualidad. Esta molécula, desarrollada en la década de 1970 y patentada por Monsanto en 1980 (patente de Estados Unidos n.o 4 226 611), interfiere con la capacidad de producir aminoácidos aromáticos (esencia de su actividad biocida). En consecuencia, tal compuesto actúa como herbicida de amplio espectro mediante su absorción a través de las hojas. Un listado detallado sobre las malezas presentes en cultivos de soja que pueden ser erradicadas con glifosato puede ser encontrado en Dellaferra *et al.* (2007) y Papa (2010).

Otro de los compuestos empleados con éxito como herbicida es el glufosinato o su sal de amonio DL-fosfinotricina (ácido 2-amino-4-(hidroxi(metil)fosfonoil)butanoico,  $C_5H_{12}NO_4P$ ), un compuesto desarrollado en 1972 (Bayer *et al.* 1972,

patente de Estados Unidos n.o 3 682 617). Las plantas tratadas con glufosinato mueren debido a que este compuesto ocupa el sitio activo del glutamato y, en consecuencia, inhibe a la enzima glutamina sintetasa, lo que hace que no se sintetice glutamina, interrumpiéndose la fotosíntesis y acumulándose amonio (Benítez y Benítez 2011).

La resistencia al glifosato (Roundup<sup>®</sup>, Buccaneer<sup>®</sup>, Cropsmart<sup>®</sup>, Prokoz<sup>®</sup>, etc.; Schuette 1998) es la base del desarrollo de la soja GM-RG, predominantemente usada en los países del Cono Sur, aunque se ha ampliado con la generación de soja GM resistente al glufosinato de amonio (Basta<sup>®</sup>, Finale<sup>®</sup>, Rely<sup>®</sup>, Ignite<sup>®</sup>, Challenge<sup>®</sup>, Liberty<sup>®</sup>, etc.) a utilizarse en la campaña 2012 en Argentina. El uso de estos compuestos se ha incrementado año tras año (ECPA 2010) de manera proporcional al incremento de las áreas de cultivos GM resistentes a herbicidas, que es el evento transgénico predominante hasta el momento (James 2011). Adicionalmente, la eficiencia del glifosato y el glufosinato de amonio hace que se empleen de manera rutinaria en cultivos no transgénicos de soja u otras especies (ECPA 2010). De igual modo, debido a la expiración de la patente del glifosato en el año 2000, en Argentina, Brasil y Paraguay, entre otros países, se han desarrollado industrias de síntesis de este compuesto (CIAFA 2012), lo cual ha abaratado su costo (capítulo 6).

El glifosato y el glufosinato de amonio son moléculas sintetizadas para erradicar malezas (Gazziero *et al.* 2001, Snoo *et al.* 2001 y 2005, ILSI Research Foundation 2011) y han sido clasificadas por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos en los grupos de toxicidad III y II, respectivamente (EPA 1993a y 1993b); es decir, se consideran herbicidas de toxicidad baja cuando se comparan con otros compuestos. Cabe señalar que sobre estos herbicidas, en particular sobre el glifosato, se han presentado algunos reportes experimentales que mencionan efectos negativos de esta molécula sobre la salud animal (Benachour y Gilles 2008).

Las evaluaciones de bioseguridad de cultivos de soja GM con resistencia a herbicidas han mostrado que, manejados con precaución (en términos de modo de aplicación, dosis y frecuencias), tales herbicidas cumplen eficientemente con su

función de destruir malezas en corto tiempo (menos de 10 días) y no generan efectos negativos sobre las comunidades vegetales o sobre el ambiente a mediano o largo plazo (Snoo *et al.* 2001 y 2005, ILSI Research Foundation 2011).

Las características de estos dos herbicidas son un ejemplo del balance costo-beneficio en el cultivo de la soja. Su utilización hace eficiente la siembra directa, lo que favorece el manejo del cultivo, la disminución del gasto energético y la reducción en la emisión de GEI. El empleo de otros agroquímicos más tóxicos incrementa las labores de arado y la descarga de biocidas más potentes, con mayores consecuencias negativas sobre el ambiente, la salud humana y la economía del cultivo.

### 3.3. Semilla de soja genéticamente modificada (GM-RG)

La transgénesis es un procedimiento que permite la incorporación de genes de una especie a otra (Villalobos 2011). En el caso de la soja, el primer evento de modificación genética empleado con fines comerciales fue la tolerancia al glifosato (Shah *et al.* 1990) y, posteriormente, la tolerancia al glufosinato de amonio (Donn 1998). A continuación, se describe brevemente el fundamento de los eventos transgénicos asociados con estos dos herbicidas.

El glifosato es degradado por la enzima 5-enolpiruvil-shiquimato-3-fosfato sintetasa (EPSPS). El gen que codifica para esta enzima fue aislado de la bacteria *Agrobacterium* CP4 (CP4 EPSPS) y utilizado en experimentos de ingeniería genética para armar una construcción (plásmido) que contenía otros elementos genéticos, incluidas secuencias (señales) de iniciación y terminación de la transcripción del gen. Dichas secuencias provenían de un fragmento de ADN (secuencia 35S) de un virus (el Virus del Mosaico de la Coliflor, CaMV, por sus siglas en inglés). Cabe destacar que, aunque las construcciones que fueron empleadas para generar la soja GM-RH provenían de una bacteria (*Agrobacterium tumefaciens*) y de un virus (CaMV), en ningún momento se puede decir que, técnica u

operativamente, se haya introducido en la planta de soja la bacteria o el virus de los que provenían las secuencias.

Adicionalmente, era necesario tener un mecanismo para identificar las plantas transgénicas, por lo cual se introdujo —simultáneamente al gen de la EPSPS— un gen que codificaba para la enzima fosfinotricin transferasa, que degrada al antibiótico kanamicina (a este gen se le conoce como gen marcador de selección). Al igual que la aclaración anterior, es necesario mencionar que las plantas de soja resultantes de la transformación con el gen marcador de selección no producen antibióticos.

La introducción de los genes EPSPS y marcador de selección a la planta de soja se llevó a cabo inicialmente mediante *A. tumefaciens* (Shah *et al.* 1990), una bacteria que de manera natural es capaz de hacer este tipo de transferencia de material genético (Villalobos 2011). También se hizo una transformación de la soja con biobalística, que consiste en el aceleramiento, y posterior entrada a la planta, de micropartículas recubiertas con el plásmido que contenía los genes de interés (Christou *et al.* 1991). Sin embargo, en la actualidad, los materiales de soja GM son predominantemente transformados empleando *Agrobacterium*.

Las primeras plantas de soja GM-RG que fueron cultivadas produjeron semillas que, al ser posteriormente incorporadas en el cultivo, generaban plantas resistentes al herbicida glifosato, el cual era metabolizado mientras actuaba sobre las malezas que la circundaban. La semilla de soja transgénica, junto con el uso de glifosato, fue patentada en 1990 (Shah *et al.* 1990) y liberada comercialmente en 1996, después de un proceso de evaluación que llevó a su desregulación en Estados Unidos y que, luego de cuidadosos análisis técnicos, fue aprobada para su liberación comercial en otros países (CAS e IICA 2010, ONU 2012), por ejemplo Argentina (1996), Uruguay (1996), Paraguay (2004) y Brasil (2005). En estos países, el proceso de análisis fue realizado por las Comisiones Técnicas Nacionales de Bioseguridad (CTNBio), las cuales aportaron argumentos técnicos que culminaron, desde el punto de vista normativo, con la expedición de las resoluciones oficiales de la autoridad nacional competente en cada país para la comercialización del cultivo GM-RG.

La característica de resistencia a herbicidas es mejorada de manera permanente. Se aprecia una muestra en la generación de soja GM resistente al glufosinato de amonio (Donn 1998), como respuesta al sistema de Monsanto basado en glifosato. Las plantas de soja transgénicas con resistencia al glufosinato de amonio (conocida como tecnología Liberty Link®) expresan el gen *bar* o *pat*, el cual codifica para la enzima fosfinotricin-N-acetil transferasa (PAT, por sus siglas en inglés) y fue aislado de dos tipos de bacterias: *Streptomyces viridochromogenes* (gen *pat*) y *Streptomyces hygrosopicus* (gen *bar*). Para los países del Cono Sur, la soja GM sembrada comercialmente ha sido en su totalidad resistente al glifosato. Sin embargo, en agosto de 2011, Argentina anunció la aprobación comercial de la soja Liberty Link de Bayer. Es de anotar que todo evento simple que se pretenda comercializar en los países es analizado por las CTNBio independientemente de otros eventos (evaluación caso por caso) (CAS e IICA 2010, ONU 2012). Sin embargo, aún hay discusión sobre los eventos que involucren genes apilados, es decir, plantas que incluyen simultáneamente varias características, por ejemplo, resistencia a herbicidas y resistencia a insectos (tecnología BT).

Es importante generar nuevos eventos que mejoren el desempeño de una característica en particular. Sin embargo, crear e introducir un nuevo evento o un nuevo cultivo GM al mercado es costoso en tiempo y dinero. Por ejemplo, para el caso específico de la soja se requieren 16.3 años y alrededor de USD136 millones (McDougall 2011), para descubrir, desarrollar y autorizar una nueva característica. Estas estimaciones están basadas en los eventos comercializados entre 2008 y 2012, para cada una de las seis multinacionales líderes en la tecnología de ingeniería genética (McDougall 2011).

La semilla de soja GM-RH se diferencia de su equivalente convencional (no transgénico) solo en el gen que confiere la degradación del herbicida. En consecuencia, si un cultivo de soja se ha establecido con semilla GM-RH y crece al lado de uno derivado de semilla convencional y no se tratan con herbicida, los dos cultivos se comportarían de manera idéntica y, ciertamente, serían afectados por la presencia de malezas y otros factores adversos. Sin embargo, si a los dos cultivos se les hacen dos aplicaciones de la misma dosis de glifosato, las malezas se reducirían de manera significativa, el cultivo

convencional sobreviviría, pero se vería afectado por el herbicida mismo y eventualmente sería necesario disminuir la dosis y aumentar las aplicaciones (Manning *et al.* 2003, Rozea 2012, Del Río 2012), mientras que el cultivo derivado de semilla transgénica se desempeñaría de manera óptima porque el herbicida no le afectaría de modo negativo alguno. De igual manera, vale anotar que el cultivo de soja GM-RH se comportará igual que su equivalente convencional, por ejemplo, ante una sequía severa o ante una enfermedad (por ejemplo, roya asiática). También es necesario tener en cuenta que, para el desarrollo de una semilla GM, el fitomejorador sigue siendo indispensable, pues los principios de la genética se siguen aplicando, tanto para el cultivo GM como para el convencional. De igual modo, el agrónomo es fundamental para el manejo apropiado de los dos tipos de cultivos en campo (Villalobos 2011).

### 3.3.1. *Genes marcadores de selección basados en antibióticos*

Se ha mencionado frecuentemente que existe un escenario hipotético relacionado con las plantas GM que contienen ciertos genes marcadores de selección basados en la resistencia a antibióticos y que esos genes podrían ser incorporados naturalmente por las bacterias del intestino durante la digestión y, en consecuencia, podría ser difícil tratar una posible infección bacteriana por resistencia a los antibióticos conocidos. Numerosos estudios científicos han demostrado, hasta el momento, que no hay una evidencia real de que los genes que confieren resistencia a los antibióticos en plantas GM sean una amenaza. De acuerdo con GMO Compass (2006), algunas de las razones que sustentan tal aseveración son las siguientes:

1. La probabilidad de una transferencia exitosa de un gen de resistencia a antibiótico a una bacteria es extremadamente baja: las estimaciones experimentales otorgan una probabilidad de una en diez mil millones a una en mil cuatrillones.
2. Los genes de resistencia para los antibióticos kanamicina y ampicilina, que son los más empleados, están presentes

ya en organismos que causan enfermedades. Por ejemplo, análisis de laboratorio en personas que no toman antibióticos muestran que en el 60% de los casos, más de 10% de las bacterias tiene resistencia a al menos un tipo de antibiótico. Las pruebas de suelo confirman que las bacterias resistentes a antibióticos, particularmente aquellas resistentes a la kanamicina, están ampliamente distribuidas en la naturaleza.

3. La kanamicina es en la actualidad raramente prescrita en la medicina humana. La ampicilina aún se utiliza para tratar ciertas infecciones, pero como la resistencia a esta molécula se ha extendido ampliamente, los tratamientos normalmente se combinan con otras sustancias (por ejemplo, inhibidores de beta-lactamasa), lo que remueve el efecto del gen de resistencia.
4. Cada vez que se consumen frutas o vegetales, se están consumiendo organismos resistentes a antibióticos del suelo y esto no ha mostrado efectos negativos.

Sobre el mismo tema, en el año 2004, un comité de expertos de la *European Food Safety Authority (EFSA)* presentó un estudio técnico en el que se concluía que no era justificada una prohibición general sobre el uso de genes marcadores basados en resistencia a antibióticos (EFSA 2004). Sin embargo, luego de considerar algunos criterios de evaluación de tales genes, incluidas la importancia médica de los antibióticos y la distribución de microorganismos que de manera natural ya poseen genes de resistencia, la EFSA sugirió una clasificación de los genes de resistencia a antibióticos en tres grupos: el primero, de uso ilimitado que incluye aquellos genes de resistencia a antibióticos que pueden usarse sin restricción en la generación de plantas GM, por ejemplo a la kanamicina; el segundo grupo, de aquellos genes que no deben ser utilizados en la generación de plantas GM porque confieren resistencia a antibióticos utilizados en medicina veterinaria o humana para tratar infecciones específicas; la resistencia a la ampicilina cae en este grupo; y un tercer grupo, que incluye genes marcadores cuyo uso no se permite por ningún motivo, porque confieren resistencia a antibióticos que son de alta especificidad y eficiencia, particularmente en medicina humana y, en consecuencia, la efectividad de estos no debe ser

incierto, por ejemplo, los genes del tipo *nptIII* con resistencia a la amikacina (EFSA 2004).

### 3.3.2. Soja transgénica tolerante a la sequía

La primera generación de eventos transgénicos en soja se ha enfocado a facilitar el manejo agronómico del cultivo. Sin embargo, las condiciones de sequía y de altas temperaturas registradas desde hace varios años y agudizadas en la última campaña en ciertas regiones del planeta (Sternberg 2011), incluidas las regiones productoras de soja de Argentina, sur de Brasil, Paraguay y Uruguay (Agrodigital 2012), justifican la incorporación de la soja GM tolerante a la sequía. A continuación, se presenta una breve descripción técnica de los fundamentos genéticos de tal característica y algunos avances en el tema. La discusión sobre el impacto de la soja GM tolerante a la sequía se presenta con mayor detalle en las secciones 5.4 y 7.

En la agricultura, la tolerancia a la sequía o al estrés hídrico se refiere a la habilidad de una planta o cultivo para elaborar su producto económico con una pérdida mínima en un ambiente de déficit hídrico. Además, es una característica compleja en la que se estima que están implicados al menos 60 genes (ACB 2007) y cuya expresión depende de la acción e interacción de diferentes caracteres, por ejemplo: morfológicos (precocidad, área foliar reducida, enrollamiento de lámina foliar, contenido de cera, aristas, sistema de raíces, macollaje reducido, estabilidad en la producción); fisiológicos (transpiración reducida, alta eficiencia en el uso del agua, cierre estomatal y ajuste osmótico) y bioquímicos (acumulación de prolina, poliaminas, trehalosa, etc., incremento de la actividad nitrato reductasa e incremento del almacenamiento de carbohidratos) (Mitra 2001).

Aunque existen reportes de generación convencional de nuevos materiales de diferentes especies tolerantes a la sequía (sorgo y algodón, Rosenow *et al.* 1983; yuca, El-Sharkawy 1993), la realidad es que el mejoramiento tradicional no ha tenido avances significativos en la liberación de variedades comerciales de cultivos, la soja, en particular (Goldman *et al.* 1989, Sloane *et al.* 1990, Oya *et al.* 2004), que sean altamente

tolerantes a la sequía. La compleja naturaleza de la tolerancia a la sequía limita su manejo a través de los métodos de fitomejoramiento convencional (Mitra 2001). Sin embargo, la biotecnología ha permitido identificar cientos de genes inducidos por el estrés hídrico en varias especies y la ingeniería genética se ha utilizado para introducirlos en otras plantas, principalmente en especies modelo (tabaco y *Arabidopsis*), pero en algunos casos se han probado en especies de interés comercial, como soja, trigo y maíz.

Recientemente, se han generado plantas transgénicas que expresan características de distintos tipos de genes estructurales y regulatorios relacionados con la tolerancia al estrés hídrico y provenientes de distintos organismos (Manavalan *et al.* 2009). Ejemplo de genes estructurales incluyen aquellos involucrados en la biosíntesis de prolina (gen *P5CS*, que codifica para la pirrolina-5-carboxilato sintetasa; Kavi Kishor *et al.* 1995), glicinbetaina (genes *betA* y *betB*, para la colina deshidrogenasa y betain aldehído deshidrogenasa), fructano (gen *SacB* para la levan sucrasa), manitol-inositol (gen *MTI* para la myo-inositol O-metiltransferasa, Sheveleva *et al.* 1997), trehalosa (gen *TPS1*, para la trehalosa-6-fosfato sintetasa; Holmstrom *et al.* 1996, Romero *et al.* 1997), etc. Dentro de los genes regulatorios asociados con el estrés hídrico, hay proteínas “dedos de zinc”, factores de transcripción NAC y factores DREB (*Dehydration-Responsive Element Binding*).

Sobre el tema, se han publicado resultados de experimentos de transformación genética de soja con genes DREB de *Arabidopsis thaliana* (Anderson 2010). Las plantas resultantes perdieron menos follaje y resistieron entre 15 y 30 días más que sus equivalentes no transgénicas a las condiciones de sequía creadas en el laboratorio.

En 2010, se reportó la patente (Chan *et al.* 2010) de la generación de soja transgénica tolerante a la sequía mediante la introducción de una versión modificada del gen *HAHB4*, un factor de transcripción proveniente del girasol, *Helianthus annuus*, que desencadena una respuesta global tipo dominó a diversas condiciones de estrés ambiental, como el estrés hídrico y salino y el ataque de insectos herbívoros. Las plantas de soja GM obtenidas mediante la inserción del gen referido, mostraron tolerancia a la salinidad e incremento de

la productividad (mayor a 10%) en condiciones de sequía moderada (Chan *et al.* 2010). De este modo, con un avance tecnológico importante y aunque aún no se comercializa la semilla modificada con este evento, Argentina se convierte en innovadora -y no solo importadora- de semilla de soja transgénica.

De otro lado, en *Arabidopsis thaliana*, Pei *et al.* (1998) demostraron que la pérdida de la función de la subunidad beta (ERA1) de la enzima farnesil transferasa (FT) resultaba en un fenotipo hipersensible al ácido abscísico (ABA) y, en consecuencia, las plantas toleraban la sequía. De este modo, la subunidad alfa o beta de la FT fue manipulada para alterar la expresión y la actividad de la enzima FT y con tal gen, se hizo una transformación genética de varias especies, incluidas soja, maíz y brassica (Huang *et al.* 2010). El maíz MON-87460 fue generado con base en este principio; ha sido desregulado por APHIS (APHIS 2011) y se espera que para la campaña 2012-2013, se emplee comercialmente en Estados Unidos. Así las cosas, será cuestión de tiempo y procedimiento la disponibilidad comercial de soja tolerante a la sequía con este esquema en los próximos años.

Aunque se han presentado aquí varios de los mecanismos estudiados con posibilidad de adaptar cultivos al estrés hídrico, incluso algunos ya patentados para generar plantas de soja GM tolerantes a la sequía (Huang *et al.* 2010), por la complejidad de esta característica, las opciones serán variadas y numerosas para obtener nuevos materiales comerciales de soja (Manavalan *et al.* 2009). Para ello, será necesario realizar más investigación en diferentes aspectos; por ejemplo, (i) implementar programas de selección asistida por marcadores para la identificación y selección de materiales de soja tolerantes a la sequía; (ii) hacer bioprospección de la diversidad biológica dirigida a esta característica; (iii) emprender la identificación, el aislamiento y la caracterización de múltiples genes simultáneamente, por ejemplo, mediante el uso de secuenciación, genómica funcional y bioinformática (IICA y PROCISUR 2010), para poderlos incorporar a los cultivos a través de fitomejoramiento tradicional o mediante transgénesis. La decisión de la ruta tecnológica a emplear dependerá, en última instancia, de la sequía, pues entre más severa (en tiempo e intensidad), mayor presión se tendrá en cuanto

a emplear alternativas rápidas y eficaces. Por lo anterior, la biotecnología en general, y la transgénesis en particular, se constituyen en herramientas indispensables para atender la necesidad de generar variedades de soja tolerantes a la sequía.



# Importancia de la regulación para la siembra de soja GM

Hasta el momento, se han presentado en este estudio elementos de análisis que permiten afirmar que la utilización de semilla de soja GM-RG genera beneficios en el ámbito productivo. Pero para que esto haya sido posible, se han requerido marcos regulatorios de bioseguridad que velan por la protección de la salud de las personas, el ambiente y la biodiversidad y que, al mismo tiempo, no obstaculizan el comercio (CAS e IICA 2010). A continuación, se presenta un resumen de los marcos regulatorios de los cuatro países objeto de este estudio, el cual se basa en el documento “Marcos regulatorios de bioseguridad y situación de las aprobaciones comerciales de organismos genéticamente modificados en los países del Consejo Agropecuario del Sur, CAS” (CAS e IICA 2010).

Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, junto con Bolivia y Chile, conforman el Consejo Agropecuario del Sur (CAS). Los países del CAS enfrentan el desafío de contribuir de manera importante a la producción regional y mundial de alimentos. Para lograr tal objetivo, desde hace 16 años los cultivos GM se han constituido en una herramienta fundamental.

Argentina, Brasil, Bolivia, Paraguay y Uruguay permiten el cultivo o la siembra de soja GM; es decir, cuentan con

permiso para su comercialización, lo que implica siembra, procesamiento y consumo humano y animal. Para llegar a este status, ha sido necesario generar y aplicar marcos jurídicos e institucionales claros. Los marcos regulatorios de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay buscan garantizar que los OGM que se liberen al ambiente, ya sea para siembra comercial, alimentación humana o animal, producción de semilla o investigación sean seguros para el ecosistema y para el consumo humano y animal. La normativa de Argentina, Brasil y Uruguay también establece la realización de estudios con respecto a la conveniencia comercial de la liberación al mercado de ciertos OGM (CAS e IICA 2010).

Aunque la normativa vigente para la autorización de la comercialización de OGM a escala comercial presenta diferencias en cada país, es claro que ha sido gracias al esfuerzo de los países por estructurar sus CTNBio (cuadro 4.1) que el cultivo de la soja ha crecido de modo importante, en área y en productividad, en los cuatro países. Además, es claro que la siembra de soja GM en cada país ha pasado por un riguroso análisis de riesgo (ONU 2012).

Para la generación de un cultivo transgénico, son necesarios los genes de interés, el sistema de transformación y de regeneración. Una vez que se obtienen las plantas, es indispensable realizar pruebas moleculares para detectar la presencia y la expresión de los transgenes introducidos. Para ser comercializadas, las plantas GM pasan por rigurosos ensayos de bioseguridad en que se analizan numerosos parámetros, a fin de garantizar la inocuidad a la salud humana y al ambiente, entre muchos otros aspectos. Una vez que se realizan dichas pruebas, se elabora un expediente que se presenta a las CTNBio de los países, para que sus expertos hagan las evaluaciones de riesgo y las estimaciones de impacto y puedan, así, dar el concepto técnico que será empleado para autorizar la liberación comercial de un evento o un cultivo GM. Una vez en campo, los agricultores implementan el cultivo con el paquete tecnológico que acompaña a la semilla. Es cierto que con la semilla de soja GM-RH se facilita el manejo, pero eso no implica desentenderse del cultivo.

**Cuadro 4.1.** Aspectos normativos vinculados al cultivo de la soja GM en los cuatro países analizados en este estudio.

País	Argentina	Brasil	Paraguay	Uruguay
<b>A. Normativa vinculada a OGM</b>				
Ley específica de bioseguridad		X		
Normas específicas para los OGM de uso agropecuario	X		X	X
Marco institucional	X	X	X	X
Convenio UPOV (acta 1978)	Aprobado	Aprobado	Aprobado	Aprobado
Protocolo de Cartagena	Firmado	Ratificado	Ratificado	Ratificado
<b>B. Características de la Comisión de Bioseguridad</b>				
Sigla	CONABIA*	CTNBio**	COMBIO***	CAI****
Interinstitucional	X	X	X	X
Sector público	X	X	X	X
Sector privado	X			
Investigadores	X	X	X	X
Sociedad civil		X		
Multidisciplinaria	X	X	X	X
Asesora	X	X	X	X
Consultiva	X	X	X	X
Deliberativa		X	X	
Instituciones parte	17	27	13	9
<b>C. Criterios de evaluación para el otorgamiento de permisos de comercialización</b>				
Posibles efectos negativos para el ambiente	X	X	X	X
Posibilidad de efectos negativos para la salud humana	X	X	X	X
Idoneidad del solicitante	X	X	X	
Características biológicas del organismo	X	X	X	X
Estabilidad genética	X	X	X	X
Mecanismo molecular por el cual se expresa el fenotipo	X	X	X	X
Especies sexualmente compatibles	X	X	X	X

\* Comisión Nacional Asesora de Biotecnología Agropecuaria

\*\* Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad

\*\*\* Comisión de Bioseguridad

\*\*\*\* Comité de Articulación Institucional

**Fuente:** Elaborado con base en CAS e IICA 2010.

El Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología (PCB) es un instrumento vinculante firmado en el ámbito de la Convención de la Diversidad Biológica (CDB), con el objetivo de contribuir a asegurar un nivel adecuado de protección en el campo de la transferencia, manipulación y uso seguro de organismos vivos modificados (OVM, sinónimo de transgénicos), que puedan tener efectos adversos en la conservación y uso sustentable de la biodiversidad enfocado específicamente en los movimientos transfronterizos (exportaciones/importaciones). Este protocolo entró en vigencia en 2003 y a la fecha ha sido ratificado por 163 países (ONU 2012, <http://bch.cbd.int/database/attachment/?id=10696>).

Su objetivo ulterior es abrir espacios para que los países tengan la oportunidad y la capacidad de evaluar los riesgos y los beneficios de las agrobiotecnologías, de acuerdo con su propio interés y soberanía, dándoles suficiente flexibilidad para crear la legislación o los mecanismos pertinentes que les permitan cumplir con las obligaciones del protocolo. En tal sentido, la implementación del PCB depende, en gran medida, de la creación de capacidades en el país y en el marco regulatorio.

Entre las reglas y los instrumentos previstos en este acuerdo están la exigencia previa del análisis del riesgo para la toma de decisiones con respecto a OVM, el mecanismo de “Acuerdo Previo Informado” para una primera importación de un OVM, la identificación de cargamentos que contengan o puedan contener OVM, el intercambio permanente de informaciones sobre los OVM entre las autoridades de cada país, así como las legislaciones vigentes, por medio del “*Biosafety Clearing House*” (BCH).

Actualmente se encuentran en discusión en el ámbito del PCB, entre otros, dos temas que merecen ser destacados. El primero se refiere a las guías relacionadas con los procedimientos de análisis de riesgo, cuyo propósito es complementar las orientaciones técnicas y los criterios aprobados por las Partes en el propio texto del Protocolo, específicamente en su Anexo III. El otro punto es la discusión en torno a aspectos socioeconómicos, como elementos para la toma de decisiones para las autorizaciones de actividades con OVM.

Además, es conveniente considerar la aprobación en octubre de 2010 del texto del Protocolo Suplementario de Responsabilidad y Compensación para daños resultantes del movimiento transfronterizo de OVM, derivado del Artículo 27 del PCB. Este nuevo instrumento, vinculado al primero, tiene por objetivo establecer normas y procedimientos armonizados de responsabilidad y compensación para daños resultantes del movimiento transfronterizo de OVM y constituye, básicamente, el establecimiento de medidas de respuesta en la esfera administrativa, en orientaciones sobre criterios a ser adoptados en cada país para la responsabilidad civil y el reconocimiento directo de los signatarios de establecer mecanismos de exigencia de seguridad financiera. A la fecha, tres países han ratificado ese protocolo suplementario (ONU 2012, <http://bch.cbd.int/database/attachment/?id=11067>).

Cabe destacar que a la fecha 163 países han ratificado el PCB, entre ellos Brasil y Uruguay, dos de los países considerados en este estudio. El hecho de que el PCB se encuentre en vigencia desde el 11 de septiembre de 2003, pero que aún haya importantes temas en negociación, implica una preocupación en especial para los países en desarrollo y exportadores, como los considerados en este análisis.

A lo anterior se suman otros temas que también causan preocupación, como es el caso de LLP (bajos niveles de presencia adventicia), coexistencia y etiquetado, que, dependiendo de su implementación, podrían causar un grave efecto en el comercio de *commodities* (y sus productos derivados) provenientes de semillas GM.



# Análisis ambiental comparativo

La agricultura es una actividad esencial para la producción de alimentos. Sin embargo, es responsable de un impacto ambiental considerable que incluye la emisión de GEI, la deforestación, la pérdida de biodiversidad, el cambio en el uso del suelo, el alto consumo de agua dulce y la eutrofización de las fuentes de agua, entre otros (Baumert *et al.* 2005).

En un reciente reporte de la OCDE (2012), se menciona que “los sistemas naturales tienen “puntos de inflexión” más allá de los cuales los daños se vuelven irreversibles (por ejemplo, la extinción de especies, el cambio climático, el agotamiento de mantos acuíferos, el deterioro de los suelos)” y se atribuye al desconocimiento de los umbrales relacionados con las consecuencias ambientales, sociales y económicas. Con el objeto de disminuir al máximo esos impactos negativos, la agricultura debe generar y hacer uso de diversas tecnologías para, de este modo, responder a las demandas crecientes de alimentos (en cantidad y calidad) de una población en aumento. Por la importancia de la soja para la agricultura mundial, en esta sección se presenta un breve análisis sobre los impactos positivos y negativos del paquete tecnológico para el cultivo de la soja, tanto convencional como GM, en los cuatro países considerados en el estudio.

## 5.1. Soja, cambio del uso del suelo y siembra directa

La soja GM o convencional es un monocultivo y, desde el punto de vista ambiental, para su siembra en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, al igual que en otras regiones del planeta, ha sido necesario desmontar ecosistemas “silvestres”, que en ese momento no tenían un uso específico para sus pobladores —en la década de 1980, los servicios ambientales no se tomaban muy en cuenta— o que eran empleados en otras actividades productivas, tales como la ganadería.

Una consecuencia importante de ese desmonte fue el cambio en el uso del suelo, lo que no estuvo siempre asociado con su aptitud. En las condiciones actuales, el cambio de uso del suelo debe incluir necesariamente cómo se ejecutó ese desmonte. Si se dio mediante tala y quema, ciertamente el deterioro ambiental por su aporte de GEI tuvo que haber sido alto. Debe señalarse que la reglamentación actualmente vigente en los países no permite la adecuación por cualquier medio de todo tipo de área para sembrar soja (Trigo 2011), condición diferente de la que prevalecía en las décadas de 1970, 1980 y parte de la de 1990.

Del mismo modo, las prácticas agrícolas empleadas cuando se inició la siembra de soja en las praderas se realizaron mediante roturación con arado, lo que generó consecuencias negativas sobre la estructura y la función de los suelos (Ferrerías *et al.* 2007). De hecho, existen numerosos reportes y diagnósticos para casi todas las zonas productoras de soja de los países de la región en los que se muestra, de manera cuantificada, el proceso de degradación que han sufrido y sufren los suelos y los ambientes de producción (Ramírez *et al.* 2006). Además, implicó un aporte considerable de CO<sub>2</sub>, como resultado de la liberación de carbono almacenado en el suelo (Álvarez 2006) y del gasto de combustible en las labores asociadas, pues se estima que la labranza de suelos aporta 5.2% de los GEI (Calegari 2001, Baumert *et al.* 2005). Visto así, si hubiera continuado el esquema de producción mediante arado y no se hubieran presentado e incorporado alternativas tecnológicas, vastas zonas de producción habrían degradado

sus suelos y habría sido necesario buscar y adecuar nuevas áreas para llegar a tener la superficie actual y difícilmente se hubieran logrado los rendimientos actuales. Pero la degradación de los suelos de ciertas zonas de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay se ha detenido, e incluso revertido, como consecuencia de la introducción y la utilización generalizada de la implementación del paquete tecnológico aquí descrito (Aapresid 2012).

Cabe destacar que en la estimación del efecto neto global de los GEI en la intensificación agrícola entre 1961 y 2005, Burney *et al.* (2010) encontraron que, mientras las emisiones aumentaron en ese lapso debido a factores tales como la producción y la aplicación de fertilizantes, el efecto neto de las elevadas productividades fue que se evitaron emisiones de hasta 161 gigatoneladas de C (GtC) (590 GtCO<sub>2</sub>eq) desde 1961. Adicionalmente, los autores mencionados estimaron que por cada USD invertido en productividad agrícola, se han reducido las emisiones en 68 KgC (290KgCO<sub>2</sub>eq., es decir, USD14.74.t C o USD4.t CO<sub>2</sub>eq.), lo que ha evitado la emisión anual de alrededor de 3.6 GtC (o 13.1 GtCO<sub>2</sub>eq.). En consecuencia, la inversión en mejora de la productividad contribuye de manera directa con las estrategias de mitigación al cambio climático.

La acumulación de carbono orgánico en el suelo depende fundamentalmente de la incorporación de rastrojo que generan las gramíneas (Moron 2001, Álvarez *et al.* 2004). Por ejemplo, el monocultivo de la soja genera balances de carbono negativos (Álvarez 2006, Galantini y Suñer 2008), pues, por ser una leguminosa, tiene una relación de carbono/nitrógeno baja (30C:1N). Por lo tanto, en cuanto mayor sea el porcentaje de gramíneas de alto rendimiento que se incorporan al sistema de producción, mayor será el balance de carbono, pues las gramíneas tienen una relación de 80C:1N. Así, el sistema de soja con rotación de gramíneas (maíz-II, trigo-II) se convierte en un sistema eficiente para mejorar el balance de carbono con la siembra de soja (Rovea 2012), razón por la cual debería fomentarse la rotación de cultivos.

Hay zonas que, por sus características edáficas y climáticas, a pesar de estar bajo sistema de siembra directa, están sufriendo los efectos de la erosión hídrica por falta de rotación con

gramíneas (Rodolfo Gil, comunicación personal, mencionado en Rovea 2012). Aunque en cada país es diferente (cuadro 5.1), en promedio la región tiene una relación soja/maíz de 2.56:1, es decir, se siembran 2.56 ha de soja por cada ha de maíz. Esto genera un desequilibrio en el balance de carbono, ya que con esta relación es negativo. Hay zonas en las que la relación es menor y los balances de carbono son más estables o levemente negativos (Álvarez 2006).

**Cuadro 5.1.** Comparación entre países de la relación de áreas sembradas con soja/maíz, soja/trigo y soja/trigo+maíz.

País	Relación de áreas		
	Soja/maíz	Soja/trigo	Soja/maíz+trigo
Argentina	4.65/1.0	5.55/1.0	2.53/1.0
Brasil	1.81/1.0	10.92/1.0	1.55/1.0
Paraguay	4.74/1.0	4.97/1.0	2.26/1.0
Uruguay	7.81/1.0	1.24/1.0	1.07/1.0
<b>Región</b>	<b>2.56/1.0</b>	<b>6.79/1.0</b>	<b>1.86/1.0</b>

**Fuente:** Rovea 2012, con base en datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay y la *Companhia Nacional de Abastecimento* (CONAB) de Brasil.

Se ha estimado que la labranza cero representa una disminución de 40% a 45% de los requerimientos energéticos (combustibles) empleados para labores pre-cosecha en comparación con los sistemas de labranza tradicional (Aapresid 2012). Por lo anterior, la siembra directa es una alternativa muy importante para el cultivo intensivo de soja, que se constituye en una práctica amigable con el ambiente y que contribuye con la mitigación del cambio climático global, porque reduce la emisión neta de GEI a la atmósfera (Martino 2001a, Álvarez 2006, Burney *et al.* 2010) y conserva las características físicas del suelo (Martino 2001b).

Sin embargo, como se mencionó antes, para evitar el empobrecimiento de los suelos, debido a la intensidad de la producción, se hace necesario definir regímenes de fertilización

óptima que contemplen fuentes, dosis y frecuencia de aplicaciones de nitrógeno, fósforo y azufre (sección 3.1). En experimentos sobre los efectos de la fertilización, se ha encontrado que la fertilización inorgánica (con nitrógeno, fósforo, azufre y micronutrientes) aumenta la fertilidad del suelo y el contenido de glomalina, indicador de mayor abundancia y actividad microbológica en el suelo (Grümber *et al.* 2012). Además, las comunidades microbianas en suelos con fertilización balanceada parecen ser más activas en la utilización de sustratos carbonados (Conforto *et al.* 2012). De igual modo, estudios de evaluación de la microbiota del suelo, en parcelas de diez años de cultivo, sometidas a distintos regímenes de nutrientes (testigo, P+S, N+S, N+P, N+P+S y N+P+S+micro) y bajo un sistema de rotación de cultivos maíz-trigo/soja-II han demostrado, por ejemplo, que las poblaciones de *Trichoderma* se incrementan cuando la soja es fertilizada y combinada con otro cultivo en un sistema de rotación (Meriles *et al.* 2009).

Desde los tiempos de la Revolución Verde, la agricultura ha sido proclive a emplear fertilizantes nitrogenados para maximizar la producción a través de la mejora del contenido de nitrógeno en los suelos. Sin embargo, el costo ambiental es muy elevado, pues se ha estimado que la agricultura aporta cerca de 80% del total del nitrógeno liberado al ambiente en forma de óxido nitroso (Baumert 2005). Además, la fijación industrial de nitrógeno implica el uso de 50% del combustible empleado en la mecanización de la agricultura. Por otra parte, la escorrentía (o lavado) de nutrientes a los ríos y mares es responsable de la eutrofización (enriquecimiento de las aguas) de los ecosistemas. Ante esta situación, el cultivo de la soja queda bien valorado, puesto que esta especie, por ser leguminosa, forma simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno, con la consiguiente disminución de la necesidad de utilizar fertilizantes nitrogenados. Así, el cultivo de la soja contribuye a la reducción de emisiones de óxido nitroso al ambiente cuando se compara con otros cultivos (Bindraban *et al.* 2009, James 2010).

Aparte del beneficio ambiental (Foloni 2001, Calegari 2001, García y Fabrizzi 2001), la fijación biológica de nitrógeno en la soja se ha convertido en un negocio atractivo para las empresas productoras de bioinsumos (Engormix 2012), lo que, además, abre la posibilidad de emplear más activamente las

colecciones de microorganismos depositadas de las diversas instituciones nacionales (un breve listado de instituciones se encuentra en la página de la Asociación Argentina de Microbiología, <http://www.aam.org.ar>). El mercado ofrece cepas de los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* y *Sinorhizobium*, con comportamientos diferenciales para distintos ambientes edáficos. De este modo, el cultivo de la soja se convierte en un consumidor importante de bioinsumos, demostrando la complementación de las tecnologías limpias con las químicas para los sistemas productivos, independientemente de que se utilicen semillas convencionales o transgénicas (Bindraban *et al.* 2009).

## 5.2. Monocultivo de la soja y su impacto sobre la biodiversidad

Como cualquier otro monocultivo (maíz, arroz, algodón, etc.), con la siembra del cultivo de la soja se ha dado una inevitable alteración de la biodiversidad, debido a la sustitución de las especies de flora y fauna que allí habitaban (no necesariamente silvestres) por una sola especie, la soja. Aunque se desconocen estudios que describan la magnitud de la pérdida de especies vegetales y animales en los ecosistemas de los cuatro países y, muy probablemente, no existan descripciones de la posible alteración en las dinámicas de la biodiversidad microbiana, lo que se puede inferir es que por oferta ambiental (suelos, agua, clima, radiación solar, etc.), en la mayoría de las zonas (sean cerrados, pampa y praderas, principalmente), que en la actualidad se encuentran sembradas con soja, los ecosistemas tienen una carga relativamente baja de diversidad de especies, aunque no necesariamente de número de individuos (Myers *et al.* 2000).

Con respecto al impacto de la soja sobre la biodiversidad, se ha demostrado que la siembra directa *per se* influye positivamente en el aumento de la biota del suelo (Colozzi Filho *et al.* 2001). Sin embargo, los cultivos de soja con semilla convencional utilizan una considerable gama de biocidas (herbicidas, fungicidas e insecticidas) de amplio espectro que pueden

afectar no solo malezas, sino otras formas de vida, particularmente microorganismos e insectos benéficos. Además, dichos compuestos deben ser aplicados de manera regular y con dosis específicas, previamente definidas en ensayos, pero no necesariamente aplicados por los productores siguiendo las recomendaciones técnicas. Un cultivo de soja convencional puede requerir entre ocho y doce aplicaciones de agroquímicos (particularmente glifosato, 2,4-D, metolacoloro, diclosulam y haloxifop metil) por ciclo productivo (Rovea 2012). De este modo, cuanto mayor la cantidad y la variedad de los biocidas que se apliquen, mayor el grado de contaminación de los suelos, el agua y el aire, así como el desencadenamiento de procesos impredecibles de resistencia biológica no deseados por el agricultor.

Los cultivos de soja GM-RH se basan en la utilización predominante de glifosato (en el Cono Sur) o glufosinato de amonio (en otras latitudes). El cultivo de la soja GM puede requerir entre cuatro y seis aplicaciones de agroquímicos, en las que se aplica el herbicida como máximo en tres ocasiones (Rovea 2012). En la actualidad, el glifosato es elaborado por numerosas compañías debido a la caducidad de la patente (en el año 2000). En consecuencia, por su efecto positivo para el control de malezas, su bajo poder residual, su relativa baja toxicidad, la disponibilidad en el mercado de parte de varias empresas productoras y la disminución probada de los precios, el uso de estos herbicidas se ha popularizado y el volumen de su utilización se ha incrementado en el sector agrícola.

El hecho de que los volúmenes de producción de glifosato y de glufosinato de amonio se hayan incrementado año tras año no debería considerarse como un contrasentido a la propuesta limpia de la transgénesis, ya que ambos herbicidas se utilizan en la soja, sea esta convencional o transgénica (Brookes y Barfoot 2011). Adicionalmente, la utilización de glifosato en actividades objeto de un gran debate público, por ejemplo, en la erradicación química de cultivos ilícitos en otras partes del planeta, ha hecho que se subvalore o satanice su real importancia en el sector agrícola y no se considere su aporte a la disminución de la degradación ambiental. Es claro que la aplicación de cualquier sustancia sintética al ambiente genera un impacto sobre este; sin embargo, es necesario realizar una evaluación objetiva de la relación beneficio/costo, pues en el

caso de la aplicación de glifosato y glufosinato en los cultivos de soja, tanto convencional como GM, el beneficio es evidente (Snoo *et al.* 2001 y 2005). Ciertamente, el glifosato y el glufosinato de amonio son compuestos que, manejados apropiadamente, causan menos impacto negativo al ambiente que sus equivalentes herbicidas sintéticos (Gazziero *et al.* 2001).

### 5.3. Ventajas ambientales de la soja GM

Como se ha mostrado a lo largo de este documento, la evolución del cultivo de la soja en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay se fundamenta en la implementación de un paquete tecnológico que involucra la siembra directa y la utilización de la semilla GM. Cuando las dos condiciones se presentan, se obtienen resultados que incrementan el rendimiento y el beneficio económico (Trigo 2011); además, disminuye el impacto negativo al ambiente (cuadro 5.2, James 2010).

**Cuadro 5.2.** Comparación entre el cultivo de soja convencional y de soja GM en términos de su impacto ambiental.

Característica	Tipo de cultivo de soja		
	Tradicional	Convencional	GM-RG
Utilización de siembra directa	No	Sí	Sí
Conservación de características físicas del suelo	Nula	Alta	Alta
Práctica de fertilización con P y S	No	Sí	Sí
Fijación biológica de N	Media	Alta	Alta
Impacto sobre microbiota del suelo	Negativo	Positivo	Positivo
Emisión de GEI (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O)	Alta	Media	Baja
Manejo de malezas	Alto	Medio	Bajo
Eficiencia input vs. rendimiento	Baja	Media-alta	Alta
Utilización de glifosato	No	Sí	Sí
Utilización de otros herbicidas	Baja-media	Media	Baja
Impacto sobre microbiota del suelo	Negativo	Positivo	Positivo
Contaminación de suelo, aire y fuentes de agua	Muy alta	Media	Baja

**Nota:** Los cultivos tradicionales son aquellos en que no se utiliza la siembra directa, en los convencionales se usa la labranza mínima y en los GM-RG se emplean la siembra directa y la semilla transgénica.

**Fuente:** Rovea 2012.

## 5.4. Tolerancia a la sequía en soja

Enfrentar la sequía y utilizar el agua eficientemente se ha considerado cada vez más prioritario, debido a los efectos visibles de la sequía extrema prolongada y del incremento de las temperaturas, que ocurren a escala regional, pero que tienen impacto global (Sternberg 2011). La sequía atenta claramente contra la seguridad alimentaria (FAO 2011), la economía (Cristaldo 2012) y la estabilidad de los países (Catarious y Espach 2009).

En los últimos cinco años, en particular durante las campañas 2008-2009 y 2011-2012, los cultivos de soja (tanto convencional como GM-RH) se han visto severamente afectados por la falta de lluvias. La situación ha sido dramática en las zonas productoras de soja de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, particularmente durante la campaña 2011-2012 (Agrodigital 2012), como consecuencia de la presencia del fenómeno de La Niña (DNM y UR 2011, SMN 2012, DISME/INMET y CPPMet/UFPEL 2012, Pasten y Vásquez 2012). Por otro lado, estudios de simulación climatológica estiman que un incremento de la temperatura media en las áreas productoras de soja de Brasil podría causar una pérdida de 64% de dichas áreas (Eduardo Assad, EMBRAPA, según Samora s.f.).

La falta de lluvias a finales de 2011 y principios de 2012 en Argentina redujeron en 30% los rendimientos de soja (Agrodigital 2012). Según estimaciones de los Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (CREA), el rendimiento esperado al momento de siembra era de  $3.545 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  y en febrero era solamente de  $2.523 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Sin embargo, tal rendimiento no será tan bajo como el de la campaña 2008-2009, que fue de  $1.800 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (50% menor de lo estimado al momento de la siembra). En Paraguay, los productores estiman que cosecharán durante 2012 un 45% menos de grano de soja, comparado con la cosecha de la campaña anterior (Cristaldo 2012). El impacto será de tal magnitud que se considera que habrá una caída del Producto Interno Bruto (PIB) y de las reservas económicas del país.

Las sequías seguirán presentándose. Podrían darse por períodos más largos, lo que generará contracciones en la producción mundial de alimentos y consecuentes movimientos en

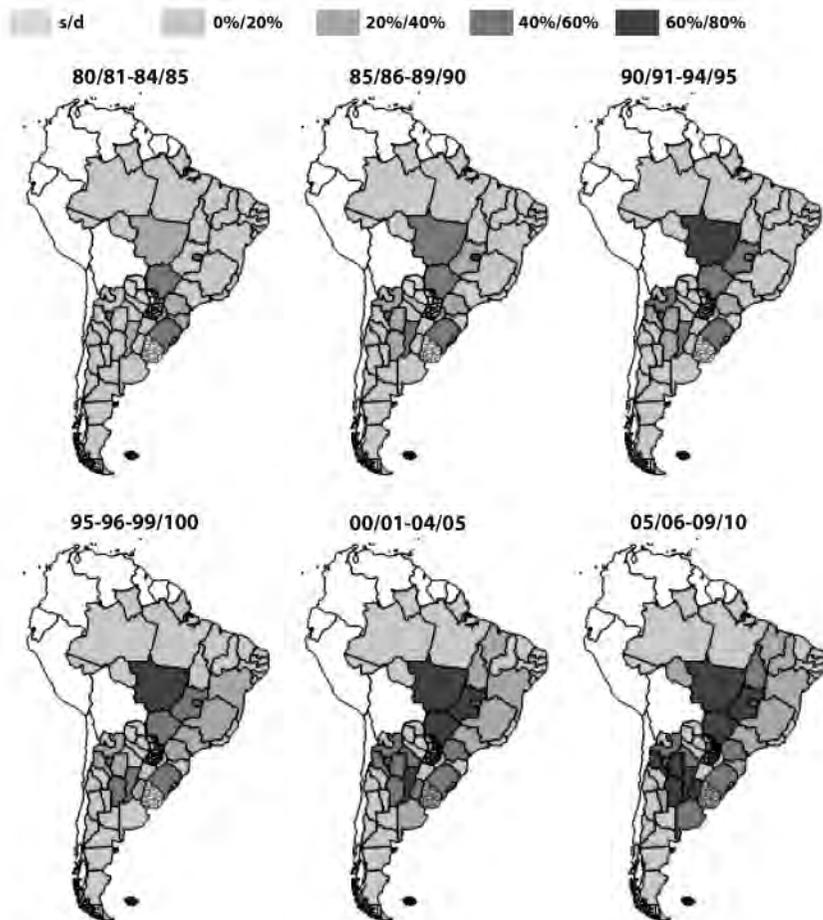
los mercados y en los precios. Ante este escenario, las diferentes instancias orientadas a la generación y transferencia de tecnología deben responder de manera rápida para permitir la mitigación y adaptación de la agricultura a esa expresión del cambio climático. Por ejemplo, la tecnología de riego deberá implementarse en las zonas donde se necesite, para lo cual habrá que hacer las inversiones necesarias; la agronomía debe utilizar aquellas prácticas que permitan el mejor uso del agua y la biotecnología, que deberá hacer uso de todas sus herramientas (Rocha 2011), para acelerar la generación de variedades tolerantes a la sequía. Así, la modificación genética no será la única alternativa de solución para la sequía, pero ciertamente será parte de la batería de herramientas eficientes con la que se contará para la conservación del ambiente, la utilización de áreas marginales y la adaptación de la agricultura al cambio climático. Posiblemente, en un futuro próximo, no se utilizará únicamente soja GM-RH, sino un paquete tecnológico basado en soja GM-RH tolerante a la sequía.

Es probable que en los próximos años se presenten nuevos eventos transgénicos de interés para la etapa primaria del cultivo, como por ejemplo relacionados con la tolerancia a la salinidad, la fijación de nitrógeno o la absorción eficiente de otros nutrientes. También se espera una tendencia a la generación de plantas GM con características de mayor interés para el usuario final (consumidores de alimentos, diversas industrias, etc.), tales como características asociadas a la composición enriquecida de aceites con fines industriales (por ejemplo, para la industria del biodiésel) o alimenticios (materiales con mayor contenido de grasas insaturadas o con moléculas más estables a la temperatura o a los procesos de hidrogenación, etc.). De cualquier modo, todas esas características responderán, no solo a los requerimientos inmediatos del consumidor final, sino a la presión impuesta por el cambio climático de aplicar metodologías y procesos limpios y amigables con el ambiente.

# **Análisis de costos: comparación de la evolución de la producción y los costos del cultivo de soja transgénica y convencional**

Tal como se expuso anteriormente (capítulo 2), desde la década de 1970 la superficie sembrada con soja ha venido registrando un aumento progresivo en los países objeto del presente estudio. La expansión de la superficie, en relación con otros cultivos agrícolas extensivos, también demuestra el incremento de la oleaginosa en las rotaciones (figura 6.1). En el presente capítulo se comparan los costos y la producción de soja en esos países.

**Figura 6.1.** Evolución de la superficie del cultivo de soja en relación con el resto de cultivos agrícolas extensivos en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, desde la campaña de 1980-1981 hasta la de 2009-2010.



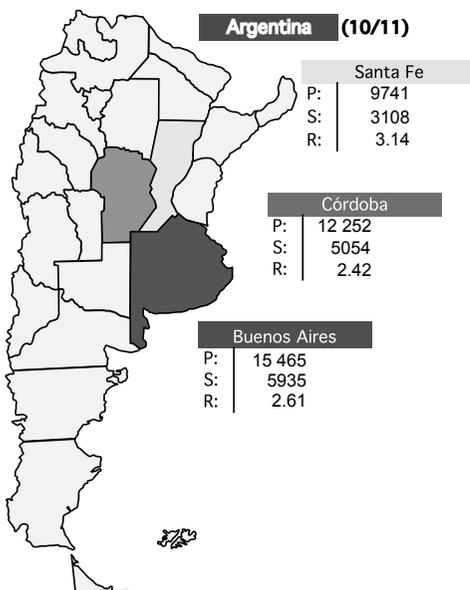
**Nota:** Cuanto más intenso el color, mayor la superficie sembrada con soja.

**Fuente:** Del Río 2012, basado en información proveniente de la *Companhia Nacional de Abastecimento* (CONAB) de Brasil, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, el Ministerio Agricultura y Ganadería de Paraguay y el Instituto de Biotecnología Agrícola (Inbio) de Paraguay.

## 6.1. Argentina

En Argentina, la zona de mayor producción de soja comprende las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba, que conforman la zona central conocida como “zona núcleo” (figura 6.2).

**Figura 6.2.** Producción de soja en Argentina en la campaña 2010-2011.



P = Producción (miles de toneladas)  
S = Superficie sembrada (miles de hectáreas)  
R = Rendimiento ( $t \cdot ha^{-1}$ )

**Fuente:** MAGyP. Tomado de Del Río (2012).

En la campaña 2010-2011, la provincia de Buenos Aires registró la mayor superficie sembrada con soja del país, con 5.9 millones de hectáreas, seguida por Córdoba y Santa Fe (5 millones y 3.1 millones, respectivamente). Estas tres provincias dan cuenta de casi el 75% de la producción de soja de Argentina.

La Región Central es la zona más tradicional para la agricultura y posee suelos profundos. Esta región registra aumentos en la fertilización química del cultivo año tras año, debido a las excelentes respuestas, y por ser la zona donde se presenta

la mayor extracción de nutrientes. La productividad de esta región en la campaña mencionada se ubicó en un rango de  $2.4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  a  $3.1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , presentando diferencias considerables con respecto a las provincias de las regiones marginales.

A nivel de país, el régimen pluviométrico disminuye de este a oeste y, en la misma medida, las precipitaciones se concentran más hacia el verano. Las isohietas van desde los 1100 mm al este a los 700 mm al oeste. Si bien el volumen de lluvias en Argentina es muy inferior al registrado en Brasil y Paraguay, las diferencias en los esquemas de producción de soja se encuentran asociadas a la calidad y profundidad de los suelos y a la menor transpiración del cultivo debido a la latitud en que se encuentra.

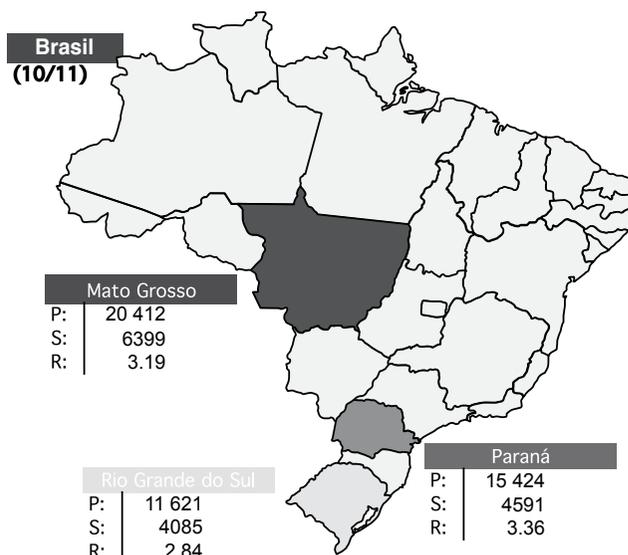
## 6.2. Brasil

Brasil es el principal productor de soja del Mercado Común del Sur (Mercosur). Mato Grosso es el mayor estado productor de soja, seguido por Paraná y Rio Grande do Sul (figura 6.3). Mato Grosso se caracteriza por presentar mayor estabilidad en los rendimientos que los restantes estados productores, debido a la regularidad de su régimen de precipitaciones, que inician en octubre y finalizan en abril, y a su volumen, que va de 2200 mm a 2400 mm anuales. Este régimen pluvial otorga gran estabilidad a la producción, a la vez que permite un segundo cultivo, como es el caso del maíz-II.

En el caso de los estados situados en el sur del país, desde Paraná hasta Rio Grande do Sul, las precipitaciones disminuyen y se presenta mayor variabilidad. Por esta razón, este último registra menores rendimientos (figura 6.3).

La expansión del área sojera de Brasil comenzó en los estados del sur y se desplazó hacia los estados del norte, mayormente impulsada por la migración de productores. En la actualidad, Brasil produce soja en la franja pluviométrica comprendida entre los 1400 mm a 2400 mm anuales, aunque numerosas áreas cuentan con serias restricciones de calidad de suelo, lo que se refleja en sus costos de producción y los rendimientos.

**Figura 6.3.** Producción de soja en Brasil en la campaña 2010-2011.



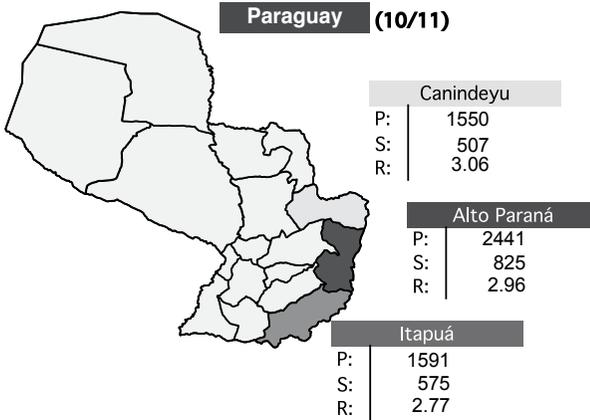
P = Producción (miles de toneladas)  
 S = Superficie sembrada (miles de hectáreas)  
 R = Rendimiento ( $t \cdot ha^{-1}$ )

**Fuente:** CONAB (Previsión de producción campaña 2010-2011). Tomado de Del Río (2012).

### 6.3. Paraguay

En Paraguay, la principal zona de producción de soja se encuentra en el margen oeste del río Paraná, región conocida como “zona oriental” (figura 6.4). En esta zona, los suelos son profundos pero de baja retención hídrica y químicamente muy frágiles. Al igual que los suelos de Brasil, requieren corrección (por su acidez) y el aporte de fertilizantes, debido a su déficit químico. Paraguay produce soja en una franja pluviométrica de los 1600 mm a 2200 mm anuales, aunque existen algunas zonas productoras en que el régimen de precipitación pluvial es de 1200 mm.

**Figura 6.4.** Producción de soja en Paraguay en la campaña 2010-2011.



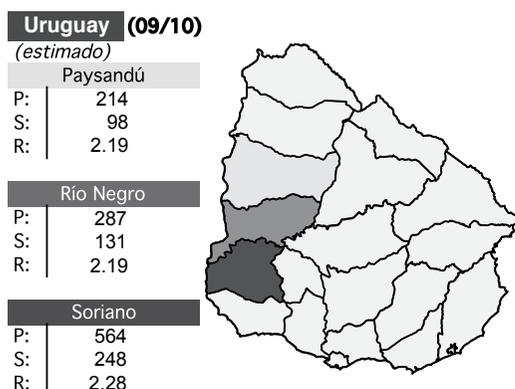
P = Producción (miles de toneladas)  
 S = Superficie sembrada (miles de hectáreas)  
 R = Rendimiento ( $t \cdot ha^{-1}$ )

**Fuente:** INBIO. Tomado de Del Río (2012).

## 6.4. Uruguay

La historia del cultivo de la soja en Uruguay es muy reciente, aunque el área sembrada ha crecido de manera exponencial y los sistemas de cultivo se han ido adaptando a la tecnología actual. La zona productora por excelencia se ubica en el margen este del río Uruguay (figura 6.5), donde los suelos son profundos y de mejor calidad que en el resto del país. En la medida en que se avanza hacia el este, la calidad de los suelos disminuye y aumenta el porcentaje de suelos con piedra o manto rocoso a escasos centímetros de la superficie, lo que hace improductivas ciertas zonas.

**Figura 6.5.** Producción de soja en Uruguay para la campaña 2010-2011.



P = Producción (miles de toneladas)  
 S = Superficie sembrada (miles de hectáreas)  
 R = Rendimiento ( $t \cdot ha^{-1}$ )

**Fuente:** MGAP. Tomado de Del Río (2012).

Las principales características de los suelos uruguayos son la textura arcillosa a franco-arcillosa, la profundidad media, los bajos contenidos de fósforo y las deficiencias muy marcadas de potasio. En cuanto a sus características físicas, se destacan la baja infiltración y la baja cantidad de agua disponible para los cultivos. La franja pluviométrica para el cultivo de la soja en Uruguay va de 900 mm a 1100 mm anuales. Las lluvias se caracterizan por presentar una distribución más uniforme en invierno que en verano, lo que favorece a los cultivos de invierno. En contraste, la errática distribución de las precipitaciones durante los meses de verano y los balances negativos hacen riesgosa la producción de cultivos de verano.

La breve descripción realizada de la producción de soja en los cuatro países evidencia que en numerosas regiones de ellos existen limitantes asociadas a la oferta ambiental y edafológica. Sin embargo, la tecnología actual, basada en un paquete tecnológico analizado en el presente estudio, ha permitido

definir estrategias de producción con resultados que van de aceptables a muy eficientes (cuadro 6.1).

**Cuadro 6.1.** Potencialidad productiva y características agroecológicas de los países.

País	Tipo de clima	Precipitación (mm anuales)	Tipo de suelo según la textura predominante	Agua disponible al metro de profundidad	Profundidad efectiva de raíces (m)
Argentina	Templado	700-1100	Franco Franco-limoso Franco-arenoso Arcilloso	Alta 120-180	Alta 1.5 a 2.5
Brasil	Tropical-subtropical	1400-2400	Areno-arcilloso	Baja 70-120	Alta 2 a 3
Paraguay	Tropical-subtropical	1600-2400	Areno-arcilloso	Baja 70-120	Alta 2 a 3
Uruguay	Templado	900-1100	Franco-arcilloso Arcilloso	Baja 70-100	Baja 0.7 a 1

Fuente: Rovea 2012.

## 6.5. Análisis de los costos de producción entre países

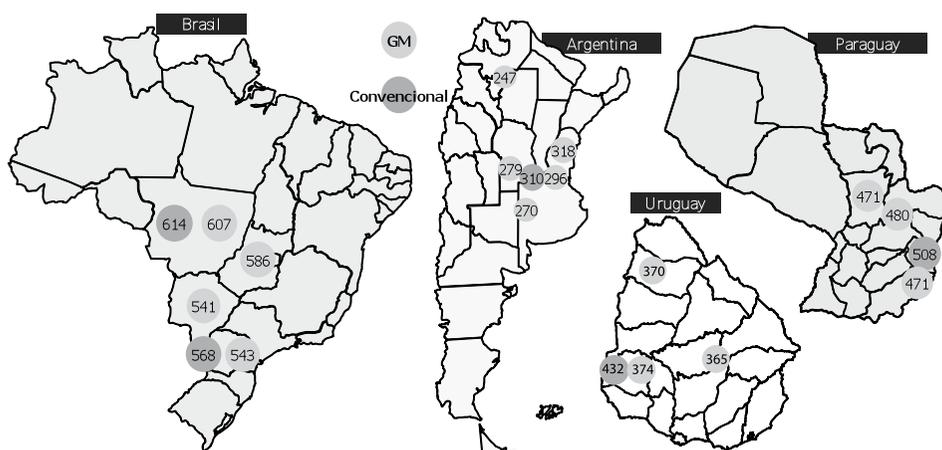
A continuación se presenta un análisis de los costos asociados al cultivo de la soja en los cuatro países (incluidos los referentes a agroquímicos, semilla, fertilizantes y labores de siembra, aplicaciones y cosecha), así como un análisis de los costos de comercialización y una comparación entre los costos del cultivo de soja convencional y los del cultivo de soja GM.

### 6.5.1. Costos asociados a las labores en el cultivo de la soja

El análisis de los modelos de producción estimados para la campaña agrícola 2010-2011, considerando los tipos de

cambio<sup>2</sup>, evidencia marcadas diferencias regionales en los costos directos de producción por hectárea (semilla, agroquímicos, fertilizantes y labores de siembra, aplicaciones y cosecha). Del Río (2012) analiza 20 esquemas de costos de producción y concluye que se ubican en rangos de USD247 • ha<sup>-1</sup> a USD614 • ha<sup>-1</sup> (figura 6.6, Del Río 2012).

**Figura 6.6.** Costos de producción de soja convencional y soja transgénica en las distintas zonas productoras de los cuatro países.



**Nota:** Los valores numéricos en círculos son los costos en USD • ha<sup>-1</sup> basados en modelos de producción a partir de información proveniente de la Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) de Brasil, la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), el Instituto Mato Grossense de Economía Agropecuária (IMEA), el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay y el Instituto de Biotecnología Agrícola (Inbio) de Paraguay.

**Fuente:** Del Río 2012.

2 Tasa de cambio por USD1: 4.05 pesos para Argentina, 1.67 reales para Brasil, 4350 guaraníes para Paraguay y 19.97 pesos para Uruguay.

Al comparar los costos de producción de la soja transgénica entre los países, los menores costos directos por hectárea se dan en Argentina (USD247 a USD318 · ha<sup>-1</sup>), seguida por Uruguay (USD365 a USD432 · ha<sup>-1</sup>), Paraguay (USD471 a USD508 · ha<sup>-1</sup>) y finalmente Brasil, con los costos más altos (USD543 a USD614 · ha<sup>-1</sup>).

Al considerar los costos directos (establecimiento del cultivo y costo de la cosecha), las mayores diferencias surgen en fertilizantes. En el caso de Argentina, en algunas regiones del país es necesaria la aplicación de fertilizantes. Uruguay tiene suelos neutros, pero muy deficitarios en P, K y S. Brasil y Paraguay tienen suelos ácidos y de muy bajo contenido de P, K y S, por lo que los costos varían en función de los diferentes volúmenes y precios de los fertilizantes en cada país.

Con respecto a los costos en fertilización, cabe mencionar el aporte de los desarrollos tecnológicos. En el caso del N, nutriente muy demandado, el cultivo es capaz de asimilar de 40% a 80% mediante la fijación biológica. En este proceso, el mejoramiento de las bacterias fijadoras fue un gran avance para la obtención de rendimientos de aceptables a altos y para la disminución de los costos de producción, pues el costo de inoculación para el cultivo representa en promedio tan solo USD3 · ha<sup>-1</sup> (equivalente a 0.5% a 1.5% de los costos directos; Del Río 2012).

De esta forma, las diferencias en la aplicación de fertilizantes se constituyen en el principal factor que explica la variación en los costos de producción entre las distintas zonas productoras de cada país y entre países. En el caso de los agroquímicos, las mayores diferencias de costo también se generan a partir de los distintos requerimientos de insumos y necesariamente de las cantidades aplicadas. Finalmente, la variación en los costos también es influida por las diferencias en las erogaciones para el establecimiento del cultivo, mantenimiento y cosecha. Al respecto, la existencia o no de un mercado desarrollado de servicios de maquinaria agrícola genera distintos esquemas de producción, con mayor o menor requerimiento de capital en maquinaria. De esta forma, los costos de operación y la intensidad de uso de este capital terminan afectando necesariamente el costo de producción (Del Río 2012).

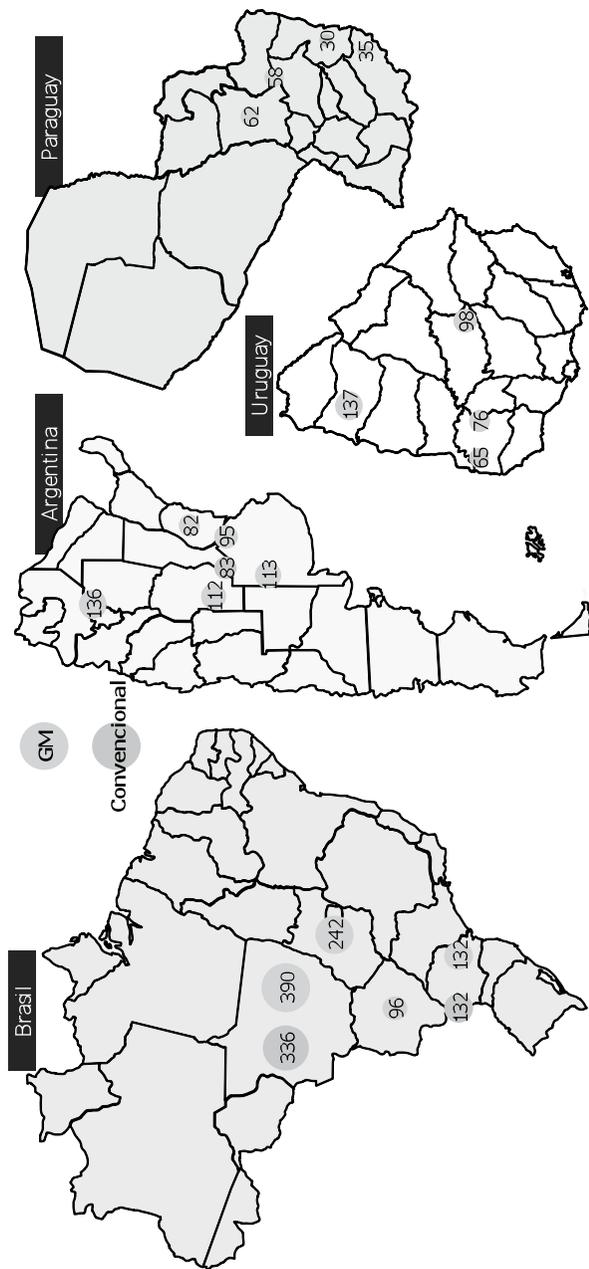
Cabe mencionar que la diferencia de los costos relacionada con los insumos está en los volúmenes de producto más que en su precio. El precio por unidad de producto de los insumos, por lo general, es un factor de baja incidencia para explicar las diferencias de costo dentro de los países y entre estos. Los diferenciales de costo en agroquímicos y fertilizantes son generados principalmente por el tipo de insumos y las diferentes dosis requeridas (Del Río 2012). Aunque la mayoría de los insumos (medidos en USD) no presenta divergencias tan significativas, en algunos rubros, como la semilla, sí existen diferencias apreciables. Por ejemplo, el costo de la semilla en Argentina es de USD0.50 a USD0.65 · kg<sup>-1</sup>, en Brasil de USD1.0 a USD1.30 · kg<sup>-1</sup>, en Paraguay de USD1.0 a USD1.30 · kg<sup>-1</sup> y en Uruguay de USD0.60 a USD0.90 · kg<sup>-1</sup> (Del Río 2012, Rovea 2012).

### 6.5.2. Costos de comercialización

Además de los costos directos de producción, los de comercialización interna también presentan diferencias significativas entre los países (figura 6.7), debido básicamente a los costos del transporte desde las zonas de producción al puerto de embarque (Del Río 2012). Dentro de cada país, el transporte de granos se realiza principalmente por vía terrestre; solo un bajo porcentaje de la producción se transporta por tren o por barcaza. En el caso de Brasil, Paraguay y Uruguay, la gran mayoría de la soja es exportada como grano (poroto), mientras que en Argentina más de 70% de la producción se exporta como aceite y *pellet*, lo que requiere una gran capacidad de molienda y procesado.

Las diferencias en los costos de transporte también son generadas por el precio del combustible (Del Río 2012), aunque la regulación diferencial del producto y el hecho de que las variaciones en el precio no siempre se trasladen al mercado interno de cada país hacen que este tipo de análisis exceda los objetivos de este estudio.

**Figura 6.7.** Costos de comercialización entre países.



**Nota:** Los valores en los círculos representan los costos de comercialización en USD • ha<sup>-1</sup>.

**Fuente:** Del Río 2012, con base en datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), la Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) de Brasil, la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), el Instituto Mato Grossense de Economia Agropecuária (IMEA) y relevamientos a campo.

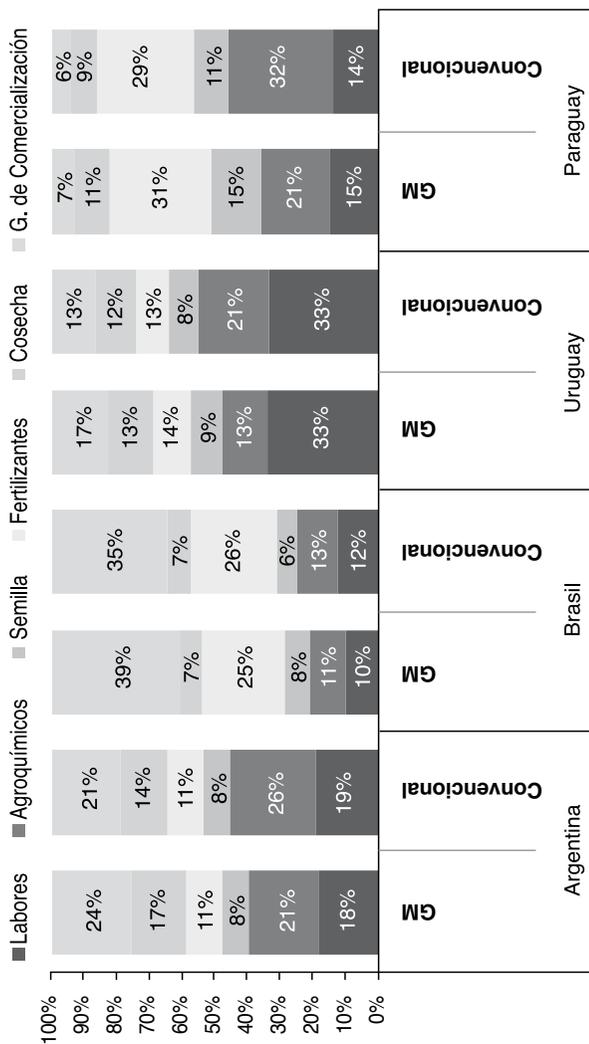
### 6.5.3. Comparación de los costos de la soja convencional y de la soja GM

La diferencia en los costos directos de producción entre la soja convencional y la soja transgénica se ubica en un rango de USD7 a USD58 · ha<sup>-1</sup>, lo que implica un diferencial máximo de 15% (figuras 6.8 y 6.9).

Cabe notar que, en términos del costo por tonelada producida, estos diferenciales se amplían de forma considerable en algunas regiones, dada la economía de escala por los mayores volúmenes de la soja GM producida. El porcentaje de soja convencional en la región se estima en 3% (Del Río 2012), llegando en algunas zonas a 8%-15%, como es el caso de la región norte del estado de Mato Grosso.

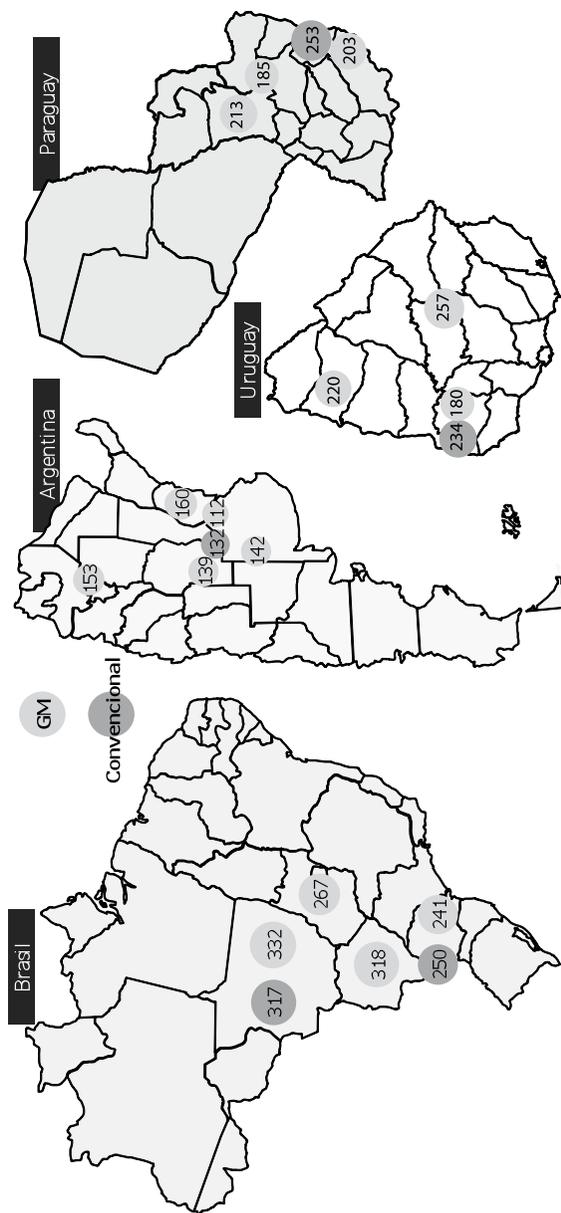
La soja convencional es un producto atractivo para ciertos nichos de mercado, donde existe una demanda especializada de ella para consumo humano (por ejemplo, Europa y Asia). Dado el precio diferencial que tiene con respecto a la soja GM, es una posibilidad de negocio atractiva para ciertas empresas particulares. Sin embargo, el presente estudio refleja que, para que el sistema de producción de soja con semilla convencional sea rentable, se requiere un alto grado de eficiencia, ya que para lograr buenas producciones se debe realizar un manejo del cultivo mucho más específico, estar muy alerta al momento oportuno del control de malezas y hacer mayor cantidad de aplicaciones de agroquímicos. Como se señaló, el cultivo de la soja GM puede requerir un máximo de tres aplicaciones de herbicida, mientras que uno convencional puede requerir de cuatro a cinco, lo que encarece los costos (Rovea 2012). Igualmente, el costo de la mano de obra se incrementa entre USD10 · ha<sup>-1</sup> y USD20 · ha<sup>-1</sup> en comparación con el costo del manejo de la semilla GM. A lo anterior se suma la necesidad de contar con un proceso de trazabilidad para evitar la presencia adventicia de soja transgénica, lo que también incrementa los costos (Del Río 2012).

**Figura 6.8.** Distribución de los costos de soja GM y soja convencional en los distintos países, expresada en porcentaje.



**Fuente:** Del Río 2012, basado en modelos de producción a partir de información proveniente de la *Compañía Nacional de Abastecimiento (CONAB)* de Brasil, la *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)*, el *Instituto Mato Grossense de Economia Agropecuária (IMEA)*, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay, el Instituto de Biotecnología Agrícola (Inbio) de Paraguay y estimaciones propias.

**Figura 6.9.** Costos totales de soja convencional y soja transgénica en los distintos países.



**Nota:** Los valores en los círculos representan los costos totales en USD • t<sup>-1</sup>

**Fuente:** Del Río 2012, basado a su vez en modelos de producción a partir de información proveniente de la *Compañía Nacional de Abastecimiento* (CONAB) de Brasil, la *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* (Embrapa), el *Instituto Mato Grossense de Economía Agropecuária* (IMEA), el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay y el Instituto de Biotecnología Agrícola (Inbio) de Paraguay.

En las entrevistas realizadas a productores de soja convencional en cada país (Rovea 2012), los agricultores remarcaron como aspectos relevantes las estrictas y necesarias medidas de control, con su trazabilidad correspondiente, a la vez que destacaron la especificidad del producto en lo que respecta al mercado. En cada país, se entrevistó al menos a una empresa productora de soja convencional. En todos los casos, los funcionarios entrevistados argumentaron que atienden nichos de mercado y que tienen medidas muy estrictas de control con su trazabilidad correspondiente.

En el caso de Brasil, el estado con mayor producción de soja convencional es Mato Grosso, principalmente en la región norte, donde comienza la transición de la Amazonia. Esta zona, con restricciones para la ampliación de la superficie agrícola (no pudiendo superar 20%), comercializa la soja convencional a través de los puertos del norte del país, a diferencia de la soja transgénica, que es transportada hacia los puertos del sur, lo que explica la diferencia en los costos de comercialización entre ambas variedades. La bonificación para la soja convencional, debido a su uso especializado en nichos de mercado, es de alrededor de  $\text{USD}20 \cdot \text{t}^{-1}$ , mientras que en el estado de Paraná la mejora en el precio se ubica en torno a los  $\text{USD}6 \cdot \text{t}^{-1}$ . En este último estado, el área sembrada con soja convencional es casi nula, cultivada únicamente por algunos pequeños productores.

En Paraguay también hay casos de comercialización de soja convencional a mercados con requerimientos específicos, como es el caso de la Cooperativa Japonesa de Iguazú, que realiza exportaciones a ese país. Por ejemplo, dos variedades de soja producidas, por ser convencionales y por su alto grado de proteína (42%), permiten una bonificación de hasta  $\text{USD}200 \cdot \text{t}^{-1}$  sobre el precio del mercado de Chicago. Sin embargo, para su exportación se la debe clasificar por tamaño, lo que implica un descarte de 30% a 40%, que es vendido con el precio local. En Argentina, la gran mayoría de la producción de soja convencional es procesada y vendida lista para consumo humano en mercados especializados (Del Río 2012).

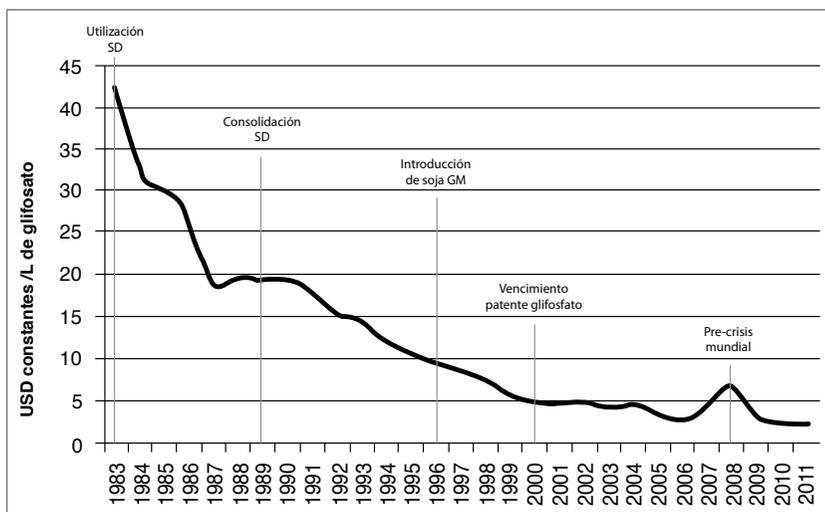
En el estudio de Rovea (2012), basado en entrevistas con productores, quedan evidenciadas las diferencias asociadas al producto, la manera de exportar y el tipo de negocio que

cada empresa realiza, lo que ayuda a explicar las diferencias en los costos. La soja convencional no es un *commodity* (Del Río 2012), por lo que cada caso relacionado con este tipo de cultivo tiene un sistema de precio diferente y propio de cada cliente. En general, los mercados demandantes de este producto están en Europa y Asia.

Como se señaló anteriormente, la diferencia en el costo entre soja convencional y soja transgénica es de un máximo de 15%, lo que se debe principalmente a dos factores (Del Río 2012):

- El precio de los insumos para la soja convencional no se ha incrementado en los últimos años; de hecho, el precio se ha mantenido y en algunos casos ha disminuido. Una de las principales causas de esta tendencia se relaciona con el vencimiento de las patentes de los principios activos de los herbicidas para sojas convencionales y la consecuente fabricación de compuestos genéricos en muchos lugares del mundo. La libre competencia permitió el mantenimiento o la disminución de los precios. Uno de los ejemplos que mejor ilustran el beneficio sobre costos para la soja GM es la disminución en el precio del glifosato (figura 6.10).

**Figura 6.10.** Evolución del precio del glifosato en Argentina (USD constantes a diciembre de 2011/litro de compuesto).



SD = Siembra directa.

**Fuente:** Basado en Agroseries - AACREA.

Si bien no existen estadísticas consolidadas respecto al consumo de este producto, el uso del compuesto se ha incrementado año tras año proporcionalmente con el desarrollo de la soja GM y su expansión en los territorios.

- En la actualidad, los costos de producción de soja transgénica están sufriendo aumentos de entre USD25 y USD45 • ha<sup>-1</sup>, debido a la utilización de otros herbicidas adicionales al glifosato y a la resistencia o tolerancia a este compuesto en algunas especies de malezas (Papa 2010). Se ha sugerido que los problemas de control de algunas malezas son generados por una mala utilización de la tecnología, debido a que la ausencia de rotación de modos de acción de herbicidas va seleccionando especies que, con el tiempo, se vuelven un problema (Gazziero *et al.* 2001). Los desbalances de cultivos que se registran en algunas zonas de los países deberían ser un aspecto sobre el cual la región debería enfocar sus políticas.

De esta forma, el análisis microeconómico realizado a partir de 20 sistemas modales de producción de soja de los países analizados expone las diferencias en los costos de producción de las distintas regiones. Las necesidades de fertilización, dadas las características de los suelos y los costos de comercialización, explican mayormente los diferenciales. Por otra parte, queda evidenciado que, en la actualidad, los costos de producción de la soja GM y la soja convencional son similares (un máximo de 15% de diferencia), aunque esta última presenta una mayor complejidad en su manejo.

Por otra parte, estudios recientes realizados para Argentina (Trigo 2011) dimensionan el impacto agregado de la soja GM. Mediante un modelo de simulación, se estima que la adopción de esta tecnología generó un beneficio bruto acumulado para el periodo 1996-2011 de USD65 435 millones. Además, el estudio indica que la estimación en términos de ahorro económico para los consumidores en el mismo periodo se ubica en torno a los USD89 000 millones.

# Análisis de escenarios posibles

¿Qué sucedería si en los cuatro países objeto de este estudio se cultivara únicamente soja convencional, si en ellos solo se produjera soja GM o si se continúan cultivando ambos tipos? Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay contribuyen con casi la mitad de la producción mundial de soja (FAO 2012), la mayor parte de la cual (aproximadamente el 90%) es GM (James 2011). Como conclusión de algunos ejercicios de simulación (Rovea 2012, Del Río 2012), se presentan las siguientes consideraciones.

### 7.1. Efecto de la ausencia del cultivo de soja GM en los cuatro países

¿Cuáles serían los costos económicos y ambientales en que se debería incurrir para producir la soja en los volúmenes actuales y satisfacer las demandas futuras de soja sin el paquete tecnológico descrito en este estudio?

En el caso hipotético de que la región cultivara el 100% de su superficie con soja convencional, la producción global dismi-

nuiría entre 15% y 25% (Del Río 2012), debido básicamente a la pérdida de la eficiencia en el control de las malezas (Manning *et al.* 2003). Además, el crecimiento en área sería más lento que el actual, por el difícil control de las malezas en algunas zonas (Papa 2010). Otro componente sería el costo de producción, el cual se podría incrementar entre 7% y 15% (Del Río 2012), sin considerar el costo de oportunidad operativa para realizar las labores en tiempo y forma, ni el costo ambiental (Foloni 2001) asociado con la liberación de distintos agroquímicos sintéticos.

En un escenario de ausencia de producción de soja GM en la región, se debería tomar en cuenta, además, el costo de no permitir la presencia de otros eventos transgénicos en el futuro, como por ejemplo la tolerancia a la sequía. El hecho de tener sembrada solamente soja convencional en un escenario de sequía, como el que se dio en las campañas 2008-2009 y 2011-2012, en la última de las cuales se ha estimado una pérdida de alrededor de 30% de los rendimientos de la cosecha de soja GM-RH (Agrodigital 2012), causaría la pérdida de cosechas completas, con sus consecuentes impactos económicos y sociales (Cristaldo 2012).

Como se mostró en las secciones 3.2.2 y 5.4, la resistencia a la sequía ha sido estudiada en la soja y en otras especies. Sin embargo, la complejidad de dicha característica (Mitra 2001) limita el accionar del fitomejoramiento convencional para generar nuevas variedades de soja en un muy corto tiempo. Sin embargo, si una nueva variedad de soja altamente tolerante a la sequía, generada mediante fitomejoramiento convencional, estuviera disponible en la actualidad, seguramente sería empleada en una superficie considerable.

## 7.2. Efecto de la presencia de únicamente soja GM en los cuatro países

Este caso se acerca a la situación actual, en la que cerca del 90% de la soja producida en la región es GM. El uso de la

semilla de soja transgénica contribuye a la sustentabilidad del cultivo en mayor medida que la semilla convencional (Brindaban *et al.* 2009). El componente negativo sería que aquellas personas que quisieran consumir derivados de soja convencional no lo podrían hacer y eso es negativo, porque se priva a consumidores de mercados nicho —que pagan un sobreprecio— de poder elegir el tipo de alimentos que desean consumir y producidos con los métodos que ellos quieren, aun cuando son sustancialmente más caros.

Ciertamente, el cultivo en la región de únicamente soja GM-RH evidenciaría los beneficios que se han mostrado a lo largo del texto. Sin embargo, nuevamente sería conveniente hacer un análisis de esa situación en un escenario de sequía, en el que los materiales de soja GM tolerantes a sequía son indispensables. En un escenario de sequía extrema, la soja GM-RH no sería de mucha utilidad, pues igual sucumbiría a la falta de humedad. En consecuencia, es urgente desarrollar e incorporar materiales de soja GM con varios eventos simultáneamente; en particular la resistencia a los herbicidas y la tolerancia a la sequía. Este tipo de eventos han sido reportados en la soja (Chan *et al.* 2010, Huang *et al.* 2010), pero no hay claridad sobre cuándo en los países del Cono Sur se podrá tener acceso comercial a tales eventos. Además, en la actualidad, solo el cultivo de maíz tolerante a la sequía está disponible comercialmente para la próxima campaña de siembra en Estados Unidos (APHIS 2011).

### 7.3. Efecto de la coexistencia del cultivo de soja GM y de soja convencional

Esta situación es la que se presenta actualmente, en que se producen ambos tipos de soja: GM-RH y convencional. Esto hace que el productor y el consumidor puedan elegir qué tipo de cultivo sembrar y qué tipo de soja consumir, respectivamente. El porcentaje del área destinada a cada tipo de soja dependerá de cuestiones económicas (la demanda, los precios y la rentabilidad de cada tipo).

Si se sigue presentando la tendencia a la sequía extrema (Agrodigital 2012), la soja convencional y la GM resistente a herbicida se comportarían de igual manera ante el rigor del fenómeno. En consecuencia, la coexistencia dependerá, en parte, de los efectos de la sequía y de la introducción de la característica de tolerancia a ella, sea mediante fitomejoramiento convencional o mediante transgénesis. En lo que compete a la resistencia a herbicida, como se señaló, la coexistencia dependerá del precio y la demanda del mercado.

# Consideraciones finales

El crecimiento de la superficie sembrada con soja en los países de la Región Sur se debe al valor económico que tiene el grano, debido a su alta demanda y a la innovación y adopción tecnológica que se viene dando en la producción de esta oleaginosa. La expansión del cultivo de la soja en los países sustentó la realización de este estudio.

La aplicación de un paquete tecnológico basado en la combinación de siembra directa, fertilización inorgánica, uso adecuado de biocidas (fungicidas, insecticidas y herbicidas), semilla de soja genéticamente modificada con resistencia a herbicidas y cosecha mecánica eficiente generan una sinergia que simplifica el sistema de producción y mejora la eficiencia en aspectos técnicos, ambientales y económicos.

El cultivo de la soja mediante el sistema de siembra directa constituye un aporte de importancia para reducir el impacto negativo del cultivo sobre el ambiente. La siembra directa es un modelo de producción que permite mejorar la eficiencia del uso del agua, disminuir la erosión hídrica y eólica y reducir el tiempo operativo del uso de la maquinaria agrícola, lo que redundaría en la disminución de GEI y genera ahorros para el productor. Sin esta técnica, muchas zonas no podrían

ser productivas o la degradación del suelo sería muy acelerada. La fertilización inorgánica, realizada con criterio técnico y de manera eficiente, es un factor que busca mantener un equilibrio entre la oferta ambiental y la productividad. El conocimiento de los balances de los nutrientes de los suelos y su manejo acertado son esenciales para mantener la productividad. La fertilización química adecuada, además de elevar los rendimientos en zonas degradadas por la gran cantidad de años que se han destinado a la agricultura, permite hacer ajustes en zonas naturalmente deficitarias que lleven al logro de buenos rendimientos. La corrección de suelos ácidos y con aluminio, como los presentes en las grandes áreas de Brasil y Paraguay, amplía la oferta de producción en suelos que, en su forma natural, no son aptos para el desarrollo de cultivos. Sin embargo, los costos de adecuación son altos, por lo que en ambos países aumentan de manera significativa los costos de producción.

La mejora genética de los materiales convencionales y la incorporación del hábito de crecimiento indeterminado en todos los grupos de madurez aumentaron el grado de plasticidad de la soja, reforzaron su adaptación a diferentes sistemas de producción y elevaron la productividad. No obstante, la introducción de semilla de soja GM fue la responsable de potenciar el cultivo en la región. Aunque los rendimientos del cultivo de la soja GM y de la convencional son equivalentes, pues la modificación genética de la resistencia a los herbicidas no afecta los componentes de rendimiento, el cultivo GM presenta claras ventajas en el manejo cultural, en particular la eficiencia y el menor costo en el control de las malezas, debido principalmente a la baja permanente en el precio del glifosato y al menor número de aplicaciones en los cultivos GM en comparación con los convencionales. Lo anterior conduce a la disminución de los costos de producción.

Ciertamente, por ser el cultivo de la soja (convencional o transgénico) un monocultivo y emplear agentes químicos, su uso causa impacto en el ambiente. El empleo del paquete tecnológico basado en semilla de soja GM-RH, que permite el control eficiente de las malezas, se constituye en la piedra angular de la disminución de los impactos negativos sobre

el ambiente, debido a la menor perturbación del suelo y a la reducción de la cantidad de herbicidas y de la frecuencia de su aplicación. Con base en la información analizada, la semilla de soja GM-RH *per se* ha hecho más eficientes los procesos culturales que redundan en un impacto ambiental menor y no ha desencadenado ningún nuevo proceso ambiental negativo. En consecuencia, con base en los resultados y los impactos obtenidos durante más de tres lustros de utilización, se puede afirmar que el cultivo de la soja GM-RH es una tecnología limpia.

La tecnología transgénica en el cultivo de la soja abre la posibilidad de incorporar nuevas moléculas de herbicidas, insecticidas y fungicidas que permitan contrarrestar el efecto negativo de las malezas, plagas y enfermedades de una manera más precisa y con menor impacto nocivo sobre el ambiente. Además, debido a la biología de la especie, existe un espacio para el desarrollo de la industria de los bioinoculantes y hacer que la fijación biológica de nitrógeno sea más eficiente.

En resumen, el paquete tecnológico integrado de siembra directa, fertilización, herbicidas y semilla de soja GM es más eficiente que la aplicación independiente de cualquiera de sus componentes. Además, el paquete tecnológico basado en soja GM genera beneficios ambientales y económicos que superan los que produce la aplicación del mismo paquete a la soja convencional.

Hoy contamos con una tecnología que permite producir con un mínimo de impacto ambiental (menos uso del agua, menor superficie, mejora de los suelos y menor contaminación) y revertir los problemas de degradación en aquellos lugares donde los hay. Sin embargo, desde el punto de vista tecnológico se requiere un mayor esfuerzo para desarrollar soja tolerante a la sequía y llevarla rápidamente al campo, pues en los países del Cono Sur actualmente el tema de debate no debe ser la producción de soja convencional o de soja GM-RH, sino la búsqueda de una solución a la imposibilidad de producir como consecuencia de la sequía extrema y, ante ese reto, la tecnología transgénica está llamada a responder de manera urgente y eficiente.



# Conclusiones

- ◆ La expansión del cultivo de la soja GM en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y su importancia a nivel mundial en los ámbitos ambiental, económico, tecnológico y social motivaron y justificaron la realización de este estudio.
- ◆ La semilla de soja GM potencia el paquete tecnológico asociado con la siembra directa y la fertilización empleado para la siembra de soja convencional. Por la facilidad en su manejo, el cultivo de la soja GM ha sido ampliamente aceptado y empleado por los productores. Durante 2011, en los cuatro países se sembraron alrededor de 40 millones de hectáreas con soja GM.
- ◆ El cultivo de la soja GM y su paquete tecnológico han generado impactos ambientales positivos en comparación con el cultivo de soja convencional. Para obtener los rendimientos actuales, el cultivo de soja convencional requiere mayor superficie y labor del suelo que el cultivo de soja GM. Además, produce mayor contaminación de aguas, aire y suelos debido al uso de diversos agroquímicos y genera una mayor contribución a la emisión de GEI.

- ◆ El cultivo de la soja GM ha generado un impacto económico positivo para los productores y los países. En la actualidad, la diferencia económica entre los costos directos del cultivo de la soja GM y de la soja convencional es de 15% en beneficio del paquete tecnológico aquí analizado.
- ◆ Los marcos regulatorios en bioseguridad de los países objeto de este estudio han generado las condiciones que garantizan que se hayan realizado los estudios correspondientes sobre los riesgos potenciales de esta tecnología para la salud humana y animal y para el ambiente.
- ◆ Aunque las modificaciones genéticas de la soja utilizadas en los países analizados se han basado fundamentalmente en la introducción de la resistencia a herbicidas, en un futuro cercano el aporte de esta tecnología permitirá la adaptación de este cultivo al cambio climático mediante la disponibilidad de semilla de soja GM tolerante a la sequía.

# Referencias

- AAPRESID (Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa, AR). 2012. Siembra directa (en línea). Consultado 21 mar. 2012. Disponible en <http://www.aapresid.org.ar/siembradirecta.asp>.
- ACB (African Center for Biosafety, ZA). 2007. Monsanto's genetically modified drought tolerant maize in South Africa. Melville, ZA. 12 p.
- Agrodigital. 2012. Reducciones de rendimiento entre el 30 y el 60% en la soja y el maíz de Argentina por la sequía (en línea). Agrodigital.com. 1 mar. 2012. Disponible en <http://www.agrodigital.com/PlArtStd.asp?CodArt=82603>.
- Álvarez, R. 2006. Balance de carbono en los suelos. Rafaela, AR, INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de Trigo Campaña 2006. Publicación Miscelánea N° 105: 36-43.
- \_\_\_\_\_; Steinbach, H; Grigera, S. 2004. Producción de rastrojos por cultivos de trigo en la Pampa Ondulada. *In VI Congreso Nacional de Trigo (2004, Bahía Blanca, AR). Actas (CD).*

- Anderson, Z. 2010. The summer of soybean (en línea). Londrina, BR, 2010 Borlaug-Ruan International Intern, The World Food Prize, EMBRAPA Soja. Consultado 23 mar 2012. Disponible en [https://worldfoodprize.org/documents/filelibrary/images/youth\\_programs/2010\\_interns/AndersonZ\\_2010BRInternReport\\_BD6C-0CF117854.pdf](https://worldfoodprize.org/documents/filelibrary/images/youth_programs/2010_interns/AndersonZ_2010BRInternReport_BD6C-0CF117854.pdf). 25 p.
- APHIS (Animal and Plant Health Inspection Service, US). 2011. Questions and answers: Monsanto drought tolerant corn - MON 87460 determination of nonregulated status. Factsheet December 2011. 1 p.
- Baumert, KA; Herzog, T; Pershing, J. 2005. Navigating the numbers: greenhouse gas data and international climate policy - Part II. Washington, DC, US, World Resources Institute. 122 p.
- Bayer, E; Gugel, KH; Haigele, K; Hagenmaier, H; Jessipow, S; König, WA; Zahner, H. 1972. Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen. Phosphinothricin und Phosphinothricinyl-Alanyl- Alanin. *Helvetica Chimica Acta* 55:224-239.
- Benachour, N; Gilles, ES. 2008. Glyphosate formulations induce apoptosis and necrosis in human umbilical, embryonic, and placental cells. *Chemical Research in Toxicology* 22:97.
- Benítez Palazzesi, C; Benítez Palazzesi, G. 2011. Mecanismos de acción de los herbicidas. Resistencia, tolerancia y cultivos resistentes (en línea). Consultado 25 mar. 2012. Disponible en <http://www.engormix.com/MA-agricultura/soja/articulos/herbicidas-preemergentes-t3250/415-p0.htm>.
- Bindraban, PS; Franke, AC; Ferrar, DO; Ghera, CM; Lotz, LAP; Nepomuceno, A; Smulders, MJM; Wiel, CCM van de. 2009. GM-related sustainability: agroecological impacts, risks and opportunities of soy production in Argentina and Brazil (en línea). Wageningen, NL, Plant Research International. Consultado 22 mar. 2012. Dis-

ponible en <http://gmsoydebate.global-connections.nl/sites/gmsoydebate.global-connections.nl/files/library/2009%20WUR%20Research%20Report%20GM%20Soy.pdf>. Informe 259.

Bordoli, JM. 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 289-297.

Bragagnolo, N. 1995. Manual integrado de prácticas conservacionistas. Santiago, CL, FAO, Proyecto Regional GCP/RLA/107/JPN. 128 p.

Brookes, G; Barfoot, P. 2011. Focus on Yields - Biotech crops: evidence of global outcomes and impacts 1996-2009 (en línea). Consultado 22 mar. 2012. Disponible en <http://pgeconomics.co.uk/>.

Burney, JA; Davis, SJ; Lobell, DB. 2010. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(26):12052-12057.

Calegari, A. 2001. Uso de abonos verdes y rotación de cultivos en el sistema de siembra directa. *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 365-386.

CAS (Consejo Agropecuario del Sur, CL); IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, CL). 2010. Marcos regulatorios de bioseguridad y situación de las aprobaciones comerciales de organismos genéticamente modificados en los países del Consejo Agropecuario del Sur, CAS. 2 ed. Santiago, CL, IICA, CAS, REDPA. 82 p.

Catarious, D; Espach, RH. 2009. Impactos de cambio climático en la seguridad nacional y regional de Colombia. Alexandria, US, CNA.

Celeres 2011. Biotechnology report (en línea). Consultado 23 mar. 2012. Disponible en <http://www.celeres.com.br>

- Chan, LR; Gonzalez, DH; Dezar, CA; Gago, G. 2010. Transcription factor gene induced by water deficit conditions and abscisic acid from *Helianthus annuus*, promoter and transgenic plants. United States Patent No. 7,674,955 B2; date of issue: March 9, 2010.
- Christou, P; McCabe, DE; Swain, WF; Martinell, BJ. 1991. Particle-mediated transformation of soybean plants and lines. United States Patent No. 5,015,580; date of issue: May 14, 1991.
- CIAFA (Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos, AR). 2012. Nuestros asociados (en línea). Consultado 23 mar. 2012. Disponible en <http://www.ciafa.org.ar/asociados.htm>.
- Colozzi Filho, A; Souza Andrade, D de; Balota, EL. 2001. Comunidad microbiana en suelos en siembra directa. *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. P. 407-418.
- Conforto, C; Correa, OS; Rovea, A; Boxler, M; Rodríguez, S; Mintegulaga, J; Meriles, J; Vargas, S. 2012. Influencia de la fertilización inorgánica sobre la actividad microbiana del suelo. *In* Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (19, 2012, Mar del Plata, AR), Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (23, 2012, Mar del Plata, AR). En prensa.
- Cristaldo, D. 2012. Sequía recorta producción de soja en Paraguay, amenaza economía 2012 (en línea). Escrito por Desantis D. Reuters América Latina. 10 de enero de 2012. Consultado 22 mar. 2012. Disponible en <http://lta.reuters.com/article/businessNews/idLTASIE8090HD20120110?sp=true>.
- Dabalá, L. 2009. Guía de la siembra directa. Montevideo, UY, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. 47 p.
- De Ronde, JA; Cress, WA; Krüger, GHJ; Strasser, RJ; Van Staden, J. 2004. Photosynthetic response of transgenic soybean plants, containing an Arabidopsis P5CR gene,

during heat and drought stress. *Journal of Plant Physiology* 161(11):1211-1224.

\_\_\_\_\_; Laurie, RN; Caetano, T; Greyling, MM; Kerepesi, I. 2004. Comparative study between transgenic and non-transgenic soybean lines proved transgenic lines to be more drought tolerant *Euphytica* 138(2):123-132.

Del Río, J. 2012. Análisis comparativo de costos de la soja convencional y genéticamente modificada para Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Buenos Aires, AR, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, IICA. Reporte de consultoría.

Dellaferra, I; Guarise, N; Amsler, A. 2007. Relevamientos de la maleza en cultivos de soja en sistema de siembra directa con glifosato en el departamento de San Justo (provincia de Santa Fe). *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 5/6(1-2):15-25.

Díaz-Rossello, R. 2001. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. 450 p.

DISME/INMET (Distrito de Meteorología/Instituto Nacional de Meteorología, BR); CPPMet/UFPEL (Centro de Pesquisas e Provisões Meteorológicas/Universidade Federal de Pelotas, BR). 2012. Boletim climático abril-maio-junho (2012) Estado do Rio Grande do Sul. Año 10(3):1-6.

DNM (Dirección Nacional de Meteorología, UY); UR (Universidad de la República, UY). 2011. Perspectivas climáticas para el trimestre diciembre 2011-febrero 2012 en Uruguay. 3 p.

Donn, G. 1998. Method of improving the yield of herbicide resistant crop plants. United States Patent No. 5,739,082; date of issue: April 14, 1998.

Edmeades, GO. 2008. La tolerancia a la sequía en el maíz: una realidad emergente. Ithaca, NY, US, ISAAA. ISAAA Brief 39.

- EFSA (European Food Safety Authority, IT). 2004. Opinion of the Scientific Panel on Genetically Modified Organisms on the use of antibiotic resistance genes as marker genes in genetically modified plants (Question N° EFSA-Q-2003-109) (en línea). The EFSA Journal 48:1-18. Consultado 25 mar. 2012. Disponible en <http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/48.pdf>.
- Ekboir, J. 2001. Sistemas de innovación y política tecnológica: siembra directa en el MERCOSUR. *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 1-18.
- El-Sharkawy, MA. 1993. Drought-tolerant cassava for Africa, Asia and Latin America. *BioScience* 43(7):441-451.
- Engormix. 2012. Compra y venta de productos y servicios. Agricultura: Biofertilizantes y sustratos (en línea). Consultado 22 mar. 2012. Disponible en [http://www.engormix.com/agricultura\\_biofertilizantes\\_sustratos\\_s\\_list\\_prod\\_AGR-195.htm](http://www.engormix.com/agricultura_biofertilizantes_sustratos_s_list_prod_AGR-195.htm).
- EPA (Environmental Protection Agency, US). 1993a. Glyphosate. R.E.D. Facts. EPA-738-F-93-011.
- \_\_\_\_\_. 1993b. Pesticide fact sheet glufosinate ammonium. {microform} : "EPA 730-F-93-007".
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, CL). 2011. Análisis del estado de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe. Boletín trimestral No. 1 (enero-marzo) (en línea). Santiago, CL, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Consultado 12 mar. 2012. Disponible en [http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/fao/boletin\\_fao\\_trim\\_01.pdf](http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/fao/boletin_fao_trim_01.pdf). 11 p.
- \_\_\_\_\_. 2012. FAOSTAT (en línea). Roma, IT, Statistics Division of FAO. Consultado 10 dic. 2011. Disponible en <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
- Faroni, LRA; Alencar, ER; Paes, JL; Costa, AR; Roma, RCC. 2009. Soybean storage in bag type silos (Armazena-

mento de soja em silos tipo bolsa). Engenharia Agrícola 29(1):91-100.

- Ferreras, I; Magra, G; Besson, P; Kovalevski, E; García, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. Ciencias del Suelo (Argentina) 25(2):159-172.
- Filho, AC; Andrade, D; Balota, EL. 2001. Comunidad microbiana en suelos en siembra directa. In Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 407-418.
- Foloni, LL. 2001. Impacto sobre o medio ambiente plantio direto. In Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 19-42.
- Fontaneto, H; Keller, O. 2001. Efecto de diferentes secuencias de cultivos en siembra directa continua. In Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 269-273.
- Formento, N. 2004. Roya de la soja (*Phakopsora pachyrhizi*) en la mesopotamia argentina (en línea). 6 p. Consultado 25 mar. 2012. Disponible en <http://www.agro.uba.ar/sites/default/files/catedras/formento.pdf>.
- Galantini, JA; Suñer, L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. Agriscientia 25(1):41-55.
- García, FO; Boxler, M; Minteguiaga, J; Pozzi, R; Firpo, L; Deza Marín, G; Berardo, A. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: resultados y conclusiones de los primeros seis años. Buenos Aires, AR, AACREA. 32 p.
- \_\_\_\_\_; Fabrizio, KP. 2001. Dinámica del nitrógeno en ecosistemas agrícolas: efectos de la siembra directa. In Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 299-322.

- Gazziero, DLP; Adegas, FL; Prete, CEC; Ralisch, R; Guimaraes, MF. 2001. As plantas daninhas e a semeadura direta. Londrina, BR, Embrapa soja. 59 p.
- Giorda, LM; Baigorri, HEJ. 1997. El cultivo de la soja en Argentina, Capítulo 2, Ecofisiología del cultivo. Buenos Aires, AR, Ed. Editar.
- GMO Compass. 2006. Antibiotic resistance genes: a threat? (en línea). Consultado 29 feb. 2012. Disponible en: [http://www.gmo-compass.org/eng/safety/human\\_health/46.antibiotic\\_resistance\\_genes\\_threat.html](http://www.gmo-compass.org/eng/safety/human_health/46.antibiotic_resistance_genes_threat.html).
- Goldman, IL; Carter, TE; Patterson, RP. 1989. Differential genotypic response to drought stress and subsoil aluminum in soybean. *Crop Science* 29(2):330-334.
- González, D. 2012. Soja con mayor competitividad a pasos de ser liberada en Paraguay (en línea). Diario 5 días, Asunción, PY, feb. 1. Consultado 1 feb. 2012. Disponible en <http://www.5dias.com.py/11677-soja-con-mayor-competitividad-a-pasos-de-ser-liberada-en-paraguay>.
- Gosal, SS; Wani, SH; Kang, MS. 2009. Biotechnology and drought tolerance. *Journal of Crop Improvement* 23(1):19-54.
- Grümberg, B; Conforto, C; Pérez, C; Rovea, A; Boxler, M; Rodríguez, S; Mintegulaga, J; Luna, C; Meriles, J; Vargas, S. 2012. La fertilización orgánica y los hongos micorrízicos en el cultivo del maíz. *In* Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (19, Mar del Plata, AR), Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (23, Mar del Plata, AR). En prensa.
- Holmstrom, KO; Mantylia, E; Welin, B; Mandal, A; Palva, ET; Tunnela, OE; Londesborough, J. 1996. Drought tolerance in tobacco. *Nature* 379:683-684.
- Huang, Y; Chalifoux, M; Wang, Y; Kuzma, MM; Gilley, AP. 2010. Compositions and methods of increasing stress tolerance in plants. United States Patent No. 7,786,354 B2; date of issue: August 31, 1990.

- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, UY); PROCISUR (Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur, UY). 2010. LOTASSA: un puente entre la genómica y las pasturas del siglo XXI. Montevideo, UY. 71 p.
- ILSI Research Foundation. 2011. A review of the environmental safety of the PAT protein. Washington D.C., US, Center for Environmental Risk Assessment, ILSI Research Foundation. 21 p.
- James, C. 2010. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2010. Ithaca, NY, US, ISAAA. ISAAA Brief No. 42. 279 p.
- \_\_\_\_\_. 2011. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2011. Ithaca, NY, US, ISAAA. ISAAA Brief No. 43. 29 p.
- Kantolic, AG; Carmona, MA. 2006. Bases ecofisiológicas de la generación de rendimiento: relación con el efecto de las enfermedades foliares y el uso de fungicidas en el cultivo de soja. Buenos Aires, AR, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 24 p.
- Kaskey, J. 2010. Monsanto will let bio-crop patents expire, genetically engineered soybeans will go generic, but woe to anyone that crosses the seed giant on new products (en línea). Bloomberg Businessweek Magazine. Ene. 2010. Consultado 12 mar. 2012. Disponible en [http://www.businessweek.com/magazine/content/10\\_05/b4165019364939.htm](http://www.businessweek.com/magazine/content/10_05/b4165019364939.htm).
- Kavi Kishor, PBK; Hong, Z; Miao, GH; Hu, CAA; Verma, DPS. 1995. Overexpression of [ $\delta$ ]-pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. *Plant Physiology* (108)4:1387-1394.
- Manavalan, LP; Guttikonda, SK; Phan Tran, LS; Nguyen, HT. 2009. Physiological and molecular approaches to

improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology* 50(7):1260-1276.

Manning, PM; Popp, MP; Keisling, TC; Ashlock, LO; Dombek, DG. 2003. Comparison of yield potential and herbicide program cost between herbicide-resistant and conventional soybean. *Journal of Plant Nutrition* 26(4): 915-934.

Marelli, HJ. 2001. El agua y la siembra directa. *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 259-268.

Martino, DL. 2001a. Secuestro de carbono atmosférico ¿un nuevo ingreso para los agricultores del Cono Sur? *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p.56-66.

\_\_\_\_\_. 2001b. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. *In* Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 225-257.

McDougall, P. 2010. The cost of new agrochemical product discovery, development & registration and research & development predictions for the future. Pathhead, Midlothian, UK, s.e. 22 p.

\_\_\_\_\_. 2011. The cost and times involved in the discovery, development and authorisation of a new plant biotechnology derived trait. A consultancy study for Crop Life International. Pathhead, Midlothian, UK, s.e. 24 p.

Meriles, JM; Vargas, S; Conforto, C; Figoni, G; Lovera, E; March, GJ; Guzmán, CA. 2009. Soil microbial communities under different soybean cropping systems: characterization of microbial population dynamics, soil microbial activity, microbial biomass, and fatty acid profiles. *Soil & Tillage Research* 103:271-281.

Micucci, FG; Toaboda, MA. s. f. El agua en los sistemas extensivos II. Consumo y eficiencia de uso del agua de los

cultivos. s.l., INPOFOS Cono Sur, Cátedra de Fertilidad de Suelos, FAUBA, INTA Castelar.

- Mitra, J. 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Current Science* 80(6): 758-763.
- Moron, A. 2001. El rol de los rastros en la fertilidad del suelo. In Díaz-Rossello, R. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, UY, PROCISUR. p. 387-405.
- Murray, JD; Karas, BJ; Sato, S; Tabata, S; Amyot, L; Szczyglowski, K. 2007. A cytokinin perception mutant colonized by *Rhizobium* in the absence of nodule organogenesis. *Science* 315(5808):101-104.
- Myers, N; Mittermeier, RA; Mittermeier, CG; Fonseca, GAB da; Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 404:853-855.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, FR). 2012. Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050: consecuencias de la inacción (en línea). París, FR. Consultado 25 mar. 2012. Disponible en [www.oecd.org/environment/outlookto2050](http://www.oecd.org/environment/outlookto2050).
- Oldroyd, GED. 2007. Nodules and hormones. *Science* 315(5808):52-53.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2012. Central Portal of Biosafety Clearing House (en línea). Consultado 10 dic. 2011. Disponible en <http://bch.cbd.int>.
- Oya, T; Nepomuceno, AL; Neumaier, N; Boucas Farias, JR; Tobita, S; Ito, O. 2004. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars - evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. *Plant Production Science* 7(2):129-137.
- Papa, JC. 2010. Malezas en cultivos extensivos: nuevos problemas o viejos problemas en un contexto novedoso (en línea). s.n.t. Consultado 20 mar. 2012. Disponible en

<http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/06/MALEZAS-EN-CULTIVOS-EXTENSIVOS-NUEVOS-PROBLEMAS-O-VIEJOS-PROBLEMAS-EN-UN-CONTEXTO-NOVEDOSO.pdf>.

Pasten, M; Vásquez, R. 2012. Pronóstico climatológico abril-junio 2012. Perspectivas climáticas para el trimestre diciembre 2011-febrero 2012 en Paraguay. s.n.t. 6 p.

Pei, ZM; Ghassemian, M; Kwak, CM; McCourt, P; Schroder, JI. 1998. Role of farnesyltransferase in ABA regulation of guard cell anion channels and plant water loss. *Science* 282:287-290.

Quintana, GJR; Sasovsky, CA. 2006. Control químico de roya asiática de la soja y enfermedades de fin de ciclo en la región sudoeste de la provincia del Chaco. *In Congreso Mercosoja 2006 (2006, Rosario, AR). Memorias.* p. 382-387.

Ramírez, R; Taboada, MA; Gil, R. 2006. Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un argiudol típico de la pampa ondulada argentina. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía - Medellín* 59(1):3237-3256.

Rocha, PJ. 2011. Agro-bio-tecnologías: herramientas bio-lógicas al servicio de la agricultura. *ComunIICA* 8 (enero-julio):22-31.

Romero, C; Belles, JM; Vaya, JL; Serrano, R; Culianez-Macia, FA. 1997. Expression of the yeast trehalose-6-phosphate synthase gene in transgenic tobacco plants: pleiotropic phenotypes include drought tolerance. *Planta* 201(3):293-297.

Rosenow, DT; Quisenberry, JE; Wendt, CW; Clark, LE. 1983. Drought tolerant sorghum and cotton germplasm. *Agricultural Water Management* 7(1-3):207-222.

Rovea, A. 2012. Estudio comparativo de la soja convencional y la genéticamente modificada para Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. *Evolución y agronomía.* Buenos

Aires, AR, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, IICA. Reporte de consultoría.

Samora, R. s.f. Brasil planea desarrollar soja transgénica resistente a sequía (en línea). Consultado 25 mar. 2012. Disponible en [http://webs.chasque.net/~rapaluy1/transgenicos/Soja/soja\\_sequia.html](http://webs.chasque.net/~rapaluy1/transgenicos/Soja/soja_sequia.html).

Shah, D; Rogers, SG; Horsch, RB; Fraley, RT. 1990. Glyphosate resistant plants. United States Patent No. 4,940,835; date of issue: July 10, 1990.

Sheveleva, E; Chmara, W; Bohnert, HJ; Jensen, R. 1997. Increased salt and drought tolerance by d-ononitol production in transgenic *Nicotiana tabacum* L. Plant Physiology 115(3):1211-1219.

Schuette, J. 1998. Environmental fate of glyphosate (en línea). Consultado 23 mar. 2012. Disponible en <http://www.cdpr.ca.gov/docs/emon/pubs/fatememo/glyphos.pdf>.

Sloane, RJ; Patterson, RP; Carter, TE. 1990. Field drought tolerance of a soybean plant introduction. Crop Science 30(1):118-123.

SMN (Servicio Meteorológico Nacional, AR). 2012. Boletín de tendencias climáticas 2012. Boletín de vigilancia del clima y sus tendencias en la Argentina. Ed. MM Skansi. 18(3):1-11.

Snoo, GR de; Jong, FMW de; Poll, RJ van der; Linden, MGAM van der. 2001. Effects of glufosinate-ammonium on off crop vegetation. Interim results. Meded Rijksuniv Gent Fak Landbouwkde Toegep Biol Wet 66(2b):731-741.

\_\_\_\_\_; Tamis, WLM; Brink, PJ van de (Poll, RJ van der; Jong, FMW de; Linden, MGAM van der; Hooft, P van; Hoeven, N van der). 2005. Non target plant field study: effects of glufosinate-ammonium on off crop vegetation. Leiden, NL, Leiden University, Institute of Environmental Sciences (CML). 114 p. CML report 161.

Sternberg, T. 2011. Regional drought has a global impact. *Nature* 472:169.

Tirichine, L; Sandal, N; Madsen, LH; Radutoiu, S; Albrektsen, AS; Sato, S; Asamizu, E; Tabata, S; Stougaard, J. 2007. A gain-of-function mutation in a cytokinin receptor triggers spontaneous root nodule organogenesis. *Science* 315(5808):104-107.

Trigo, E. 2011. Quince años de cultivos genéticamente modificados en la agricultura argentina (en línea). Buenos Aires, AR, ArgenBio. Consultado 20 mar. 2012. Disponible en [http://www.argenbio.org/adc/uploads/15\\_anos\\_Estudio\\_de\\_cultivos\\_GM\\_en\\_Argentina.pdf](http://www.argenbio.org/adc/uploads/15_anos_Estudio_de_cultivos_GM_en_Argentina.pdf). 52 p.

USDA (United States Department of Agriculture); CSREES (Cooperative State Research, Education, and Extension Service). 2012. Alerta nacional de plagas: la roya de la soya (habichuela soya, soja) *Phakospora pachyrhizi* y *P. meibomia* (en línea). s.l., USDA-CSREES Integrated Pest Management Centers, National Plant Diagnostic Network, APHIS, ARS. Consultado 25 mar. 2012. Disponible en [http://www.ncipmc.org/alerts/soybeanrust/alerta\\_nacional.pdf](http://www.ncipmc.org/alerts/soybeanrust/alerta_nacional.pdf)

Villalobos, VM. 2011. Los transgénicos: oportunidades y amenazas. 2 ed. México, MX, Editorial Mundi Prensa. 108 p.

*Impreso en la Imprenta del IICA  
Sede Central, San José, Costa Rica  
Tiraje: 500 ejemplares*

