



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



TESIS DE GRADO
Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE SOJA EN ARGENTINA.

**Análisis crítico del desempeño ambiental de la
biomasa energética en zonas extra-pampeanas.**

Tesista: **Ivana Di Paola**
Directora: **Dra. Roxana Piastrellini**
Codirectora: **Dra. Bárbara Civit**

Grupo de investigación CLIOPE – UTN, FRM. Observatorio Meteorológico

Carlos Thays s/nº, Parque General San Martín, Ciudad de Mendoza (5500), Mendoza, Argentina.
grupocliope@gmail.com

Luján de Cuyo, Mendoza, Noviembre 2018

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE SOJA EN ARGENTINA.

Análisis crítico del desempeño ambiental de la biomasa energética en zonas extra-pampeanas.

Tesista: **Ivana Di Paola**

Joaquín V. González 1350, Godoy Cruz, Mendoza.
ivanadipaola@gmail.com

Directora: **Dra. Roxana Piastrellini**

Codirectora: **Dra. Bárbara Civit**

Comité Evaluador:

Ing. Curadelli, Silvia

Ing. Funes Pinter, Iván

Ing. Rébora, Cecilia

DEDICATORIA

A Federico, mi compañero de todos los días.

A Juana, por enseñarme a amar y perseverar.

RESUMEN

El siguiente trabajo tiene por objetivo estudiar el desempeño ambiental y energético de la producción de biodiesel de aceite de soja en regiones productivas no convencionales de Argentina. Para ello se consideraron cuatro zonas de estudio: las provincias de Tucumán, Salta y Santiago del Estero ubicadas en la Región del Noroeste argentino, y la provincia de Mendoza localizada en la Región de Cuyo. Se utilizó el análisis de ciclo de vida como metodología, entendiendo que es una de las herramientas más utilizadas para estudiar los impactos ambientales asociados a la producción de biocombustibles, y que además se encuentra estandarizada a nivel internacional. Se evaluaron dos indicadores: Tasa de retorno de energía y Potencial de calentamiento global. Los resultados obtenidos fueron comparados con el desempeño ambiental y energético reportado para el biodiesel de soja producido en la zona sojera y aceitera por excelencia, es decir la Región Pampeana. En las cuatro localidades estudiadas la producción de biodiesel de soja presenta un balance de energía negativo. En cuanto a la potencial disminución de gases de efecto invernadero con respecto al diesel fósil, los resultados son poco alentadores para la Región de Cuyo. Se concluye que la producción de biodiesel de soja en áreas extra-pampeanas no resulta sostenible desde el punto de vista ambiental.

PALABRAS CLAVES: biocombustibles, análisis de ciclo de vida, emisiones de gases de efecto invernadero, análisis energético, expansión agrícola.

AGRADECIMIENTOS

A mi Directora, la Dra. Roxana Piastrellini, por acompañar este último tramo brindándome todo su conocimiento y su infinita paciencia, por ser una excelente profesional pero mejor persona.

A mis padres, porque con su esfuerzo y perseverancia me ayudaron a llegar hasta acá.

A mis hermanos, por ser mi apoyo y sostén en momentos donde más los necesite.

A Federico y a Juana, por ser mi familia, mis amigos, mis compañeros, los amores de mi vida.

A todos los profesores de la Universidad, que inspiran todos los días a sus alumnos a avanzar y a ser buenos profesionales.

Gracias.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES Y MARCO CONCEPTUAL	14
1.1. Definiciones y generalidades	14
1.2. Los biocombustibles en el contexto mundial	15
1.3. La situación de los biocombustibles en Argentina	17
1.4. Problemáticas asociadas a los biocombustibles	18
CAPÍTULO 2: EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SU APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE SOJA	20
2.1 El pensamiento de ciclo de vida	20
2.2. Definición y fases del Análisis de Ciclo de Vida.....	21
2.4.2. Impactos ambientales.....	26
2.4.2.1. Balance de energía	26
2.4.2.2. Gases de efecto invernadero y potencial de calentamiento global.....	26
CAPÍTULO 3: PROCESO PRODUCTIVO DEL BIODIÉSEL DE SOJA	28
3.1. Etapa agrícola	28
3.1.1. Distribución del cultivo de soja en Argentina.....	28
3.1.2 Regiones de estudio	33
3.1.2.1- Tucumán	33
3.1.2.2-Salta.....	34
3.1.2.3-Santiago del Estero	36
3.1.2.4-Mendoza.....	37
3.1.3 Rendimiento del cultivo	39
3.1.4. Labores agrícolas	40
3.1.5. Consumo de combustible y energía.....	43
3.1.6. Transporte de insumos y materias primas.....	44
3.1.7. Ocupación del suelo	45
3.1.8. Emisiones a la atmósfera	46
3.1.9. Emisiones al agua.....	47
3.1.10 Uso de agua de riego	47
3.2. Etapa industrial	48

3.2.1. Acondicionamiento del grano de soja	48
3.2.2. Extracción y refinado de aceite de soja	49
3.2.3. Síntesis del biodiésel de soja.....	52
3.2.4. Transporte de materias primas e insumos	53
3.2.5. Efluentes industriales	56
CAPÍTULO 4: IMPACTOS AMBIENTALES DEL BIODIÉSEL DE ACEITE DE SOJA PRODUCIDO EN ARGENTINA	57
4.1 Análisis energético.....	58
4.1.1 Provincias productoras de soja: Tucumán, Santiago del Estero y Salta	59
4.1.2 Provincia de Mendoza	65
4.1.3 Situación respecto a la Región Pampeana	68
4.2 Potencial de emisión de gases de efecto invernadero	71
4.2.1 Provincias productoras de soja: Tucumán, Santiago del Estero y Salta	73
4.2.2 Provincia de Mendoza	74
4.2.3 Situación respecto a la Región Pampeana	75
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS	78
ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de plantas aceiteras, de biodiesel y de bioetanol. Fuente: Subsecretaría de Información y Estadística Pública (2017).....	17
Figura 2:Producción de biodiesel en toneladas. Fuente: INDEC 2017	18
Figura 3: ilustración de las etapas de un ACV. Extraído de "Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario" en Contribuciones a la Economía, 2005.	21
Figura 4:Estructura del Análisis de Ciclo de Vida. ISO 14040:2006	22
Figura 5: Esquema representativo de posibles alcances del Análisis de Ciclo de Vida de un producto. Fuente: Piastrellini (2015).....	23
Figura 6: Diagrama de flujo simplificado del ciclo de vida del biodiésel de soja, para un sistema “de la cuna a la puerta”, considerando las tecnologías más difundidas en Argentina. Extraído de Piastrellini (2015).....	25
Figura 7: Superficie sembrada con soja en Argentina. Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones. SAGyP (2017)	30
Figura 8: Región Pampeana Argentina. Fuente: Área pampeana: subregiones y usos predominantes del suelo. http://tierraadentrogeo.blogspot.com/2009/07/el-area-pampeana-y-el-area.html	30
Figura 9: La expansión de la soja en Argentina. Instituto de Geografía, Universidad de Buenos Aires (2010)	32
Figura 10: Regiones de estudio.....	33
Figura 11: Provincia de Tucumán. Fuente: http://mapoteca.educ.ar/files/index.html.1.8.html . ..	34
Figura 12: Provincia de Salta, puede observarse el departamento de Anta y la localidad Las Lajitas. Fuente: elaboración propia en base a http://mapoteca.educ.ar/files/index.html.1.2.html	35
Figura 13: Provincia de Santiago del Estero, departamento de Belgrano, localidad de Bandera. Fuente: Elaboración propia en base a http://mapoteca.educ.ar/files/wp-content/mapas/santiago-del-estero/politico/impresion/santiago-del-estero_politico.jpg?dl	37
Figura 14: Provincia de Mendoza, área de estudio, Santa Rosa. Fuente: http://www.ambiente.mendoza.gov.ar/organismos/ordenamiento-territorial/agencia-provincial-de-ordenamiento-territorial/siat/mapas-siat/	39
Figura 15: Esquema del proceso de secado y acondicionamiento del grano, y del proceso de extracción y refinado de aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015)	51
Figura 16: Reacción de transesterificación. R: radical alquilo. Fuente: Piastrellini (2015).....	52
Figura 17: Esquema de obtención de biodiesel de soja por transesterificación alcalina. Fuente: Piastrellini (2015).	53
Figura 18: Índice EROI de las provincias de Santiago del Estero, Salta, Tucumán.	59
Figura 19: Demanda energética del cultivo de soja en la provincia de Tucumán.	60
Figura 20: Demanda energética en la etapa agrícola del cultivo de soja. Provincia de Tucumán.	60
Figura 21: Demanda de energía para la producción de biodiesel en la provincia de Santiago del Estero.	61
Figura 22: Demanda energética de la etapa agrícola de la producción de biodiesel de soja en Santiago del Estero.....	62

Figura 23: Demanda energética de la producción de biocombustible en la provincia de Salta...	62
Figura 24: Demanda energética del cultivo de soja en su fase de producción en la provincia de Salta.	63
Figura 25: Comparación de la demanda energética en la etapa de producción de grano en las provincias de Salta, Santiago del Estero y Tucumán.	63
Figura 26: Demanda energética del transporte de grano durante el proceso de síntesis de biodiesel, para las provincias de Tucumán, Salta y Santiago del Estero.....	64
Figura 27: Demanda energética del transporte de insumos en la fase de producción de grano para la elaboración de biodiesel en Salta, Tucumán y Santiago del Estero.....	64
Figura 28: Demanda de energía y combustibles por las provincias de Salta, Santiago del Estero y Tucumán.	65
Figura 29: Demanda de energía en el Sist_1 de Mendoza.	66
Figura 30: Demanda de energía en Sist_2 de Mendoza.	66
Figura 31: Demanda de energía en sistema 1 y sistema 2 de Mendoza.....	67
Figura 32: Demanda de energía y combustible en Mendoza.	67
Figura 33: Demanda energética del transporte de grano y de insumos en ambos sistemas de Mendoza.	68
Figura 34: demanda energética en la etapa agrícola de Salta, Santiago del Estero, Tucumán y Región Pampeana. SD-SP: siembra directa-soja primera. SD-SP-RS: siembra directa-soja primera con riego suplementario.	69
Figura 35: Demanda energética asociada al transporte de insumos en los distintos sistemas analizados. SD-SP: siembra directa-soja primera. SD-SP-RS: siembra directa-soja primera con riego suplementario.	69
Figura 36: Demanda energética asociada a la energía y combustibles utilizados en los cinco sistemas analizados. Elaboración propia. SD-SP: siembra directa-soja primera. SD-SP-RS: siembra directa-soja primera con riego suplementario.....	70
Figura 37: Potencial de calentamiento global de los sistemas analizados.	71
Figura 38: Potencial de calentamiento global de la etapa agrícola, para cada sistema estudiado.	71
Figura 39: Contribución de distintos GEI al Potencial de calentamiento global de la etapa agrícola de la producción de biodiesel de soja.	72
Figura 40: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Santiago del Estero.	73
Figura 41: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Salta.	74
Figura 42: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Tucumán.....	74
Figura 43: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Mendoza sist_1.....	75
Figura 44: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Mendoza sist_2.....	75
Figura 45: Potencial de calentamiento global de la producción de biodiesel de soja en las provincias de Salta, Santiago del Estero, Tucumán, Mendoza y Región Pampeana en secano.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rendimientos del grano de soja para cada sistema productivo estudiado	40
Tabla 2: Resultados de inventario para la cantidad de semilla sembrada según el sistema productivo adoptado	41
Tabla 3: Resultado de inventario para la cantidad de fertilizantes utilizados según el sistema estudiado.	41
Tabla 4: Resultados de inventario para el uso de agroquímicos en los sistemas estudiados.	43
Tabla 5: Resultados de inventario de combustible y energía consumidos en los distintos sistemas productivos de soja	44
Tabla 6: Resultados de inventario del transporte de fertilizantes, fungicidas, pesticidas y semillas para cada sistema productivo considerado	45
Tabla 7: Resultados de inventario para transformación de suelo en tierras de cultivo.....	45
Tabla 8: Resultados de inventario de las emisiones de NH ₃ y NOX a la atmosfera, según diferentes sistemas agrícolas.....	46
Tabla 9: Resultados de inventario de las emisiones de NO ₃ - y PO ₄ ³⁻ al agua, según diferentes sistemas agrícolas.	47
Tabla 10: resultado del uso de agua de riego en las provincias estudiadas.	47
Tabla 11: Resultados de inventario del proceso de secado y acondicionamiento del grano. Fuente: Piastrellini (2015).	49
Tabla 12: Resultados de inventario de insumos y materias primas correspondientes al proceso de extracción de aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13: Resultados de inventario de materias primas e insumos utilizados durante el proceso de transesterificación del aceite de soja.	52
Tabla 14: Distancia desde la zona de producción del grano de soja a la planta productora de biodiesel.....	54
Tabla 15: Resultados de inventario para el transporte de materias primas e insumos de la etapa industrial.....	55
Tabla 16: Resultados de inventario de los efluentes líquidos industriales generados durante la producción de biodiesel a partir de aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015).	56
Tabla 17: Demanda energética asociada al transporte de grano para las provincias de Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Región Pampeana.	70

INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization, 2004) los biocombustibles se emplean principalmente en el sector transporte, en estado puro o en mezclas con combustibles fósiles, denominándose en este caso “biocarburantes”. Los biocarburantes de mayor aceptación y desarrollo son el biodiesel derivado de aceites vegetales y el bioetanol producido a partir de cereales y caña de azúcar, los cuales han logrado integrarse en los sistemas logísticos de transporte existentes. A pesar de que los biocombustibles pueden elaborarse a partir de diferentes tipos de biomasa, la materia prima por excelencia son los cultivos energéticos, siendo el maíz, el trigo, la caña de azúcar, la colza, la soja y el girasol los mayores exponentes a nivel mundial.

Argentina ocupa actualmente el puesto número cuatro en el ranking de países productores de biocombustibles y también de países productores de biodiesel (REN21, 2017). La totalidad del biodiesel argentino se elabora a partir de aceite de soja. Esta situación se ve favorecida por la consolidación del complejo sojero en el mercado internacional, lo que brinda la posibilidad de agregar valor y diversificar la matriz exportadora (Araujo et al. en prensa). La soja destinada a producir biodiesel se cultiva completamente en la Región Pampeana, situada en el centro-este del país, ya que esta región alberga el principal centro de producción de aceite vegetal y biodiesel de Argentina y cuenta con una infraestructura específica para la exportación a través de la hidrovía Paraná-Uruguay (Piastrellini et al., 2017). Sin embargo, en los últimos años ha crecido el interés por producir biocombustibles en otras regiones del país, evidenciándose con la instalación de plantas productoras de biocombustibles en San Luis, Neuquén, Santiago del Estero, Salta y Jujuy. Esta situación induce la posibilidad de que estas nuevas plantas productoras de biocombustibles se abastezcan en un futuro de biomasa energética cultivada en regiones extra-pampeanas.

Numerosos estudios sobre Análisis de ciclo de vida (ACV) de biocombustibles demuestran que los incrementos en los niveles de productividad podrían estar asociados con aumentos de la energía fósil requerida para la producción del biocombustible, ocasionando modificaciones en el balance de energía (Cherubini y Jungmeier, 2010; Zah et al., 2007; Cowie et al., 2006; Quirin et al., 2004). El balance de energía está determinado por la relación entre la energía contenida en el biocombustible y la energía fósil requerida para su producción y distribución. En consecuencia, dicho balance resultará positivo en menor o mayor grado dependiendo del rendimiento del cultivo energético, las dosis y tipos de agroquímicos aplicados, la necesidad de riego, la eficiencia de conversión, los insumos requeridos para el procesamiento de la materia prima y los coproductos obtenidos. Por otro lado, la expansión de los cultivos energéticos hacia áreas naturales, y en especial hacia ecosistemas boscosos, podría ocasionar importantes pérdidas en el stock de C del suelo, desmejorando el balance GEI de los biocombustibles (Piastrellini et al., 2014; Kwon et al., 2013; Arena et al., 2010; Searchinger et al., 2008) incluso hasta alcanzar peores niveles que los combustibles fósiles (Panichelli et al., 2009; Reijnders y Huijbregts, 2008). No se dispone aún de trabajos que evalúen la factibilidad energética y ambiental en el ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir de soja cultivada en estas regiones.

HIPOTESIS Y OBJETIVOS

La producción de biocombustibles demanda una importante cantidad de recursos tales como suelo, agua y energía. Estos recursos no siempre se encuentran disponibles en el sitio de producción por lo que deben ser suplidos desde otras regiones, condicionando la sustentabilidad de los procesos y productos obtenidos. Por ello, se afirma que si el cultivo de soja se sitúa en

regiones altamente dependientes de flujos externos, la producción de biodiesel no es sustentable desde el punto de vista energético-ambiental. Esto es así porque la producción de biomasa es un eslabón crítico en toda la cadena de producción del biocombustible. De esta forma, queda enunciada la hipótesis de trabajo.

El objetivo de esta tesis es “analizar críticamente la producción de biodiesel a partir de soja cultivada en regiones extra-pampeanas, desde un enfoque de ciclo de vida”. Para esto, se realiza un análisis energético y se estudia el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con la expansión del cultivo de soja hacia las eco-regiones Chaqueña, Yungas y Monte. En este análisis se tienen en cuenta las características particulares de cada región.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se divide en seis capítulos. El primero expone las generalidades y el marco conceptual del trabajo, se incluyen definiciones y la situación de los biocombustibles en el contexto mundial y nacional, y las problemáticas asociadas a su producción. El segundo capítulo describe las etapas del análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de biocombustibles. Además, en este capítulo se especifica el objetivo general y los particulares del trabajo y, por otro lado, se puntualizan las categorías de impacto ambiental sobre las que se va a trabajar. El tercer capítulo describe el proceso productivo del biodiesel de soja en Argentina y las características de las principales zonas de producción. Presenta en detalle los resultados de inventario de ciclo de vida para los procesos unitarios agrícola (producción del grano de soja) e industrial (acondicionamiento del grano, extracción de aceite y síntesis del biodiesel). El cuarto capítulo detalla los impactos ambientales del biodiesel de aceite de soja producido en Argentina y, el quinto capítulo presenta los resultados y la discusión. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones que surgen del trabajo realizado.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES Y MARCO CONCEPTUAL

1.1. Definiciones y generalidades

Se define como “bioenergía a la energía que se obtiene de la biomasa. La biomasa es el material orgánico que más ha sido utilizado como combustible a lo largo de toda la historia de la humanidad. Es producida por organismos fotosintéticos al fijar luz, agua y dióxido de carbono. Por ejemplo: plantas terrestres y marinas, o microorganismos fotosintéticos conocidos como cianobacterias y microalgas. En estos organismos, la energía solar queda almacenada en enlaces químicos y puede ser liberada mediante procesos como la combustión, la digestión, la descomposición, o bien, mediante su hidrólisis y fermentación a combustibles líquidos o gaseosos” (Álvarez, 2014).

Existen distintos tipos de biomasa, entre ellos los que interesan a esta tesina son los denominados cultivos energéticos definidos por la FAO como cultivos herbáceos o leñosos producidos específicamente por su valor energético. Generalmente el término “cultivo energético” se utiliza en un sentido amplio, abarcando también a las especies vegetales que pueden utilizarse para producir energía pero que no se han producido con ese único fin, tal es el caso de la soja en Argentina (Piastrellini, 2015).

Los combustibles que derivan directa o indirectamente de la biomasa o de sus desechos metabólicos y que pueden ser utilizados en cualquier aplicación energética ya sea térmica, eléctrica o mecánica, para alimentar calderas y motores de combustión interna se denominan “biocombustibles” (FAO, 2011). La Ley Nacional N°26.093/06 entiende por biocombustibles “al bioetanol, biodiesel y biogás que se producen a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, y que cumplen los requisitos de calidad que establece la autoridad de aplicación”.

El Biodiesel es un combustible de origen vegetal que puede reemplazar al gasoil mineral. La American Society for Testing and Materials (ASTM,2009) define el Biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores diesel”.

El Bioetanol es un biocombustible producido a partir de plantas con un gran contenido de azúcar, almidón o celulosa (caña de azúcar, maíz, remolacha, yuca, trigo, sorgo, etc.). Se produce mediante la fermentación alcohólica de los hidratos de carbono presentes en las plantas azucareras o cultivos cereales (FAO, 2014).

El Biogás se obtiene principalmente de la fermentación anaeróbica de distintos tipos de biomasa y se quema para producir calor y / o energía. Se incluyen en esta categoría el gas de vertedero y el gas de lodo (gas de aguas residuales y gas de lodos de animales). La biomasa líquida, que incluye bio-aditivos como el etanol, también se incluye en esta categoría (FAO, 2011).

Las tipologías de biocombustibles más aceptadas se definen en función de las tecnologías de proceso aplicadas y del origen de la biomasa con la que se producen, distinguiendo entre materias primas de uso alimenticio y no alimenticio. Esta clasificación comprendía en un principio tres generaciones de biocombustibles (CGIAR y FAO, 2008). Posteriormente, el desarrollo tecnológico de nuevas materias primas promovió la incorporación de la cuarta generación en la clasificación (Álvarez Maciel, 2009; Agencia Andaluza de la Energía, 2011; Demirbas, 2011).

Se presenta a continuación una breve descripción de las tipologías que comprende esta clasificación:

i) Biocombustibles de primera generación: producidos a partir de biomasa con usos alimenticios, con elevado contenido de almidón, azúcares y triglicéridos, tales como la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), la soja (*Glycine max*), el maíz (*Zea mays*), el girasol (*Helianthus annuus*) y la palma (*Elaeis guineensis*), entre otros. Las tecnologías de producción utilizadas se basan en la transesterificación para los aceites y grasas, y en la fermentación para los hidratos de carbono. En este trabajo se utiliza un biocombustible perteneciente a esta generación.

ii) Biocombustibles de segunda generación: elaborados a partir de materias primas no alimenticias, como la jatrofa (*Jatropha curcas*), la camelina (*Camelina sativa*), el álamo (*Populus sp.*), especies de algas marinas, entre otras. En esta categoría se incluyen además las grasas animales, los aceites de desecho doméstico, los residuos sólidos orgánicos, y los residuos de cosecha. Se obtienen utilizando las tecnologías mencionadas para los biocombustibles de primera generación o por medio de procesos químicos como licuefacción, pirólisis, gasificación e hidrólisis.

iii) Biocombustibles de tercera generación: las materias primas utilizadas han sido especialmente diseñadas, en general por medio de técnicas de la biología molecular, para mejorar la eficiencia de conversión de la biomasa en energía. Como ejemplos se pueden mencionar variedades de álamo y eucalipto (*Eucalyptus sp.*) con bajos contenidos de lignina, y variedades de pasto varilla (*Panicum virgatum*) que carecen de las fases de maduración, floración y letargo. Estos biocombustibles se obtienen por medio de procesos similares a los empleados en los biocombustibles de primera y segunda generación.

iv) Biocombustibles de cuarta generación: se elaboran a partir de materias primas diseñadas no sólo para mejorar la eficiencia de conversión en energía, sino también para captar mayor cantidad de dióxido de carbono (CO₂) durante las etapas de desarrollo del cultivo. Los métodos de producción de estos biocombustibles se combinan con tecnologías de captura y almacenamiento de carbono en formaciones geológicas (como los yacimientos petrolíferos agotados) o en minerales en forma de carbonatos (CO₃²⁻). Un ejemplo lo constituye el sistema de producción de etanol de maíz con captura y almacenamiento de carbono en formaciones de arenisca a 2.000 metros de profundidad, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (Bao et al., 2014).

Los biocombustibles se utilizan en motores, turbinas, calderas u hornos para proporcionar energía térmica o mecánica, que posteriormente puede ser transformada en energía eléctrica. Sin embargo, se emplean principalmente en el sector transporte, en estado puro o en mezclas con combustibles fósiles, denominándose en este caso "biocarburantes". Los biocarburantes de mayor aceptación y desarrollo son el biodiesel derivado de aceites vegetales y el bioetanol producido a partir de cereales y caña de azúcar, los cuales han logrado integrarse en los sistemas logísticos de transporte existentes (Piastrellini, 2015).

1.2. Los biocombustibles en el contexto mundial

En la década pasada los biocombustibles estaban en franca expansión en el mundo. En el año 2006, el 81.5 % de la producción de biocombustibles correspondía al biodiesel elaborado en la

Unión Europea (EurObserv'ER, 2006) en vistas al ahorro energético y al cumplimiento de los compromisos asumidos en el protocolo de Kyoto.¹

En Europa, la situación con los biocombustibles ha cambiado drásticamente. En el año 2015 el Parlamento Europeo, en su Comisión de medio ambiente, salud pública y seguridad alimentaria, aprobó la recomendación 2012/0288 en la cual se estipula que el máximo permitido de biocombustible será un 7% de todo el combustible utilizado (1,6 puntos menos que el anterior límite y la primera reducción que se impulsa). Además, se abre la puerta para que cada Estado miembro pueda hacer ese porcentaje todavía más pequeño. Se argumentó que “El biodiesel no ha contribuido a reducir la emisión de gases de efecto invernadero (y el calentamiento global) y, a cambio, ha favorecido el uso de suelo dedicado al monocultivo, multiplicado la deforestación y está detrás, al menos parcialmente, de la subida del precio de los alimentos.” Cabe recordar que durante varios años la Unión Europea impulsó la elaboración de biocombustibles que se producían en la misma región o que se importaban de diversos países como Argentina, Indonesia, etc. Las causas de esta decisión se deben, en cierto modo, a la cierta controversia respecto al balance energético del biodiesel. Pimentel y Patzek (2005) consideran que la energía consumida por el proceso de producción es mayor a la energía fina generada y que las ventajas ambientales en cuanto a reducción de emisiones CO₂ esencialmente respecto al biodiesel convencional (Sheehan et al., 1998) no compensan este desbalance.

A pesar de esto, la producción mundial de biocarburantes alcanzó en 2016 los 129,4 mil millones de litros, de los cuales el etanol representa el 76,2% (REN21², 2017). La producción de bioetanol se concentra en Estados Unidos y Brasil, mientras que la producción de biodiésel se concentra en Argentina y en la Unión Europea. El sector transporte consume aproximadamente el 20% de la energía generada en el mundo y es uno de los sectores más dependientes de los combustibles fósiles (el 95% de la energía utilizada por el sector deriva de productos de origen fósil) (IEA, 2014). Asimismo, este sector es responsable del 23% de las emisiones globales de GEI, y constituye una de las principales causas de la falta de cumplimiento de los compromisos del Protocolo de Kyoto por parte de la comunidad internacional. Estos hechos explican el creciente interés en el desarrollo de biocarburantes, a pesar de que en la actualidad sólo contribuyen en aproximadamente un 4% al consumo global de combustibles para el transporte por carretera, y en menor proporción (aunque en continuo crecimiento) en el transporte aéreo (REN21, 2017).

La producción mundial de etanol en 2017 se mantuvo estable, con niveles récord en Estados Unidos y fuertes aumentos en China e India. La producción mundial de biodiesel se recuperó

¹ El Protocolo de Kyoto es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Los gases son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), y los otros tres son tipos de gases industriales fluorados: los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆). En el protocolo se acordó una reducción de al menos un 5 %, de las emisiones de estos gases en 2008-2012 en comparación con las emisiones de 1990.

El protocolo fue adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. En noviembre de 2009 eran 187 los estados que lo habían ratificado. Estados Unidos, que era cuando se firmó el protocolo el mayor emisor de gases de invernadero (desde 2005 lo es China), nunca lo ratificó.

² REN21 (**Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**) La Red de Políticas de Energías Renovables para el Siglo 21, es la red global de múltiples partes interesadas de la política de energía renovable que conecta una amplia gama de actores clave.

después de una caída en 2015, con un crecimiento particularmente fuerte en Indonesia y Argentina. (REN21, 2017).

1.3. La situación de los biocombustibles en Argentina

En abril de 2006 entró en vigor la ley de biocombustibles en la República Argentina (Ley N° 26.093). En consecuencia, según las previsiones realizadas en ese momento, se debían producir 650 millones de litros de biodiesel para el año 2010 y 1.090 millones de litros para el 2023 (SAGPyA-IICA, 2005). Esto suponía la producción de 3,5 millones de toneladas de soja (1,2 millones de hectáreas) en 2010 para abastecer la totalidad de la demanda.

En el 2016, Argentina disputó con Alemania el tercer puesto en la producción de biodiesel, computando todos los orígenes. Los datos de ventas externas del 2016 muestran que el 89% del biodiesel argentino se exportó a Estados Unidos (1.209.000 toneladas); el 10% se remitió a Perú (133.543 toneladas); y el 1% restante a Panamá (6.800 toneladas) lo que generó ganancias mayores a U\$S 500 millones. El valor promedio por tonelada se ubicó en 617 U\$S (Bolsa de Comercio de Rosario, 2017). En el año 2017 se vuelve a exportar a Europa, donde Holanda, España y los Países Bajos fueron los destinos de preferencia. Por el lado americano se suma Canadá a los destinos de excelencia que siguen siendo Estados Unidos y Perú. (Ministerio de Hacienda, Secretaría de Energía, 2017). Según datos de La Bolsa de Comercio de Rosario (2017) Argentina hoy es el principal exportador mundial de biodiesel. Además, es el cuarto productor mundial de biodiesel en base a aceite de soja y el quinto productor mundial computando todas las materias primas procesadas (aceite de soja, de palma, de colza, etc.).

En Argentina, hay alrededor de 38 plantas de Biodiesel localizadas principalmente en la provincia de Santa Fe, sobre la rívera del Paraná (Figura 1). El 87% de la producción se concentra en grandes empresas como Cargill, Dreyfus, Bunge, Molinos Río de la Plata, Aceitera General Deheza y Vicentín, entre otras. (Ministerio de Producción y Trabajo de Argentina, secretaría de Agroindustria, 2017)

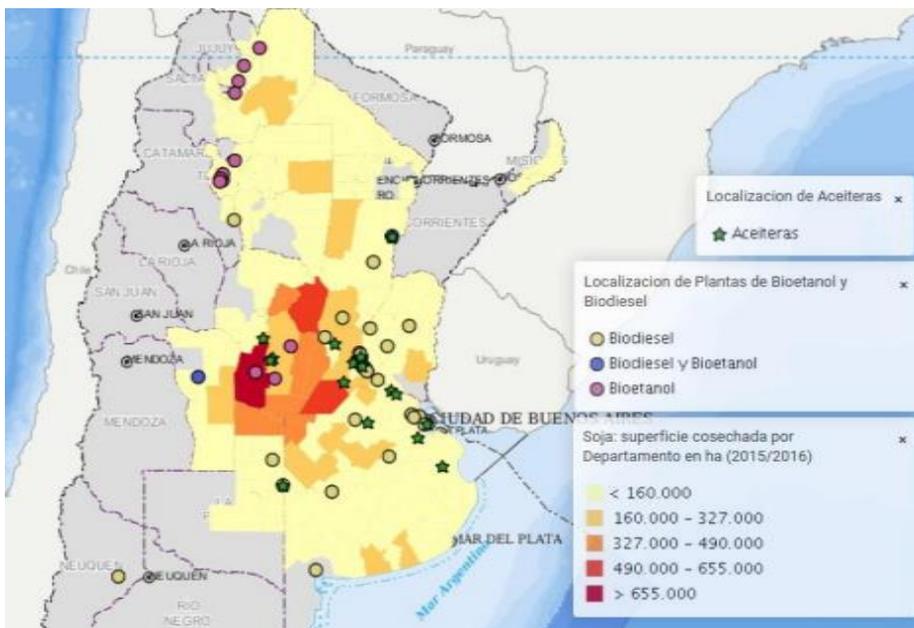


Figura 1 Ubicación de plantas aceiteras, de biodiesel y de bioetanol. Fuente: Subsecretaría de Información y Estadística Pública (2017)

La entrada en vigencia de la ley de biocombustibles (Ley N° 26.093) estableció en 2007 el corte obligatorio del biodiesel con el gasoil para el mercado argentino. Los porcentajes de corte teórico de gasoil con biodiesel, fueron los siguientes: a) desde marzo/abril de 2010: 5 %, b) desde agosto de 2010: 7 %, c) desde agosto de 2013: 8 %, d) desde Enero de 2014: 9 %, e) desde febrero de 2014: 10 %. En el año 2015, según la bolsa de Comercio de Rosario (2017), la demanda de gasoil en Argentina por parte del parque automotor más el uso en la agricultura fue de aproximadamente 11,4 millones de toneladas. El Biodiesel utilizado para mezclar con gas-oil ascendió a 0,99 millones de toneladas. En consecuencia, el corte real en nuestro país fue del 8,7% del consumo total de gasoil del parque automotor más agricultura. La realidad hacia fines del 2017, indicó que el mandato de corte de gasoil con biodiesel en el mercado interno, fue de un 10 %. El cumplimiento efectivo promedio de este mandato por parte de las compañías petroleras, se ubica en torno al 90 %.

El abastecimiento de la demanda de biodiesel que efectúan las compañías petroleras para cumplir con dicho mandato, es efectuado actualmente por unas veintiocho empresas, de las cuales una gran mayoría son PyMES y el resto, grandes empresas que no están integradas a fábricas de aceite. La capacidad instalada de la industria de biodiesel en Argentina es de alrededor de 4,5 millones de toneladas. La ocupación de esa capacidad es de alrededor de una 60 %, computando una producción cercana a 2,7 millones de toneladas, de las cuales alrededor de 1,1 millones de toneladas se destinan al mercado interno y 1,6 millones se exportan (INDEC, 2017).

Según datos del INDEC, como puede verse en la figura 2, para el año 2017 la producción de biodiesel fue de 2.871.707 toneladas, de los cuales el 41% (1.173.419 toneladas) se destinaron al mercado interno y el resto (1.650.312 toneladas) a exportación.

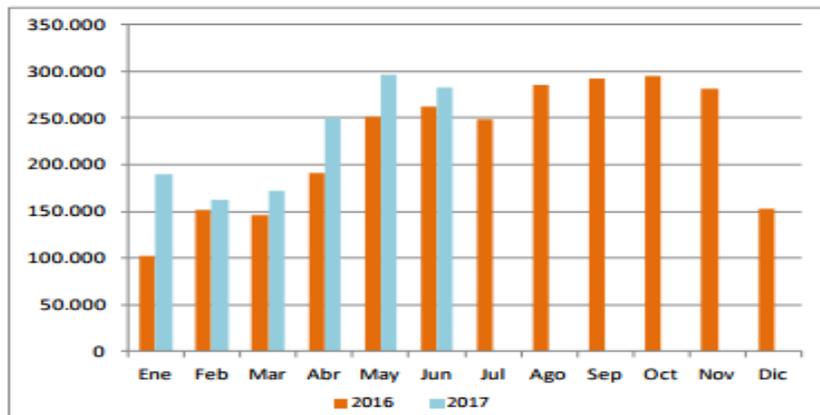


Figura 2: Producción de biodiesel en toneladas. Fuente: INDEC 2017

1.4. Problemáticas asociadas a los biocombustibles

En general la sociedad asume que los agrocombustibles³ representan una forma de energía “limpia con menor impacto ambiental”, que no contribuye al calentamiento global, que ofrece una

³ Los “agrocombustibles” son combustibles líquidos producidos a partir de materia prima vegetal, fundamentalmente cultivos agrícolas, a gran escala. Sinónimo de biocombustibles.

ganancia neta en la producción de energía (donde se obtiene más energía que la invertida en el cultivo y procesamiento) y que pueden promover el desarrollo rural al generar negocios tanto a nivel nacional como por medio de exportaciones (Toledo, 2009).

El documento técnico “Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático” elaborado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático-IPCC (Watson et al., 1996) fue una de las primeras publicaciones referida a los biocombustibles como una opción de reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, en la actualidad están siendo cuestionados no sólo desde la perspectiva ambiental, sino también desde la económica y social. Muchos de estos cuestionamientos se basan en que la satisfacción de una demanda creciente de biocombustibles obtenidos a partir de cultivos energéticos, requiere incrementar los niveles de productividad por hectárea de suelo ocupado y/o extender la superficie cultivada (Piastrellini 2015). El incremento de los niveles de productividad por lo general se asocia con una alta homogeneidad genética, que permite simplificar el manejo del cultivo. Esta homogeneidad incrementa el riesgo de aparición de plagas y enfermedades en los cultivos y puede ocasionar pérdidas de materia orgánica y sobre-extracción de nutrientes (Viglizzo et al., 2010).

Los movimientos sociales y campesinos se multiplican a gran velocidad en Latinoamérica como reacción a los desplazamientos provocados por las actividades extractivas en los sectores identificados. Disfrazados bajo la etiqueta de 'recurso renovable' y con la promesa de introducir desarrollo rural, algunos biocombustibles han demostrado ser relevantes vectores de una agresiva tendencia extractiva en el sector agrícola. En la región observamos que la industria de los biocombustibles ha sido, y continua siendo, fuertemente promovida y apoyada por los gobiernos en el poder a pesar del hecho que refuerzan/intensifican los efectos ambientales y sociales asociados al extractivismo. En tal dirección una suerte de nueva paradoja de los recursos naturales pone en jaque la sustentabilidad socio-ambiental de la región en el siglo XXI (Fulquet, 2015).

Gudynas (2013) por su parte, hace énfasis en que la problemática de los biocombustibles reside en la expansión de los monocultivos y destaca que en Argentina y otros países de Latinoamérica la expansión de la soja produce distintas reacciones ciudadanas contra el avance de la frontera agrícola, alertas sobre la deforestación y pérdida de biodiversidad, el uso de agroquímicos, y el desplazamiento de pequeños agricultores, campesinos o indígenas pueblos originarios.

CAPÍTULO 2: EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SU APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE SOJA

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las herramientas desarrolladas en este sentido es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (ISO 2006).

Según la norma ISO 14040, la metodología de ACV puede ayudar en:

- La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- El aporte de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos).
- La selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición.
- El marketing (por ejemplo, implementando un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental, o de una declaración ambiental de producto).

2.1 El pensamiento de ciclo de vida

El pensamiento de ciclo de vida posibilita a *“identificar tanto las oportunidades como los riesgos de un producto o tecnología nueva, desde la materia prima hasta el proceso de desecho. Para ello, existe una gama de enfoques de ciclo de vida que va desde lo cualitativo (el concepto del ciclo de vida) hasta lo exhaustivamente cuantitativo (el análisis del ciclo de vida)”* (UNEP, 2004). Por tanto este concepto tiene en cuenta todas las etapas de la vida útil de un producto, proceso o servicio. Es por ello que en esta clase de estudios se identifican y/o cuantifican los consumos de recursos (entradas) y la generación de emisiones y vertidos (salidas), que se producen desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final (“desde la cuna a la tumba”), pasando por la fabricación y el uso; se consideran también todas las etapas intermedias de transporte y distribución (Piastrellini et al.,2013). La figura 3 ilustra el concepto de ciclo de vida mediante un ejemplo de aplicación a un producto agroalimentario.

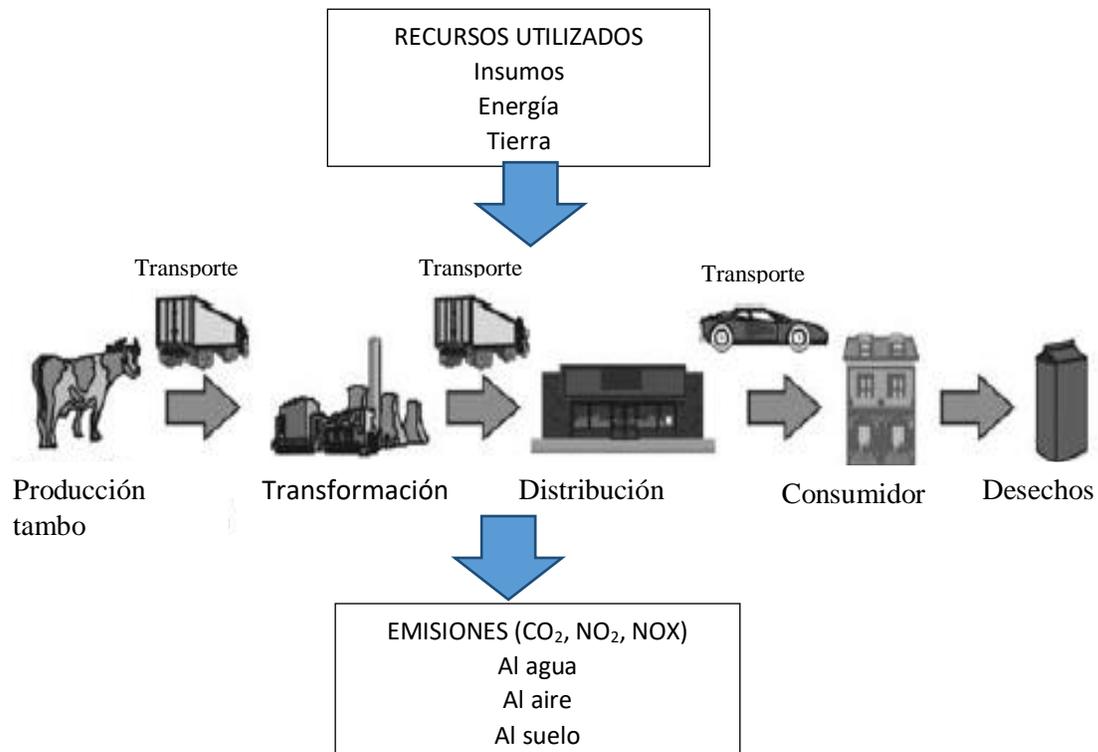


Figura 3: ilustración de las etapas de un ACV. Extraído de "Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario" en Contribuciones a la Economía, 2005.

2.2. Definición y fases del Análisis de Ciclo de Vida

El ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales (por ejemplo, el uso de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones) a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (ISO, 2006).

Hay cuatro fases en un estudio de ACV (ISO, 2006) que pueden observarse en la figura 4:

- a) La definición de los objetivos y el alcance,
- b) El análisis del inventario,
- c) La evaluación del impacto ambiental, y
- d) La interpretación.

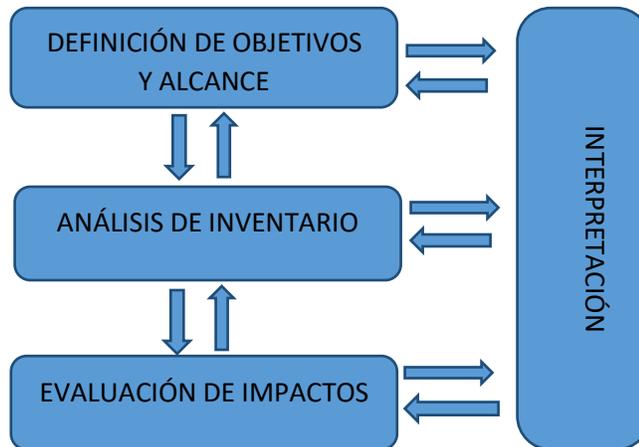


Figura 4: Estructura del Análisis de Ciclo de Vida. ISO 14040:2006

Fase 1: Definición de los objetivos y alcance

El primer paso en la elaboración de un estudio de ACV consiste en definir el objetivo y el alcance del estudio. El objetivo debe establecer claramente la aplicación deseada, los motivos para realizar el estudio y la audiencia a la cual se espera comunicar los resultados. El alcance del estudio debe determinarse considerando las funciones del sistema y la unidad funcional (UF). La UF es la cantidad de producto necesaria para cumplir la función principal del sistema, y proporciona una referencia respecto a la cual se contabilizan los flujos de entrada y salida. Luego de definir la UF, es necesario identificar el sistema-producto, los límites del sistema y los procesos unitarios que se incluirán en el sistema. Un proceso unitario es el menor elemento considerado en el análisis de inventario del ciclo de vida (Fase 2), para el cual se cuantifican los datos de entrada y salida (ISO, 2006b). El sistema-producto está constituido por procesos unitarios conectados a través de flujos de productos intermedios, que realizan una o más funciones definidas. El alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular (ISO, 2006a).

El ACV es una herramienta que permite tener una visión holística del sistema en estudio, es decir que el sistema debe ser analizado en su conjunto, considerando los flujos de entrada y salida de todas las etapas del ciclo de vida. Sin embargo, el alcance del estudio puede limitarse a ciertas etapas, considerando su mayor o menor relevancia, resultando distintos enfoques (Figura 5):

- Enfoque “de la puerta a la puerta”: se tienen en cuenta únicamente los flujos que ingresan y egresan del sistema en la etapa de producción (proceso de fabricación).
- Enfoque “de la cuna a la puerta”: se consideran los flujos de las etapas comprendidas entre la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación del producto hasta que está terminado y listo para insertarse en el mercado (a la salida de la planta de fabricación).
- Enfoque “de la cuna a la tumba”: se contabilizan los flujos desde la extracción de las materias primas hasta la etapa de fin de vida del producto (incluyendo el transporte, el almacenaje y la distribución).

□ Enfoque “de la cuna a la cuna”: se tienen en cuenta las mismas etapas que el enfoque “de la cuna a la tumba”, pero se considera que los flujos de salida correspondientes a la etapa de fin de vida pueden ser reincorporados como flujos de entrada (materias primas o insumos) al mismo u otro sistema.

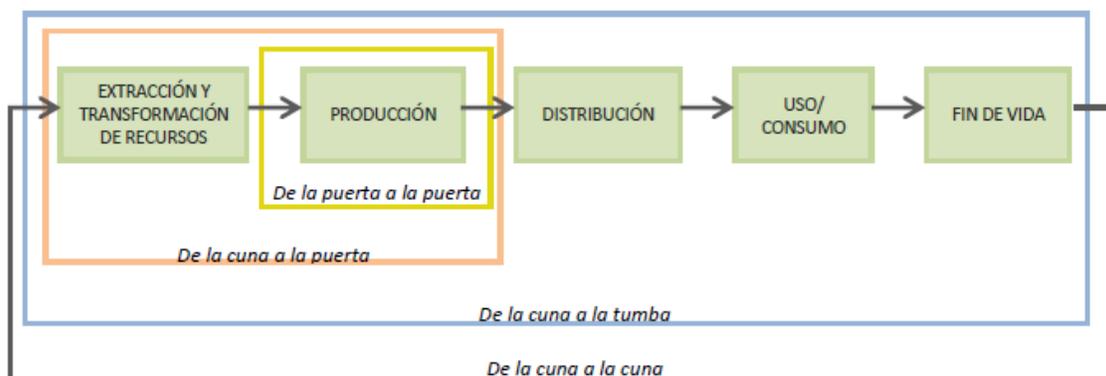


Figura 5: Esquema representativo de posibles alcances del Análisis de Ciclo de Vida de un producto. Fuente: Piastrellini (2015)

Fase 2: Análisis de inventario del ciclo de vida

El análisis de inventario del ciclo de vida (AICV) incluye la recolección de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema de producción. Los datos requeridos incluyen, por ejemplo, el ingreso de energía, el ingreso de materias primas y entradas auxiliar, productos, coproductos y residuos, emisiones al aire, descargas al agua y al suelo y otros aspectos ambientales.

El AICV es la base para realizar evaluaciones comparativas de impactos ambientales e identificar oportunidades de mejora. En un AICV se genera una lista con las cantidades de contaminantes relacionadas con el medio ambiente y la cantidad de materia y energía consumida. Puede ser utilizado de diferentes maneras: para hacer comparaciones entre productos, procesos o actividades, o para la inclusión de aspectos ambientales en la selección de materiales. Además, pueden contribuir a la generación de políticas y como herramientas de ayuda a la decisión (Panichelli, 2006).

Fase 3: Evaluación de impactos del ciclo de vida

El objetivo de la Evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV) es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) de un sistema productivo a fin de comprender mejor su importancia ambiental. Está dirigida a la evaluación de la significancia de los impactos ambientales potenciales del producto o proceso, usando los resultados del AICV. En general, este proceso relaciona los datos de inventario con categorías de impactos ambientales e indicadores específicos para entender estos impactos. Una categoría de impacto se define como una clase que representa un problema o una preocupación ambiental, por ejemplo, calentamiento global, acidificación, eutrofización, usos del suelo, toxicidad humana, etc. (Piastrellini 2015). La fase de EICV también provee información para la fase de interpretación del ACV. La EICV constituye el nexo entre el producto o proceso y los potenciales impactos sobre el ambiente (Panichelli, 2006).

Fase 4: Interpretación de resultados

La interpretación es la fase final del procedimiento de ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del AICV o del EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

2.3 Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida

Los resultados de un ACV pueden utilizarse para mejorar el desempeño ambiental de productos, diseñar y rediseñar productos, procesos y tecnologías (ecodiseño), seleccionar indicadores ambientales y técnicas de medición pertinentes, elaborar esquemas de etiquetado ambiental (eco-etiquetado), y desarrollar programas y políticas ambientales. Desde el punto de vista corporativo, el ACV puede utilizarse como herramienta para disminuir los costos asociados al consumo energético y de materiales, identificar oportunidades de optimización ambiental, establecer prioridades, elaborar estrategias tendientes a generar valor agregado, abrir nuevas líneas de negocios, mejorar la imagen de la empresa, e influenciar en los patrones de consumo (mantener a los sectores demandantes y atraer a nuevos consumidores). En estudios comparativos de productos, los resultados del ACV permiten determinar las alternativas asociadas a mayores beneficios ambientales, por lo tanto pueden ser utilizados por los consumidores para priorizar criterios de decisión al momento de adquirir bienes o servicios (Piastrellini, 2015).

2.4. Consideraciones metodológicas para el caso de estudio

2.4.1. Alcance y unidad funcional

El límite del sistema está definido por los procesos y las etapas del sistema que han de incluirse en el estudio (IRAM-ISO, 2008). Considerando que el análisis propuesto es solo para la etapa de producción y fabricación del biocombustible, se adoptó el alcance “desde la cuna a la puerta”. Es decir que se consideraron las entradas y salidas desde la extracción de las materias primas hasta el final de la fabricación del biodiesel, excluyendo su uso y disposición final.

El proceso se dividió en dos etapas principales: agrícola (producción del grano de soja) e industrial (extracción de aceite y elaboración de biodiesel) (Figura 6). Se tuvo en cuenta la fabricación y el transporte de materias primas e insumos, y la generación de energía (combustible y electricidad) usada por las maquinaria agrícola y equipos industriales; no así la infraestructura ni la fabricación de la maquinaria empleada durante todo el proceso de producción.

Con el límite del sistema ya definido el siguiente paso fue determinar la Unidad Funcional (UF). En este trabajo se define una UF específica para cada etapa del proceso:

- Etapa agrícola: 1 kg de grano de soja cosechado.
- Etapa industrial: 1 MJ de energía obtenida del biocombustible.

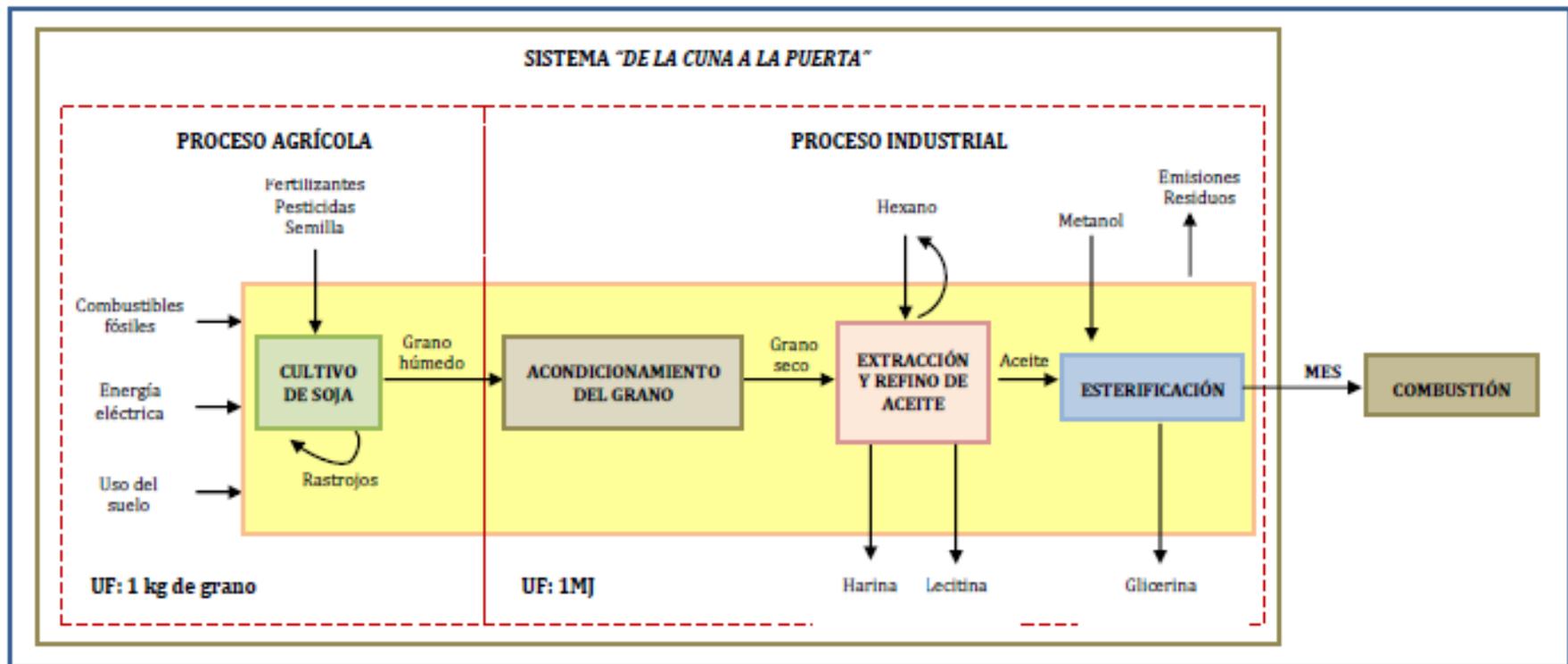


Figura 6: Diagrama simplificado del ciclo de vida del biodiésel de soja, para un sistema "de la cuna a la puerta", considerando las tecnologías más difundidas en Argentina. Extraído de Piastrellini (2015)

2.4.2. Impactos ambientales

Con respecto a los impactos ambientales, en esta tesis se trabajó en la evaluación del balance de energía y de las emisiones de GEI, respondiendo a la necesidad de corroborar con base científica el hipotético aporte de los biocombustibles a la mitigación del calentamiento global y a la diversificación de la matriz energética nacional.

2.4.2.1. Análisis energético

El balance de energía de los biocombustibles se analiza usualmente utilizando la Tasa de retorno de energía (del inglés, *Energy Return on Invested-EROI* o *Energy Return on Energy Invested-EROEI*) (Piastrellini et al. 2017), concepto desarrollado por Hall et al. (1981) y Cleveland et al. (1984). El índice EROI expresa la relación entre la cantidad de energía obtenida en el proceso de producción del biocombustible y la energía no renovable requerida para la producción de dicho biocombustible, y se calcula a partir de la Ecuación 1 (Murphy y Hall, 2010):

$$\text{EROI} = \frac{\text{Energía ganada}}{\text{Energía no renovable necesaria para obtener la energía ganada}} \quad (\text{Ec.1})$$

El numerador y el denominador de la Ec. 1 suelen evaluarse en las mismas unidades de medición, por lo que el índice EROI resulta adimensional. Valores de $\text{EROI} < 1$ indican una pérdida neta de energía, es decir que el biocombustible requiere mayor cantidad de energía para su producción que la energía que genera y puede ser utilizada como combustible. Por el contrario, valores de $\text{EROI} > 1$ sugieren una ganancia energética neta.

2.4.2.2. Gases de efecto invernadero y potencial de calentamiento global

El efecto invernadero se origina porque la energía que llega del sol está formada por ondas de frecuencias altas que traspasan la atmósfera, sin mucha resistencia. La energía remitida hacia el exterior, desde la Tierra está formada por ondas de frecuencias más bajas, y es absorbida por los gases, produciendo el efecto invernadero. Esta retención de la energía hace que la temperatura aumente. En forma simple el efecto invernadero provoca que la energía que llega a la Tierra sea devuelta más lentamente, por lo que es mantenida más tiempo junto a la superficie elevando la temperatura (Espindola, 2012).

Los niveles de GEIs en la atmósfera están determinados por un equilibrio entre fuentes y sumideros. Sin embargo, las actividades humanas, especialmente las agrícolas, están afectando estos niveles al introducir nuevas fuentes o interferir en los sumideros naturales. El N_2O , el CH_4 y el CO_2 , son los gases de efecto invernadero más importantes relacionados a la agricultura y al cambio de uso del suelo. Entre ellos, se destacan el N_2O y el CH_4 por sus elevados potenciales de contribución al calentamiento global, que superan al del CO_2 en 310 y 21 veces, respectivamente. Esto significa que la emisión de 1 kg de N_2O aporta de igual manera al calentamiento global que 310 kg de CO_2 emitidos a la atmósfera, considerando un horizonte temporal de 100 años. Del mismo modo, la contribución de la emisión de 1 kg de CH_4 equivale a

la de 21 kg de CO₂. Por ello, pequeños cambios en los flujos de estos gases asociados al ciclo de vida de un producto pueden ocasionar importantes modificaciones en el potencial impacto de calentamiento global (Piastrellini 2015).

Tanto la labranza de los suelos agrícolas como la fertilización se asocian con la reducción de los sumideros de CH₄ en el suelo y con un aumento en las emisiones de N₂O hacia la atmósfera. Las emisiones de N₂O se producen por vía directa e indirecta. Las emisiones directas hacen referencia a los flujos que ocurren directamente desde los suelos a los que se agrega el nitrógeno. Las emisiones indirectas se producen por dos procesos: a) la volatilización de amoníaco (NH₃) y óxidos de nitrógeno (NO_x) provenientes de suelos gestionados, del uso de combustibles fósiles y del quemado de la biomasa, con la subsiguiente redistribución de estos gases y sus productos (amonio y nitrato) en suelos y fuentes de agua; y (b) la lixiviación y el escurrimiento del nitrógeno de suelos gestionados, principalmente como nitratos (NO₃⁻) (Piastrellini, 2015).

El Potencial de Calentamiento Global (PCG), usualmente expresado en kg de CO₂ equivalentes, integra los flujos de gases de efecto invernadero, proporcionando la contribución al calentamiento global de diferentes actividades y usos del suelo para diferentes horizontes temporales (20, 50 ó 100 años). El PCG establece el efecto de calentamiento global relativo de cada GEI con respecto al CO₂ (que se utiliza como referencia) (IPCC, 2007). Representa el efecto combinado de los diferentes períodos de permanencia de cada GEI en la atmósfera y su eficacia relativa en la absorción de la radiación infrarroja.

En la mayoría de los estudios de ACV se adopta el indicador PCG (GWP por sus siglas en inglés, *Global Warming Potential*) para evaluar los impactos sobre el calentamiento global, elaborado en base a la cantidad de cada GEI emitido a la atmósfera por UF y al potencial de efecto invernadero por cada kg de GEI, considerando un horizonte temporal de 100 años (Piastrellini, 2015), tal como se expresa en la Ecuación 2.

$$GWP = \sum_i GWP_i * m_i \quad (\text{Ec.2})$$

donde, *GWP* es el PCG asociado al sistema o producto estudiado (en kg de CO₂eq); *GWP_i* es el PCG del compuesto *i*; y *m_i* es la masa emitida a la atmósfera del compuesto *i* (expresada en kg).

CAPÍTULO 3: PROCESO PRODUCTIVO DEL BIODIÉSEL DE SOJA

En este capítulo se describe el proceso de producción del biodiesel de soja en Argentina. En primer lugar se presenta la etapa agrícola considerada la de mayor importancia en cuanto a aspectos ambientales, donde se especifican su distribución en Argentina y características generales en la región. Luego se detallan las regiones de estudio analizadas y finalmente las labores agrícolas (siembra, riego suplementario). A continuación, se muestran los resultados de inventario de consumo de combustible y energía, y de transporte de insumos y materias primas, emisiones a la atmósfera. Finalmente, se detalla la etapa industrial de producción.

3.1. Etapa agrícola

La soja (*Glycine max*) es una especie de la familia de las leguminosas (*Fabaceae*) cultivada por sus semillas, de medio contenido en aceite y alto de proteína⁴. El grano de soja y sus subproductos, se utilizan principalmente para la alimentación humana y de los diferentes tipos de ganado. La soja es el principal cultivo de la Argentina no sólo por la producción, sino por la superficie ocupada. En la actualidad representa el 55% de las casi 37 millones de hectáreas que se siembran en el país, seguida por los cultivos de maíz y trigo que en conjunto representan el 26% del total. Del total producido, una parte se exporta como poroto mientras que otra se procesa internamente y se vende al exterior como harina, aceite o biodiesel (INTA, 2015).

El sistema que más se utiliza en Argentina para labores en soja es el sistema de siembra directa (SD). Este sistema permite rotaciones de cultivos, estrategias de fertilización con reposición de nutrientes, y un manejo integrado de malezas, plagas y enfermedades (AAPRESID, 2012), pero a su vez provoca un aumento en el uso de herbicidas comparado con el sistema convencional.

La soja es un cultivo estival, que se siembra durante la primavera. Aquella sembrada en octubre-noviembre se denomina Soja de Primera (SP), cuyo ciclo de crecimiento dura 6 meses; mientras que la soja sembrada en diciembre-inicios de enero toma el nombre de Soja de Segunda (SS) debido al retraso en la fecha de siembra. Los cultivos de SS generalmente son precedidos por trigo (*Triticum* sp.), el cual se cosecha pocos días antes de sembrar la soja, permitiendo la rotación de cultivos. La SP puede ubicarse en rotaciones a continuación de cultivos de maíz, sorgo (*Sorghum* sp.), girasol o soja. El 70% de la superficie sembrada bajo SD en el país corresponde a SP y el 30% restante a SS (INTA, 2015).

En el presente trabajo se estudian los siguientes sistemas productivos:

SD-SP: soja de primera en siembra directa, en condiciones de secano, para las provincias Tucumán, Salta, Santiago del Estero, las cuales pertenecen a las Eco-regiones de las Yungas (Tucumán) y Chaqueña (Salta y Santiago del Estero).

⁴ La información nutricional proporcionada por INTA Rafaela sobre la soja indica que cada 100 gramos de grano de soja, se obtienen 446 calorías, 20g de grasas totales (Ácidos grasos saturados 2.9 g, Ácidos grasos poliinsaturados 11 g, Ácidos grasos monoinsaturados 4.4 g), 30 g de carbohidratos, 36 g de proteínas.

SD-SP-R: soja de primera en siembra directa, bajo riego, para la provincia de Mendoza, perteneciente a la Eco-región del Monte.

Para este último sistema productivo, se consideraron dos alternativas de riego: Riego por Pivote Central y Riego por Canal Discontinuo. A continuación se describen brevemente los dos sistemas según el Instituto de Energía de la Universidad Nacional de Cuyo (IDE UNCuyo):

Pivote Central: es un sistema automatizado integrado por un brazo regador que gira sobre un punto describiendo un círculo que permite regar hasta 120 has. Este movimiento de traslación se efectúa por medio de motores eléctricos ubicados en cada torre. Funciona a través de la aplicación de una lluvia controlada, más o menos intensa y uniforme, con el objetivo de que el agua infiltre en el mismo punto donde cae. Entre las principales ventajas del sistema se destacan la uniformidad, la alta eficiencia (ahorro de mano de obra, agua y energía), y la maximización del uso de la tierra.

Riego por Canal Discontinuo: es una técnica de riego por superficie que requiere de una presurización leve para el correcto manejo de los caudales de agua en los tiempos de aplicación y sus volúmenes. El sistema busca lograr rápidamente un mismo y menor valor posible de la capacidad de infiltración del terreno con el fin de asegurar la aplicación de una lámina de riego uniforme a lo largo y ancho del lote. Las principales ventajas de este sistema es la mayor eficiencia en el uso del agua (que podría alcanzar hasta un 80% respecto de un riego tradicional), la baja presión de bombeo que permite ahorrar energía, baja incidencia de la mano de obra, y bajo costo de inversión inicial y de mantenimiento

Según Piastrellini et al. (2015) cada uno de éstos esquemas de producción determinará los flujos de entrada y salida al sistema producto: las labores agrícolas, la maquinaria utilizada, el tipo y las dosis de agroquímicos, el consumo de combustible y energía, el consumo de agua, la superficie ocupada (y transformada) de suelo, y las emisiones al ambiente, entre otros.

3.1.1. Distribución del cultivo de soja en Argentina

La superficie cultivada con soja en Argentina es de 20.479.094 ha (Figura 7). Las principales provincias productoras de soja pertenecen a la Región Pampeana, donde se destacan Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe, con más de 15 millones de hectáreas sembradas (Secretaría de Agroindustria de Argentina, 2017).

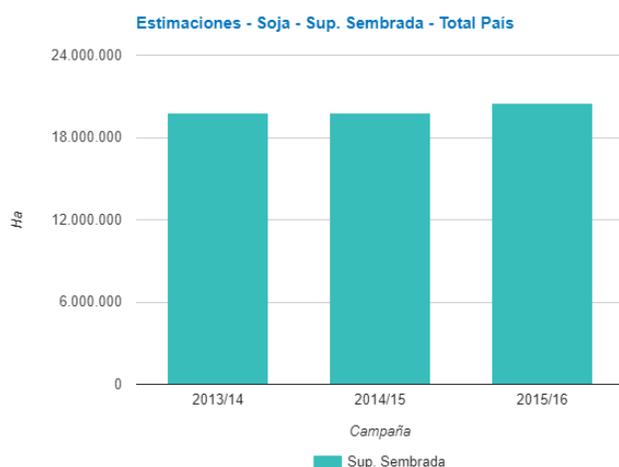


Figura 7: Superficie sembrada con soja en Argentina. Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones. SAGyP (2017)

La Región Pampeana (Figura 8) ha sido el lugar por excelencia donde el cultivo de soja se afianzó a lo largo de los años en Argentina. Esta zona es caracterizada por una dilatada llanura de aproximadamente medio millón de kilómetros cuadrados, casi plana o ligeramente ondulada, solamente quebrada por las serranías del sur de la provincia de Buenos Aires con alturas máximas cercanas a los 1.200 m. El suelo está formado por una capa de loess de origen eólico, constituido por elementos finos, compacto y con elevada retención hídrica en la porción nororiental, más suelto y permeable en la occidental; el subsuelo es arcilloso y a profundidad variable suele tener elementos de tosca, aislados o formando capas impermeables que obligan a las aguas a escurrir hacia lugares bajos donde forman lagunas y cañadones. Sus características térmicas propias resultan de la acción conjunta de varios factores, entre los que debe mencionarse preferentemente a la oceanidad, influencia común a todo el Hemisferio Sur que, atenuando la variación anual de la temperatura, genera veranos frescos e inviernos suaves. En la pradera pampeana, la suavidad del verano térmico se encuentra compensada por su dilatada duración, lo que permite disponer del calor necesario para el desarrollo y maduración de especies termófilas como el maíz, el girasol, el sorgo o la soja, cultivadas extensivamente. Las características climáticas y edáficas de la zona permiten que la productividad alcancen niveles record, en comparación con otras zonas productivas del país (Piastrellini, 2015).

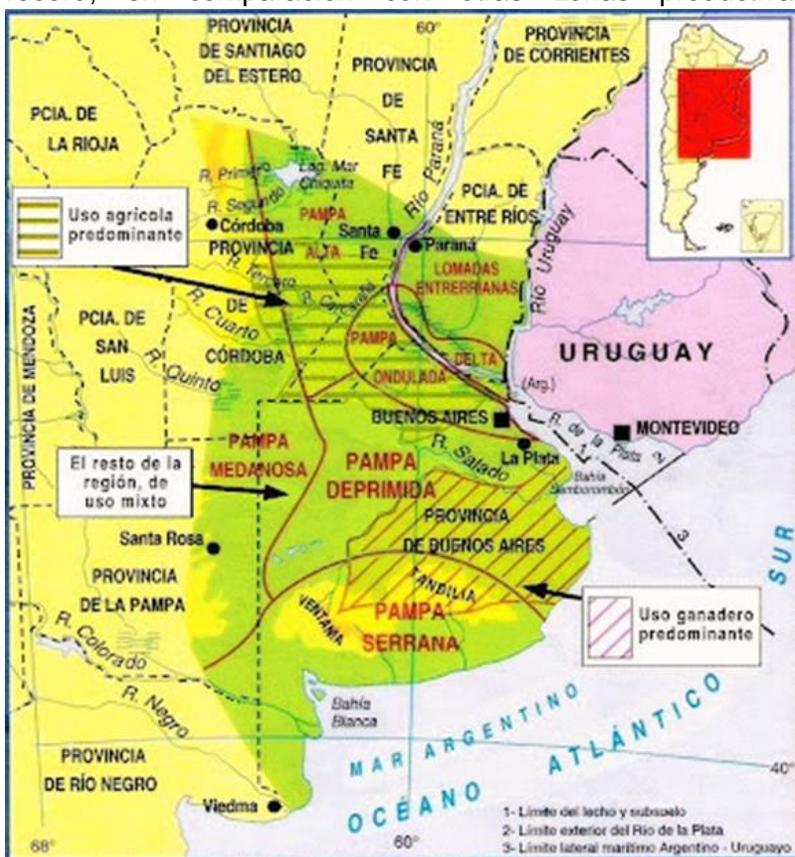


Figura 8: Región Pampeana Argentina. Fuente: Área pampeana: subregiones y usos predominantes del suelo. <http://tierraadentrogeo.blogspot.com/2009/07/el-area-pampeana-y-el-area.html>

Durante el período comprendido entre 1975 y 2000, se consolida la expansión del cultivo en la Región Pampeana, que incorpora 5 millones de hectáreas sembradas con soja y su participación supera el 80% del total nacional con un rendimiento que supera a la productividad media nacional de 20 qq/ ha. Dentro de las provincias extrapampeanas se inicia el liderazgo de Tucumán con el consecuente desplazamiento del liderazgo regional del noreste argentino (NEA) al noroeste argentino (NOA), indicado además por el cambio de la segunda provincia dentro del ranking extrapampeano, que pasa de Corrientes a Salta. Santiago del Estero lidera la producción por dos campañas, hasta 1988/89 donde se instala Salta como la principal referente del cultivo extrapampeano (Castillo, 2009).

Entre los efectos que impulsaron este avance se encuentran el corrimiento de las isohietas hacia el oeste con mayores precipitaciones medias en el período estival que permitió la ampliación de la frontera agrícola en detrimento de la vegetación natural, la ganadería y la sustitución de otros cultivos estivales menos rentables (Castillo, 2009). Por ejemplo, la expansión agrícola en el NEA se manifiesta en la incorporación anual de 120 mil hectáreas entre los Censos de 1988 y 2002, ocupadas en un 66% por el cultivo de soja. La mayor expansión se registra en cuatro polos del este salteño (Tartagal y Las Lajitas), oeste de Santiago del Estero y sudoeste de Chaco (Charata) y en el sudeste de Santiago del Estero y noroeste de Santa Fe (FAUBA, 2004).

Saliendo de la Región Pampeana, el cultivo de soja se ha expandido hacia áreas con ecosistemas forestales más frágiles (Figura 9). Tal es el caso de las provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero. Es por esto que se eligieron como zonas de estudio.

La expansión del cultivo de soja en el campo argentino se dio por varios procesos que conllevan un alto costo ambiental debido al acelerado desmonte y reemplazo de sistemas naturales o seminaturales que implicó una pérdida directa de biodiversidad nativa (Donald 2004; Grau et al. 2005). En la Argentina se desmontaron 118.000 ha entre 1998 y 2002 para la producción de soja en Chaco, 160.000 en Salta y 223.000 en Santiago del Estero (Altieri & Pengue 2006). Es por esto que es de vital importancia que se evalúe si estos desmontes para sembrar soja compensan el desbalance de nutrientes y de emisiones GEI.

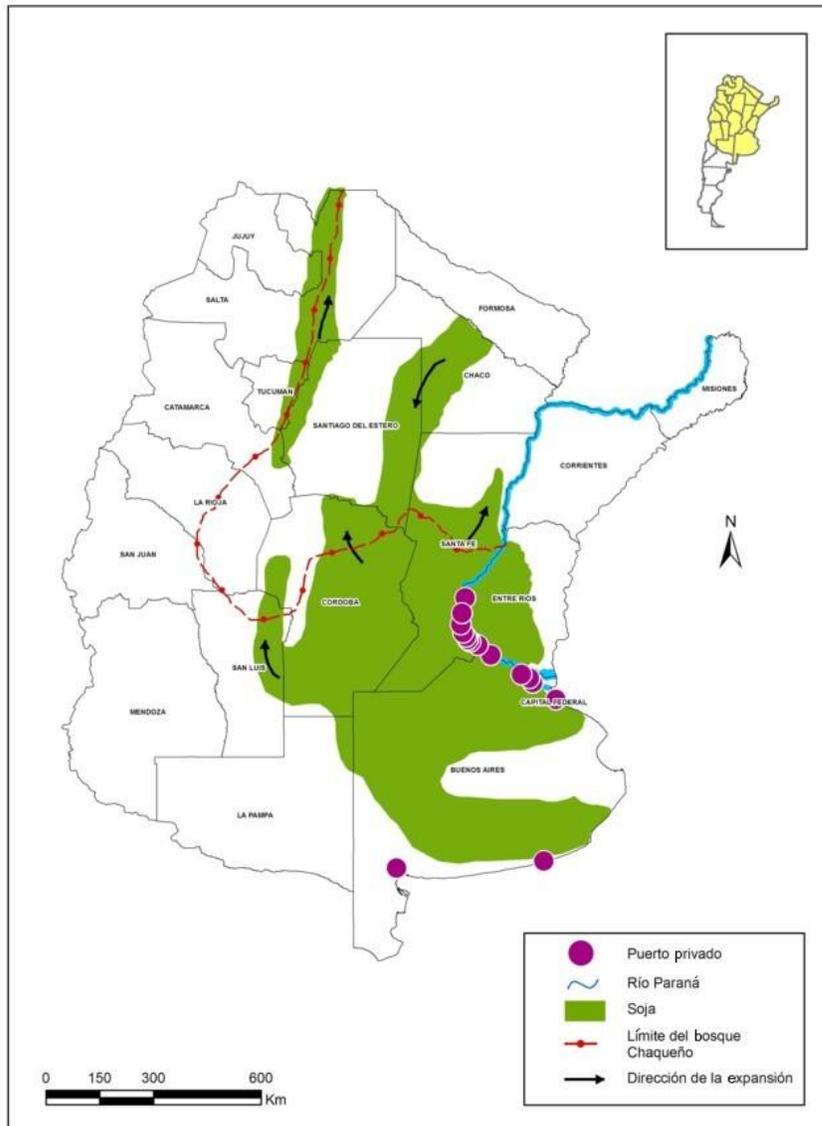


Figura 9: La expansión de la soja en Argentina. Instituto de Geografía, Universidad de Buenos Aires (2010)

En cuanto a la región Cuyo, podemos decir que en la provincia de San Luis, existen 400.000 hectáreas activas de superficie cultivable con un potencial de 700.000 hectáreas. Los cultivos preponderantes en dicha provincia, son las oleaginosas principalmente soja. En los últimos años, la provincia se expandió tanto en agricultura como en ganadería: en 2010 el sector ganadería creció un 7%; por su parte, la agricultura se encuentra en una transición importante gracias a que los productores han incorporado tecnología que permite el crecimiento en una provincia con un clima muy diferente al de la pampa húmeda. La conjunción de esta circunstancia y de la realización de obras públicas provoca un sinergismo que ha llevado a la expansión del sector productivo (Possetto, 2011).

Por el éxito de esta producción en la provincia de San Luis hace unos años algunas compañías como Syngenta comenzaron a hacer pruebas de producción en diferentes departamentos de Mendoza como Santa Rosa, San Rafael y Lavalle.

3.1.2 Regiones de estudio

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se estudiaron cuatro zonas de estudio: las provincias de Tucumán, Salta y Santiago del Estero ubicadas en la Región del Noroeste argentino, y la provincia de Mendoza localizada en la Región de Cuyo (Figura 10). Tucumán forma parte de las Yungas, Santiago del Estero y Salta de la eco-región Chaqueña, mientras que Mendoza del Monte.

Se presenta a continuación una breve caracterización de las mismas.



Figura 10: Regiones de estudio.

3.1.2.1- Tucumán

La provincia de Tucumán está ubicada entre los paralelos 26° y 28° de latitud sur y los meridianos 64° 30' y 66° 30' de longitud oeste. En línea recta, dista 540 km de las costas del Pacífico, 1.050 km de las aguas de la boca del Río de la Plata y unos 1.400 km del Océano Atlántico. Limita al norte con Salta, al sur y al oeste con Catamarca y al este con Santiago del Estero. Con 22.524 km² es la provincia argentina menos extensa. La provincia se encuentra dividida en 17 departamentos sin función administrativa, dentro de estos se encuentran los municipios y comunas rurales, quedando áreas sin administración municipal (ExportAr, 2011).

Dentro de Tucumán se eligió el departamento de La Cocha ubicado en el sur de la provincia (Figura 11), porque según datos de la secretaría de Agroindustria (2017) es una de las localidades donde más ha crecido la producción de soja. El mismo se encuentra rodeado por los departamentos Juan B. Alberdi al oeste y norte, Graneros al este y por la provincia de Catamarca al sur y oeste. El departamento La Cocha posee un clima subtropical con estación seca en invierno, variando de temperatura entre las llanuras del este y la zona montañosa del oeste. El

clima es templado y cálido. La temperatura media anual es de 19.5 °C, pudiendo llegar a picos de 40°C en verano y cercanos a 0 °C en invierno. Las precipitaciones anuales promedio llegan a 741 mm y son de régimen estival. (Municipalidad de La Cocha, s.f.) Todas características que favorecen la producción y crecimiento del cultivo de soja. La Cocha pertenece a la provincia fitogeográfica de Las Yungas (amenazada por el desmonte), sus suelos son molisoles argiúdoles típicos según la clasificación de la Soil Taxonomy, con un paisaje predominantemente de llanura pedemontana.

La agricultura constituye la base de la economía departamental, destacándose en particular el cultivo de soja. Según datos de la Secretaría de Estado de Servicios y Actividades Productivas de la Provincia de Tucumán - Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombes” este departamento es el tercero en producción de soja en la provincia. Los datos de inventario utilizados en esta tesina para esta localidad y para las demás localidades de la tesis, fueron suministrados por la revista “Márgenes Agropecuarios”.



Figura 11: Provincia de Tucumán. Fuente: <http://mapoteca.educ.ar/files/index.html.1.8.html>.

3.1.2.2-Salta

La provincia de Salta limita al norte con Bolivia y la provincia de Jujuy, al noreste con Paraguay, al este con las provincias de Formosa y el Chaco, al sur con Santiago del Estero, Tucumán y Catamarca y al oeste con la Cordillera de los Andes que la separa de la República de Chile (Figura 12). Posee una superficie de 155.488 km² (el 4,1% del total nacional). El territorio de la provincia de Salta se encuentra dividido en 23 departamentos. La capital de la provincia es la ciudad de Salta, donde reside el gobierno provincial. Localizada en una zona tropical, posee clima cálido, aunque con variaciones bastante marcadas en sus distintas regiones, en función de lo variado de su relieve. La orientación de sus cordones montañosos influye en la distribución de las precipitaciones. Se observan climas y paisajes contrastados principalmente según la altitud (PET, 2016).

En la región occidental (la más elevada) predomina un clima árido y frío con bruscas variaciones térmicas entre el día y la noche (e incluso si se pasa de un lugar soleado a un lugar bajo sombra), durante el siglo XX la desertificación se ha agravado quedando la vegetación natural casi reducida

a manchones de plantas xerófilas y psamófilas como la achaparrada “tola” que forma "colchones" o los grandes cactus llamados “cardones”. En la Puna y en las quebradas más secas se encuentran remanentes de un antiguo bosque de árboles bajos (churquis y queñoas), en la zona de los valles Calchaquíes apenas quedan vestigios de los densos bosques de algarrobos criollos (o “tacos”). En la zona de los valles latitudinales, los vientos húmedos del Océano Atlántico señalan una transición hacia el clima tropical húmedo, formándose en las laderas orientales una densa nimbosilva y pluvisilva que corresponde al bioma de yungas, con una enorme variedad de especies, entre las que se destacan los jacarandás (o tarcos), tipas, cebiles, molles, zapallos caspis, urundeles, guayabos etc. En la región Este predomina el clima semiárido con estación seca, con un promedio anual de lluvias del orden de los 500 mm y temperaturas medias del orden de los 20° C, habiéndose registrado temperaturas hasta de 47° C en verano y de -5° C en invierno, marcada amplitud térmica propia de los territorios continentales (De Guardia de Ponte , 2013).

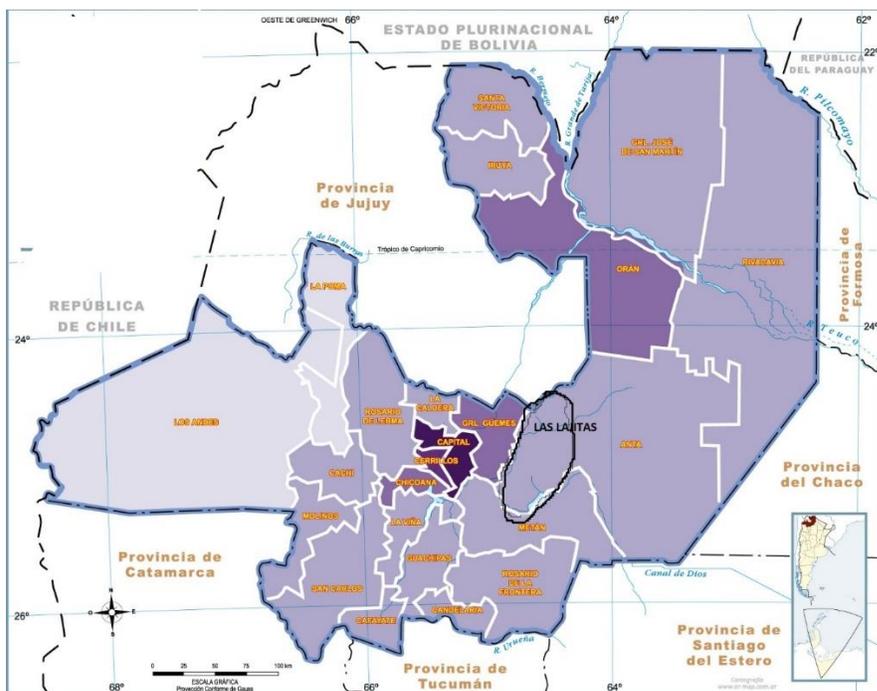


Figura 12: Provincia de Salta, puede observarse el departamento de Anta y la localidad Las Lajitas. Fuente: elaboración propia en base a <http://mapoteca.educ.ar/.files/index.html>.1.2.html

En la actualidad, la soja es el cultivo con mayor superficie y volumen de producción en Salta. Los rendimientos promedio en la provincia son de entre 2.000 a 2.500 kg./ha, con una tendencia creciente del área sembrada (Secretaría de Agroindustria,2017).La localidad estudiada en este trabajo es Las Lajitas (Figura 12), que pertenece al departamento de Anta, elegida porque concentra el 65% de la producción provincial del cultivo de soja, con 230.000 has cultivadas que estiman un volumen de 360.000 toneladas de soja (Secretaría de Agroindustria,2017) . Está ubicada a 230 km al este de la ciudad capital de Salta y su gran relevancia se debe al fuerte crecimiento productivo y a la continua incorporación de tecnología (De Guardia de Ponte, 2013). En la localidad Las Lajitas se encuentran suelos de molisoles argiustoles acuicos, con paisajes predominantemente de derrames y llanuras aluviales. Según el mapa de suelos del INTA pertenece a selvas y pastizales de altura y a la región fitogeográfica chaqueña.

3.1.2.3-Santiago del Estero

Santiago del Estero, está ubicada entre los meridianos 61° y 64° O y los paralelos 30° y 26° S. Limita al norte con las provincias de Salta y Chaco al oeste con parte de Salta, Tucumán y Catamarca, al sur con Córdoba y al este con Chaco y Santa Fe. La Provincia es una inmensa llanura que se halla ubicada a unos 200 metros sobre el nivel del mar aproximadamente. Está constituida por 27 departamentos. Se encuentra incluida, casi totalmente, en la llanura chaqueña. La mayor parte presenta relieve llano (aunque prístinamente tapizado por las densas cubiertas forestales) con algunas áreas deprimidas. Sólo una pequeña parte de su territorio, al sur y al oeste, ingresa dentro del ámbito de las Sierras Pampeanas con pequeñas lomadas como las de las Sierras de Guasayán y Sierra de Choya (al oeste) y Sierras de Ambargasta (al sudoeste, compartidas con Córdoba), más al suroeste, en los límites con Córdoba y Catamarca se encuentra una deprimida cuenca endorreica caracterizada por su aridez y la existencia de enormes salares como los del conjunto Salinas Grandes y Salinas de Ambargasta, mientras que al sudeste se encuentran áreas más deprimidas, con humedales que desembocan en la gran Laguna de Mar Chiquita o Mar de Ansenusa y las lagunas asociadas a los cráteres meteoríticos del Campo del Cielo, mientras que al noreste de la provincia corresponden zonas de Chaco Impenetrable.Toda la provincia de Santiago del Estero posee clima semitropical continental con estación seca, que se caracteriza por tener temperaturas bastante extremas y precipitaciones de abundantes a suficientes concentradas en verano. Una característica peculiar del clima es la presencia de algunos días con temperaturas anormales para la estación, por ejemplo máximas de 40 °C en pleno invierno, o temperaturas que no pasan de 30 °C en el verano. También puede decirse que la provincia es de extremos, con marcas cercanas a los 50 °C en el norte y 3 °C en el sur. Además debido a la lejanía del mar se acentúa la continentalidad, lo que resulta en baja humedad ambiental y diferencias entre el día y la noche que pueden superar fácilmente los 20 °C. La provincia se ve afectada regularmente por sequías, ya que en general las precipitaciones son escasas y prácticamente limitadas solo al verano (Santiago Tur, s.f.).

Bandera es la ciudad cabecera del departamento Belgrano (Figura 13), distante a 272 km de la Ciudad Capital. Esta localidad tiene 12.000 habitantes, un 67 % del total del departamento, elegida en este trabajo por presentar en diferentes campañas rindes de hasta 4600 kg/ha y un promedio de 3600 kg/ha en las 2.300 hectáreas que fueron sembradas con soja. Promedios históricos para la soja en Santiago del Estero, según la revista márgenes agropecuarios (2016). Los campos de la zona, comercializan unas 250 mil ha de soja que, en algunos casos, y de acuerdo a datos surgidos de Agrofyt (2017) en varios establecimientos esta legumbre rindió 3500 kg/ha.

En la localidad de Bandera se encuentran suelos haplustoles típicos, con paisajes predominantemente de derrames y llanuras aluviales. Según el mapa de suelos del INTA pertenece a relictos de monte muy abierto con pastos bajos y a la región fitogeográfica chaqueña.



Figura 13: Provincia de Santiago del Estero, departamento de Belgrano, localidad de Bandera. Fuente: Elaboración propia en base a http://mapoteca.educ.ar/files/wp-content/mapas/santiago-del-estero/politico/impresion/santiago-del-estero_politico.jpg?dl

3.1.2.4-Mendoza

Mendoza se encuentra ubicada en el centro-oeste del país. Distante 1.085 km al oeste de la Capital Federal (Buenos Aires), limita al norte con la provincia de San Juan, al este con las provincias de San Luis y La Pampa, al sur con la provincia de Neuquén y al oeste, la cordillera de Los Andes le sirve de límite natural con la República de Chile. La superficie provincial es de 150.839 km² (el 4% del territorio nacional). Mendoza presenta tres estructuras diferenciadas: las montañas andinas al oeste, las planicies hacia el este, y mesetas, sierras y volcanes en el sur. La cordillera condiciona casi toda la geografía de Mendoza, cuyo territorio se encuentra prácticamente en su totalidad situado a más de 1.000 metros sobre el nivel del mar. Las planicies del este o Travesías Cuyanas son llanuras áridas, de vegetación xerófila y con zonas de medanales. Por ella discurren los ríos Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel, aprovechados para

regadío en los oasis Norte y Sur. Presenta una leve pendiente hacia el río Desaguadero. En su extremo noroeste se encuentran las Cerrilladas Pedemontanas, las cuales separan la planicie de valles como el de Uco y debido a que están muy erosionadas adoptan formas de cuchillas (como en Tupungato), de lomas (como en Lunlunta) o de huayquerías (como en San Carlos y Rivadavia). En cuanto a la región fitogeográfica el área de estudio pertenece al Monte, con un paisaje típico de llanura pedemontana y suelos aridisoles o entisoles (DGE, 2006).

El clima, en Mendoza, en las partes más bajas, es continental semiárido, con veranos muy secos e inviernos más húmedos. La temperatura media para enero (verano) es de 24 °C, con 30 °C en el día y 18 °C en la noche, mientras la temperatura media para julio (invierno) es de 6 °C, con 12 °C en el día y 0 °C en la noche, para la capital, con 750 metros de altitud. Las precipitaciones medias anuales son de 200 mm y la temperatura media anual es de 16 °C.

La actividad por excelencia en Mendoza sigue siendo la vitivinicultura, seguida por frutales y en tercer lugar las hortalizas (Mendoza Invest, 2017). Algunos productores, atraídos por los posibles beneficios del mercado, han llevado a cabo emprendimientos para producir poroto de soja y sus derivados. Estos emprendimientos se han registrado principalmente en el departamento de Santa Rosa (además de San Rafael y Lavalle), donde se hicieron pruebas en dos fincas con más de 50 has de soja y con riego por aspersión. Los objetivos de los productores al introducir la soja en Mendoza no son solo de producción del cultivo sino de convertirlo en forraje ganadero (Gonzalez, 2013).

El municipio de Santa Rosa fue contundente al apostar por la diversificación de la matriz productiva del municipio, haciendo hincapié en la necesidad de adquirir tecnología para riego y semillas resistentes a la sequía. Creen que este cultivo puede llegar a formar parte de una rotación que se dé con otros cereales como sucede en la Pampa Húmeda, claramente con un sistema de riego eficiente. Por estos motivos, en este trabajo se eligió el departamento de Santa Rosa (Figura 14) para analizar y comparar con las demás provincias en las que ya está efectivamente instalado el cultivo.

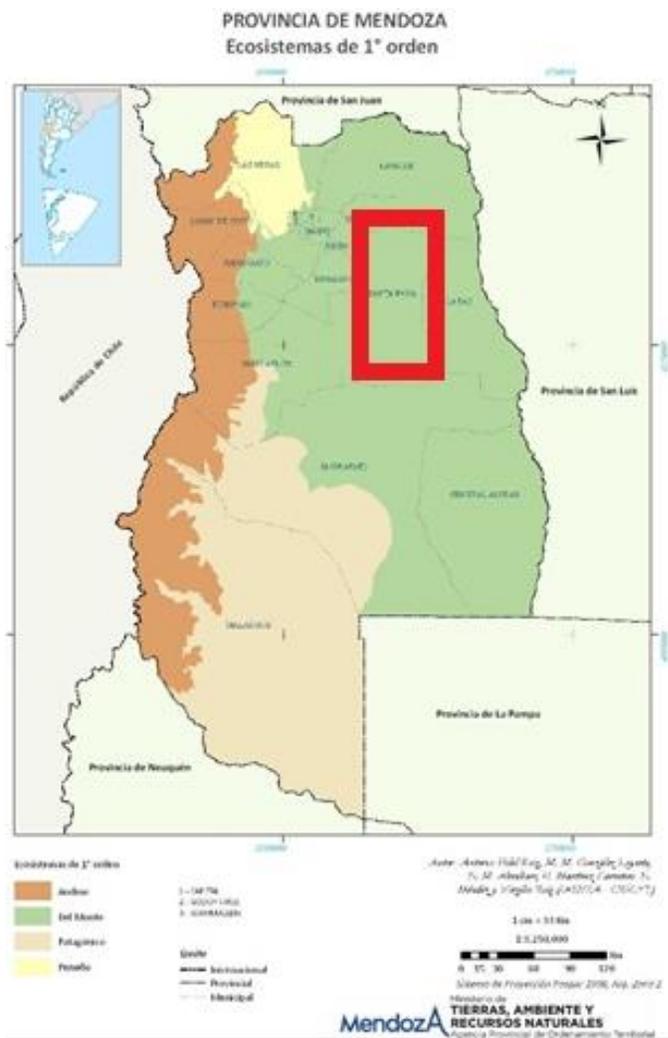


Figura 14: Provincia de Mendoza, área de estudio, Santa Rosa. Fuente: <http://www.ambiente.mendoza.gov.ar/organismos/ordenamiento-territorial/agencia-provincial-de-ordenamiento-territorial/siat/mapas-siat/>

Para el caso de Mendoza se analizaron dos hipotéticos sistemas de cultivo, derivados del trabajo de “Análisis de Rentabilidad Económica de Proyectos de Producción de Biodiesel en Mendoza” elaborado por el Instituto de Energía de la Universidad Nacional de Cuyo del año 2006, en el cual se evalúa la rentabilidad económica de la producción de soja en Mendoza. El primer sistema (de ahora en más denominado sist_1) utiliza pivote central en el riego y el segundo sistema analizado (de ahora en más sist_2) utiliza en el riego el sistema por canal discontinuo.

Los valores de inventario se elaboraron en base a información extraída del mencionado trabajo del IDE y se trabajó siguiendo los pasos de un análisis de ciclo de vida convencional, aunque se trata de valores referenciales o hipotéticos.

3.1.3 Rendimiento del cultivo

Como se observa en la tabla 1 en este trabajo se tomaron los datos de producción de soja correspondientes a la campaña 2014/2015. Estos fueron suministrados por SIIA (2016) para los

casos de estudio de Tucumán, Salta y Santiago del Estero. Para el caso de Mendoza se tomaron los datos suministrados por el análisis de rentabilidad económica de proyectos, realizado por Instituto de Energía, perteneciente a la Secretaría de Desarrollo y Territorialización de la Universidad Nacional de Cuyo, en el mismo se estiman dos rendimientos según el sistema a utilizar.

Provincia	Sembrado (ha)	Cosechado (ha)	Producción (tn)	Rendimiento (kg/ha)
TUCUMAN	198.350	195.890	413.749	3.109
SALTA	439.988	439.988	1.145.936	2.141
SANTIAGO DEL ESTERO	869.000	778.500	1.915.310	2.653
MENDOZA_1	Sin datos	Sin datos	Sin datos	3.000
MENDOZA_2	Sin datos	Sin datos	Sin datos	2.000

Tabla 1: Rendimientos del grano de soja para cada sistema productivo estudiado. Fuente: SIIA (2016), IDE UNCuyo (2006)

3.1.4. Labores agrícolas

Las labores agrícolas abarcan la inoculación de la semilla, siembra, fertilización y tratamiento de plagas y enfermedades, riego (en caso de que lo hubiera) y cosecha.

A continuación, se describe cada una de las labores agrícolas consideradas.

3.1.4.1 Siembra

La cantidad de semillas utilizadas en la siembra depende del sistema productivo implementado, del momento de siembra y de la localización geográfica del cultivo. Las semillas son transgénicas RR (Round up Ready)⁵, que es la variedad más comercializada en la Argentina.

Los datos de inventario de la cantidad de semillas utilizadas se presentan en la tabla 2 donde se puede observar la homogeneidad en la cantidad utilizada a pesar de los diferentes ecosistemas, esto debido a que se utilizan sistemas tecnológicos similares para esta labor, en este caso siembra directa.

⁵ Se denomina **soja transgénica** a cualquier variedad de soja modificada mediante técnicas de ingeniería genética para que exprese genes de otros organismos. La **soja RR (Roundup Ready)** o **soja 40-3-2** es una variedad resistente al herbicida glifosato. Se conoce como **transgénesis** al proceso de transferir genes de un organismo a otro. La transgénesis se usa actualmente para hacer plantas y animales modificados. Transgénico se refiere a una planta o a un animal en cuyas células se ha introducido un fragmento de ADN exógeno, o sea un ADN que no se encuentra normalmente en ese organismo.

Sistema	Semillas* (kg/ha)	Datos de inventario (kg/kg grano)
Tucumán	70	2,25E-02
Salta	80	3,73E-02
Santiago del Estero	80	3,01E-02
Mendoza	70	3,50E-02

*Datos de Márgenes Agropecuarios

Tabla 2: Resultados de inventario para la cantidad de semilla sembrada según el sistema productivo adoptado. Fuente: : Elaboración propia en base a Márgenes Agropecuarios y SIIA (2016)

3.1.4.2 Fertilizaciones

Dentro de los macronutrientes, las deficiencias en fósforo son comunes en nuestro país. Según datos del INTA, el 70% de la agricultura se desarrolla sobre suelos que deberían ser fertilizados con fósforo, donde existe un marcado déficit de este nutriente para la planta. Algunas de las consecuencias son la pérdida de rendimientos y el empobrecimiento del suelo si la práctica no se lleva a cabo correctamente.

A continuación se presentan (tabla 3) los datos de inventario de los fertilizantes utilizados en los sistemas estudiados

Fertilizantes Kg/Kg	Tucumán	Santiago del Estero	Salta	Mendoza1	Mendoza2
Superfosfato	1,93E-02	0,00E+00	3,97E-02	0,00E+00	0,00E+00
Urea	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-02	7,50E-02
18-46-0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-02	7,50E-02

Tabla 3: Resultado de inventario para la cantidad de fertilizantes utilizados según el sistema estudiado. Fuente: Elaboración propia en base a Márgenes Agropecuarios e Instituto de Energía de la Universidad nacional de cuyo.

3.1.4.3 Aplicación de pesticidas e inoculantes

Como norma general es recomendable realizar una inoculación⁶ de las semillas con las bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico específicas de la soja. Para ello existen preparados comerciales que pueden utilizarse con garantía y que se entregan al cultivador con la semilla. La soja es una planta poco agresiva y por lo tanto muy sensible a la competencia con las malezas, durante las fases iniciales de su desarrollo. Las especies invasoras compiten por el agua, la luz y los elementos nutritivos, ocasionando posteriormente dificultades para la recolección mecánica del grano y perjudicando la calidad final del producto (INTA, 2015).

Por ello, para el control de estas malas hierbas se emplean tres técnicas o métodos de lucha:

⁶ La inoculación es una práctica que busca lograr la adherencia efectiva de un alto número de bacterias fijadoras de Nitrógeno (Azospirillum y Micorrizas) sobre la superficie de las semillas de leguminosas y gramíneas previo a la siembra de las mismas. Las bacterias infectan las raíces una vez germinada la semilla y se produce la formación de un sistema radicular eficiente, dentro de las cuales se ubican las bacterias y comienzan a fijar Nitrógeno del aire haciéndolo aprovechable para la planta. Este proceso se denomina Fijación Biológica de Nitrógeno.

- Métodos culturales. Consiste en usar prácticas del manejo que proporcionen al cultivo una mayor competencia con las malas hierbas.
- Control mecánico. Consiste en el empleo de aperos (arados, gradas, cultivadores, azadas, etc.) antes de la siembra y de la floración.
- Control químico. Es el más empleado. Las materias activas más empleadas son trifluralina, etalfluralina, alacloro y linurón. Son sustancias de aplicación en presiembra, y que se emplearán según las indicaciones del fabricante. También se pueden realizar aplicaciones postsiembra, con una mezcla comercial de alacloro y linurón, disueltos en riego por aspersión. El glifosato se utiliza para el control de malezas cuando se encuentra en la etapa de barbecho o en algunas ocasiones en pre siembra.

En este trabajo se consideraron las técnicas del tercer tipo, el control químico es el más empleado en los diferentes sistemas.

Las plagas más comunes que afectaron este cultivo en la región del noroeste argentino son el tizón de la hoja y mancha púrpura de la semilla (causado por *Cercospora kikuchii*), la mancha anillada (*Corynespora cassiicola*), la mancha marrón (*Septoria glycines*) y la roya asiática de la soja (*Phakospora pachirhizi*) fueron las enfermedades de mayor importancia que afectaron la parte aérea del cultivo. Con respecto a los patógenos de suelo que afectan a tallo y raíces, el complejo de *Fusarium* causante de la muerte súbita fue el más prevalente. Entre los patógenos de semillas se detectaron con mayor incidencia *Fusarium* spp. Y hongos del complejo *Diaporthe/Phomopsis* (De Lisi et al, 2017).

En la Tabla 4 Se detallan los datos de inventario según los agroquímicos utilizados para cada uno de los escenarios evaluados.

Insumos	Dosis (kg agroquímico/Kg de soja)				
			Santiago del Estero	Mendoza	
	Tucumán	Salta		Sistema 1	Sistema 2
Glifosato	1,61E-03	3,74E-03	2,64E-03		
2,4 D	3,22E-04		1,88E-04		
Coadyuvante	2,57E-04		3,77E-04		
Regent ET	6,43E-05	1,12E-04			
Inoculante c/50 kg.	2,57E-05	7,47E-04	6,03E-04		
Cipermetrina	3,86E-05				
Endosulfan	1,61E-04				
Opera	1,61E-04	2,33E-04	1,88E-04		
Connect		3,50E-04	2,83E-04		
Clorpirifos 48 %		2,80E-04	2,26E-04		
Intrepid		5,60E-05	4,52E-05		
Karate Zeon 5%		1,73E-04	4,71E-05	3,33E-05	5,00E-05
Roundup					
Controlmax		5,14E-04			
Metsulfuron Metil			1,51E-06		
Trifluralina				1,00E-03	1,50E-03
Glifosato Premium					
Carbaryl					

Tabla 4: Resultados de inventario para el uso de agroquímicos en los sistemas estudiados.
Fuente: Elaboración propia en base a Márgenes Agropecuarios e Instituto de Energía de la Universidad nacional de cuyo.

3.1.4.5 Riego

Según Morábito et al. (2015) en el año 2012 Argentina registraba un total 405.600 ha regadas con pivote en cultivos como soja, trigo y maíz entre otros. Actualmente se registran más de 2 millones de ha regadas donde el mayor porcentaje se da en riego por sistema gravitacional y el resto, aproximadamente 630.000 ha por pivote.

En los sistemas estudiados del Noroeste no se utiliza riego, sino que se trabaja como cultivo de secano, aprovechando la gran cantidad de lluvias estivales. En el caso de Mendoza, se tomaron dos sistemas de riego, el primer sistema regado por pivote central y el segundo con riego por canal discontinuo. Según datos de Morabito (2015) la eficiencia del primer sistema es de 82% utilizando 48 m³/ha y del segundo 40% utilizando 24 m³/ha.

3.1.5. Consumo de combustible y energía

Los datos de inventario para el combustible y la energía utilizada en las labores agrícolas se presentan en la tabla 5. Estos valores fueron estimados en base al consumo de diésel promedio de la maquinaria utilizada (Jungbluth et al., 2007) y a las tareas realizadas en cada sistema productivo. En la producción del diésel no se contabilizan los flujos de entrada y salida de la fracción de biodiésel correspondiente al corte obligatorio establecido por la Ley Nacional N° 26.093. Se considera que el agua para riego es suministrada por una perforación que cuenta con una electrobomba sumergible y tiene una demanda de energía de 40 kWh (Martelloto et al., 2005).

Sistema Productivo	Datos de inventario Diésel (kg/kg grano)
Tucumán	
Siembra y fertilización	1,77E-03
Aplicación de herbicidas y pesticidas	2,41E-03
Cosecha	3,42E-03
Total	7,60E-03
Salta	
Siembra y fertilización	2,57E-03
Aplicación de herbicidas y pesticidas	4,20E-03
Cosecha	4,96E-03
Total	1,17E-02
Santiago del Estero	
Siembra y fertilización	2,08E-03
Aplicación de herbicidas y pesticidas	2,83E-03
Cosecha	4,00E-03
Total	8,91E-03
Mendoza	
Sistema 1	
Preparación del terreno	7,90E-02
Siembra	4,27E-02
Fertilización/curación	1,83E-02
Cosecha	9,77E-01
Total	1,12E+00
Sistema 2	
Preparación del terreno	1,98E-01
Siembra	5,13E-02
Fertilización/curación	2,52E-02
Cosecha	5,86E-01
Total	8,61E-01

Tabla 5: Resultados de inventario de combustible y energía consumidos en los distintos sistemas productivos de soja. Fuente: Elaboración propia en base a Márgenes Agropecuarios e Instituto de Energía de la Universidad nacional de cuyo.

3.1.6. Transporte de insumos y materias primas

Los datos sobre transporte para realizar el inventario se realizaron en base a Piastrellini (2015) que indica que:

- la semilla RR se produce en Buenos Aires y Santa Fe, y se distribuye al resto de las provincias;
- el 17% de los inoculantes se fabrican en el país y el resto se importan desde Bélgica, Israel y España

-el 66,1% de los fertilizantes nitrogenados se producen en Argentina, el resto se importan desde Estados Unidos y Rusia;

-los fertilizantes fosforados se importan en un 81,3%, principalmente desde Estados Unidos, Rusia, Marruecos, China y Túnez;

-el 88% de la producción de pesticidas se realiza en Argentina, el resto se importa desde Brasil, India, China, Estados Unidos, Israel y Francia.

En el transporte de los productos de origen nacional se consideró una distancia en camión de 28 t desde Buenos Aires hasta el sitio de producción agrícola. Para los productos importados se considera la distancia desde la ciudad de origen hasta la zona de producción. A continuación se presenta la tabla de inventario correspondiente al transporte de insumos agrícolas (Tabla 6)

Sistema Productivo	Datos de inventario (tkm/kg grano)		
	Fertilizantes	Pesticidas/Fungicidas	Semillas
Tucumán	1,74E-01	4,81E-03	2,81E-02
Salta	3,52E-01	1,64E-02	4,80E-02
Santiago del Estero	0,00E+00	1,16E-02	2,84E-02
Mendoza			
Sistema 1	4,54E-01	1,23E-03	2,30E-02
Sistema 2	6,81E-01	1,84E-03	3,45E-02

Tabla 6: Resultados de inventario del transporte de fertilizantes, fungicidas, pesticidas y semillas para cada sistema productivo considerado. Elaboración propia en base a Márgenes Agropecuarios e Instituto de Energía de la Universidad nacional de cuyo.

3.1.7. Ocupación del suelo

En cuanto a la ocupación del suelo, en este trabajo se estudian localidades ubicadas dentro de las ecorregiones de Las Yungas, en el caso de Tucumán, con paisaje de llanura pedemontana; lo que corresponde a ocupación arable no irrigado, transformándose a tierra de cultivo. En el caso de Salta y Santiago del Estero la región fitogeográfica es la Chaqueña con un paisaje de derrames y llanuras aluviales; lo que corresponde a ocupación arable no irrigado, transformándose a tierra de cultivo. Mendoza se encuentra dentro de la región fitogeográfica del Monte con un paisaje de llanura pedemontana; lo que corresponde a ocupación arable irrigado, transformándose a tierra de cultivo.

En la siguiente tabla se muestran los valores de inventario para la transformación de suelo.

Sistemas	Datos de Inventario (m ²)
Tucumán	3,22E-04
Salta	4,67E-04
Santiago del Estero	3,77E-04
Mendoza sist_1	3,33E-04
Mendoza sist_2	5,00E-04

Tabla 7: Resultados de inventario para transformación de suelo en tierras de cultivo. Fuente: Elaboración propia en base a los valores de rendimiento de cultivo publicados por SIIA (2016)

3.1.8. Emisiones a la atmósfera

En años recientes se ha detectado una deficiencia generalizada de N y una seria reducción de materia orgánica en los suelos con cultivo continuo. La capacidad agrícola de los suelos para suministrar nutrimentos a las plantas se ha mantenido por la adición de dosis crecientes de fertilizantes químicos; anualmente se consumen cerca de 150.000 t N (Cordone, 2004).

Estudios con técnicas convencionales e isotópicas (^{15}N) muestran que la eficiencia en el uso de los fertilizantes N en los principales cultivos es de 20% a 40%; por tanto, se fugan del sistema agrícola cerca de 90.000 t N/año. Además, este N no recuperado por los cultivos perjudica la calidad ambiental, por contaminación del agua por la lixiviación de nitratos (NO_3^-) y emisión de amoníaco (NH_3) y óxidos de nitrógeno (NOX) a la atmósfera. Las emisiones globales de óxido nitroso (N_2O) se deben en 90% a procesos microbiológicos. La desnitrificación (reducción de NO_3^- a NO, N_2O o N_2) y nitrificación (oxidación de NH_4^+ a NO_3^-) son los principales procesos microbianos involucrados en la producción de óxido nítrico (NO), N_2O o N_2 . Los NOX reaccionan muy fácilmente con la humedad atmosférica y forman HNO_2 (ácido nitroso) y HNO_3 (ácido nítrico), contribuyendo al proceso de acidificación. Por otro lado, el NH_4^+ (amonio) contenido en los fertilizantes puede convertirse fácilmente en NH_3 y ser liberado a la atmósfera, favoreciendo la acidificación y la eutrofización en ecosistemas vulnerables. Las actividades agrícolas contribuyen con 18% (2.1 t N/año) de la emisión total. Las tasas de emisión de estos gases al ambiente son altamente dependientes de las condiciones del suelo y prácticas culturales; consecuentemente, el manejo del suelo es clave para reducir la emisión, aunado a la disminución de los costos de la fertilización nitrogenada (Janzen et al, 1998).

En la Tabla 8 se presentan los resultados de inventario para las emisiones NOX y NH_3 a la atmósfera, resultantes de la aplicación de fertilizantes minerales durante la producción de soja. Tal como propone Piastrellini (2015), para las emisiones de NOX se adopta la relación NOX/ N_2O equivalente a 0,21; mientras que para las emisiones de NH_3 se utiliza un factor de emisión de 4% correspondiente a fertilizantes minerales que aportan fósforo y nitrógeno (fertilizantes N-P).

Sistema	Emisiones a la Atmósfera	
	kg NOX/kg grano	kg NH_3 /kg grano
Tucumán	6,03E-05	0,00E+00
Salta	6,86E-05	0,00E+00
Santiago del Estero	6,35E-05	0,00E+00
Mendoza	2,49E-04	1,54E-03

Tabla 8: Resultados de inventario de las emisiones de NH_3 y NOX a la atmosfera, según diferentes sistemas agrícolas. Fuente: Elaboración propia en base a los valores de rendimiento de cultivo publicados por SIIA (2016) y dosis aplicadas, valores provenientes de revista Márgenes Agropecuarios (2017).

3.1.9. Emisiones al agua

Si la cantidad de agua utilizada en riego excede lo que el cultivo necesita, comienza un proceso de saturación del suelo. Esta agua sobrante comienza a infiltrarse en las capas inferiores pudiendo llegar a las napas subterráneas, y en este arrastre, estas aguas suelen llevar consigo NO_3^- provenientes de fertilizantes, contribuyendo a un proceso denominado eutrofización. En este mismo proceso parte de los fosfatos (PO_4^{3-}) también pueden llegar a las napas y perderse por lixiviación, escorrentía o erosión hídrica (FAO, 2011).

Siguiendo las consideraciones de Piastrellini (2015), las emisiones de NO_3^- y PO_4^{3-} al agua se estimaron en función de la tasa de aplicación de fertilizantes, utilizando los siguientes factores de emisión: 32% para emisiones de NO_3^- a aguas subterráneas; 1,67% para emisiones de PO_4^{3-} a aguas superficiales; y 0,13% para emisiones de PO_4^{3-} a aguas subterráneas. Los resultados de inventario se muestran en la Tabla 9.

Sistema	Emisiones al Agua kg NH_3 /kg grano		
	NO_3^- al agua subterránea	PO_4^{3-} al agua subterránea	PO_4^{3-} al agua superficial
Tucumán	0,00E+00	1,15E-03	0,00E+00
Salta	0,00E+00	2,37E-03	0,00E+00
Santiago del Estero	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Mendoza	1,23E+00	3,59E-03	4,61E-02

Tabla 9: Resultados de inventario de las emisiones de NO_3^- y PO_4^{3-} al agua, según diferentes sistemas agrícolas. Fuente: Elaboración propia en base a los valores de rendimiento de cultivo publicados por SIIA (2016) y dosis aplicadas, valores provenientes de revista Márgenes Agropecuarios (2017).

3.1.10 Uso de agua para riego

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos en el inventario proveniente del uso de agua de riego. Solo en la provincia de Mendoza se obtuvieron datos diferentes de cero, ya que en los demás sistemas estudiados no se riega.

Sistemas	Datos de Inventario (m^3)
Tucumán	0,00E+00
Salta	0,00E+00
Santiago del Estero	0,00E+00
Mendoza sist_1	1,60E-02

Tabla 10: resultado del uso de agua de riego en las provincias estudiadas. Elaboración propia en base a datos del IDE (2006).

3.2. Etapa industrial

Para la etapa industrial se utilizaron los datos obtenidos por Piastrellini (2015), para todas las localidades estudiadas. Si bien este estudio se centró en la Región Pampeana, los datos industriales corresponden a las tecnologías más utilizadas en Argentina para producir aceite y biodiesel de soja. Por lo tanto, se consideran representativos de las plantas industriales abordadas en esta tesis.

La etapa industrial consta de tres procesos principales: acondicionamiento del grano, extracción de aceite y síntesis de biodiesel, los cuales se describen a continuación.

3.2.1. Acondicionamiento del grano de soja

La semilla de soja a ser procesada debe estar limpia y con una humedad ideal de 10,5-11%. La semilla que entra al proceso de extracción, lo hace con las condiciones de comercialización generalmente. Es decir, tiene un zarandeo previo y una humedad máxima de 13,5%. Para este secado se utiliza gas natural o gas licuado. Las semillas limpias son quebradas utilizando rolos dentados y reducidas a partículas de 1/8 del tamaño original, para facilitar la operación del laminado. Como resultado del descascarado se obtienen 4,4 kg de cáscaras cada 100 kg de grano, las cuales son incorporadas a la harina y a los pellets⁷ de soja durante la etapa de extracción de aceite. Luego se somete a los granos quebrados a un proceso de cocinado que se realiza calentándolos a una temperatura de entre 50-70 °C, utilizando calor de vapor de agua sin que este los toque. El calentado antes del laminado reduce el consumo de energía en el mismo. Además se inactivan la mayoría de las enzimas a excepción de la ureasa y la antitripsina (Piastrellini, 2015).

Una vez quebrado y cocinado, el grano de soja, pasa por las laminadoras en donde se modifica su forma a la de una lámina de pequeño espesor (0,25-0,35mm). La principal función del laminado es romper los vacuolos que contienen aceite para luego facilitar el proceso de extracción (INTA, 2015).

En la tabla 11, se presentan los resultados de inventario del proceso de acondicionamiento del grano

	Datos de Inventario (cantidad/MJ)
Entradas	
Grano de soja (Kg)	1,90E-01
Gasoil (l)	2,77E-03
Gas Natural (MJ)	1,58E-02
Gas Licuado de Petróleo (l)	1,69E-04
Salidas	
Grano de soja seco (Kg)	1,72E-01
Cáscaras (Kg)	8,01E-03
Vapor de agua (Kg)	1,03E-02

⁷ Los pellets son los comprimidos (cilindros) provenientes de los residuos de la extracción del aceite de los granos. El largo y el diámetro de los comprimidos podrán ser de cualquier medida, salvo estipulaciones expresas en el boleto de compra-venta." Entonces, de acuerdo a la normativa, cuando se hace referencia a "expeller" se trata del material de extracción por prensado, "harina" es el material obtenido por solvente y "pellets" se denomina a la forma física (comprimidos) de presentación de estos subproductos. SAGPyA, Norma XIX: 317/99.

Tabla 11: Resultados de inventario del proceso de secado y acondicionamiento del grano.
Fuente: Piastrellini (2015).

3.2.2. Extracción y refinado de aceite de soja

El material ya expandido y con una temperatura cercana a los 60 ° C ingresa al extractor. En el mismo se realiza un lavado del material con un solvente (hexano) que diluye el aceite arrastrándolo y dejando la harina desengrasada (1,5 L de hexano por t de grano). Del extractor sale por un lado harina desengrasada mojada en solvente, y por otro lado una mezcla de aceite y solvente que se llama miscela. La harina tiene un resto de 25% de solvente. Y la miscela tiene una proporción de 25% de aceite y un 75% de solvente. La miscela pasa a un proceso de destilación, mediante el cual se separa el aceite del solvente. En este proceso se calienta la miscela a temperaturas superiores al punto de evaporación del solvente en presencia de vacío, entonces el solvente se evapora dejando el aceite libre de este. El solvente en estado de vapor se enfría luego volviéndolo al estado líquido, formándose un circuito cerrado en el que el solvente es usado para otro ciclo de extracción. La tolerancia de residuos de solvente en el aceite, para su comercialización, es de 200 ppm (Errasquin et.al, s.f).

El aceite destilado lleva en su masa algunos elementos que son indeseables y que dificultan su almacenaje y posterior utilización. Estos elementos son derivados del fósforo, llamados fosfátidos, que tienen la particularidad de combinarse con el agua formando compuestos de gruesa viscosidad. Esta propiedad se usa para efectuar su separación (desgomado): se agrega al aceite un 2% de agua y en algunos casos algo de ácido cítrico, luego esta emulsión se hace pasar por una clarificadora centrífuga que separa los compuestos de alta densidad (gomas) del aceite (Piastrellini, 2015).

Durante el proceso de refinado, el aceite pasa por las siguientes etapas:

- Neutralización
- Decoloración
- Desodorización

Neutralización: en esta etapa el aceite previamente calentado es tratado con una solución alcalina (soda cáustica), para bajar los niveles de acidez y la oxidabilidad de los aceites. Esto se logra eliminando los ácidos grasos libres.

Decoloración: una vez neutralizado se procede al decolorado o blanqueado del aceite. Para esto el aceite es tratado con arcillas decolorantes donde se elimina la clorofila y los pigmentos carotenoides, hasta ajustar los colores a las especificaciones de calidad.

Desodorización: este proceso se realiza para eliminar sustancias como aldehídos y cetonas que causan olores desagradables. Esto lo logran tratando el aceite a altas temperaturas (240-250 °C) en columna de vacío y con un arrastre de vapor de agua. Hay que evitar tratamientos prolongados ya que hay peligro de originar una polimerización.

Un esquema general del proceso de acondicionamiento del grano y de extracción del aceite de soja se muestra en la figura 15. Los resultados de inventario para los insumos y materias primas se presentan en la tabla 12.

Materia prima/insumos	Datos de inventario (cantidad/MJ)
Grano de soja seco (kg)	1,72E-01
Cáscaras (kg)	8,01E-03
Hexano* (kg)	0,00E+00
Bentonita (kg)	3,95E-04
Ácido fosfórico (kg)	2,90E-05
Agua de red (kg)	1,47E-02
Gas Natural (MJ)	2,15E-02
Energía eléctrica (kWh)	5,25E-04

* el hexano se recupera, reingresa al sistema y se asume que no hay pérdidas

Tabla 12: Resultados de inventario de insumos y materias primas correspondientes al proceso de extracción de aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015)

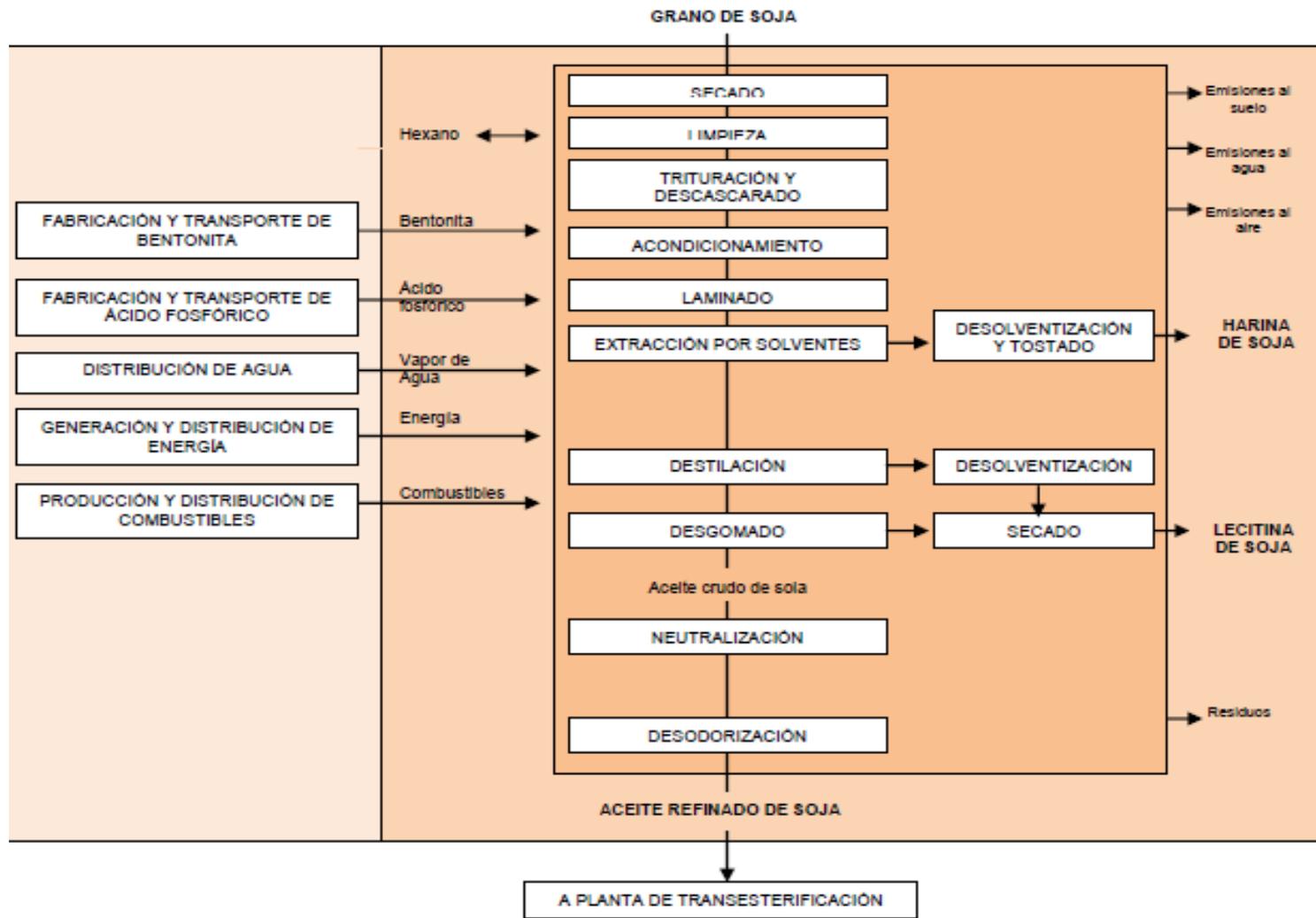


Figura 15: Esquema del proceso de secado y acondicionamiento del grano, y del proceso de extracción y refinado de aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015)

3.2.3. Síntesis del biodiésel de soja

La reacción más utilizada en la industria para la producción de biodiésel es la transesterificación (Figura 16). En esta reacción los triglicéridos reaccionan con un alcohol (metanol o etanol) para dar como resultado mono-alkil-ésteres y glicerol. Esta reacción se realiza en presencia de un catalizador básico debido a que éste es el que presenta mejor rendimiento y mayor velocidad de reacción en condiciones moderadas de presión y temperatura. Luego de la reacción, el biodiésel crudo presenta un alto contenido de alkil-ésteres, pero además presenta impurezas tales como jabones, catalizador, agua, metales, alcohol y glicerol libre, que deben ser eliminados en posteriores etapas de purificación. El proceso de purificación consiste en lavar el biodiésel resultante de la reacción para eliminar las impurezas presentes. En una primera etapa se utilizan soluciones de ácidos para neutralizar el catalizador, evitar saponificación y formación de emulsiones por acción de los jabones formados en la etapa de transesterificación. La segunda etapa es para eliminar el ácido remanente de la primera etapa de lavado y terminar de extraer impurezas. Se han desarrollado también adsorbentes sólidos de diferente naturaleza, como los silicatos y resinas de intercambio iónico (Figura 17) (Piastrellini, 2015).

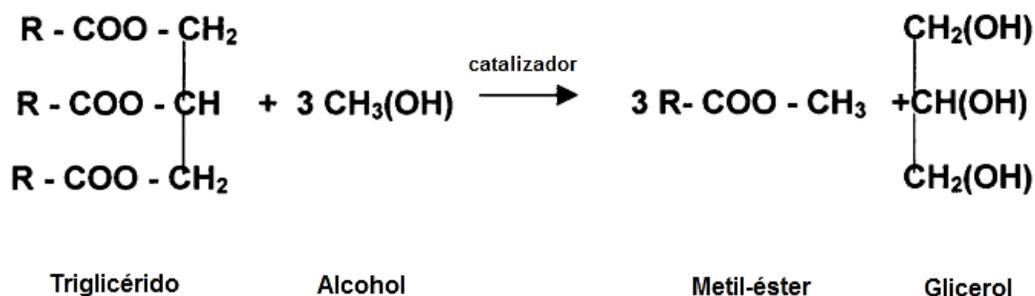


Figura 16: Reacción de transesterificación. R: radical alquilo. Fuente: Piastrellini (2015).

En la Tabla 13 se presentan los resultados de inventario de los insumos y materias primas del proceso de transesterificación. Para ello se considera que por cada tonelada de biodiésel obtenido se necesitan 1,12 t de aceite de soja, 380 kg de metanol, 6,4 kg de hidróxido de sodio, 6,4 kg de ácido sulfúrico, 344 kg de vapor de agua, 25,6 m³ de gas natural y 45,5 kWh de energía eléctrica (Huerga *et al.*, 2009; Jungbluth *et al.*, 2007). Un esquema del proceso de transesterificación alcalina se presenta en la figura 16.

Materias primas/insumos	Datos inventario (cantidad/MJ)
Aceite refinado de soja (kg)	2,99E-02
Hidróxido de sodio (kg)	1,71E-04
Metanol (kg)	1,01E-02
Ácido sulfúrico (kg)	1,71E-04
Agua de red (kg)	9,17E-03
Gas natural (MJ)	2,12E-02
Energía eléctrica (kWh)	1,21E-03

Tabla 13: Resultados de inventario de materias primas e insumos utilizados durante el proceso de transesterificación del aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015).

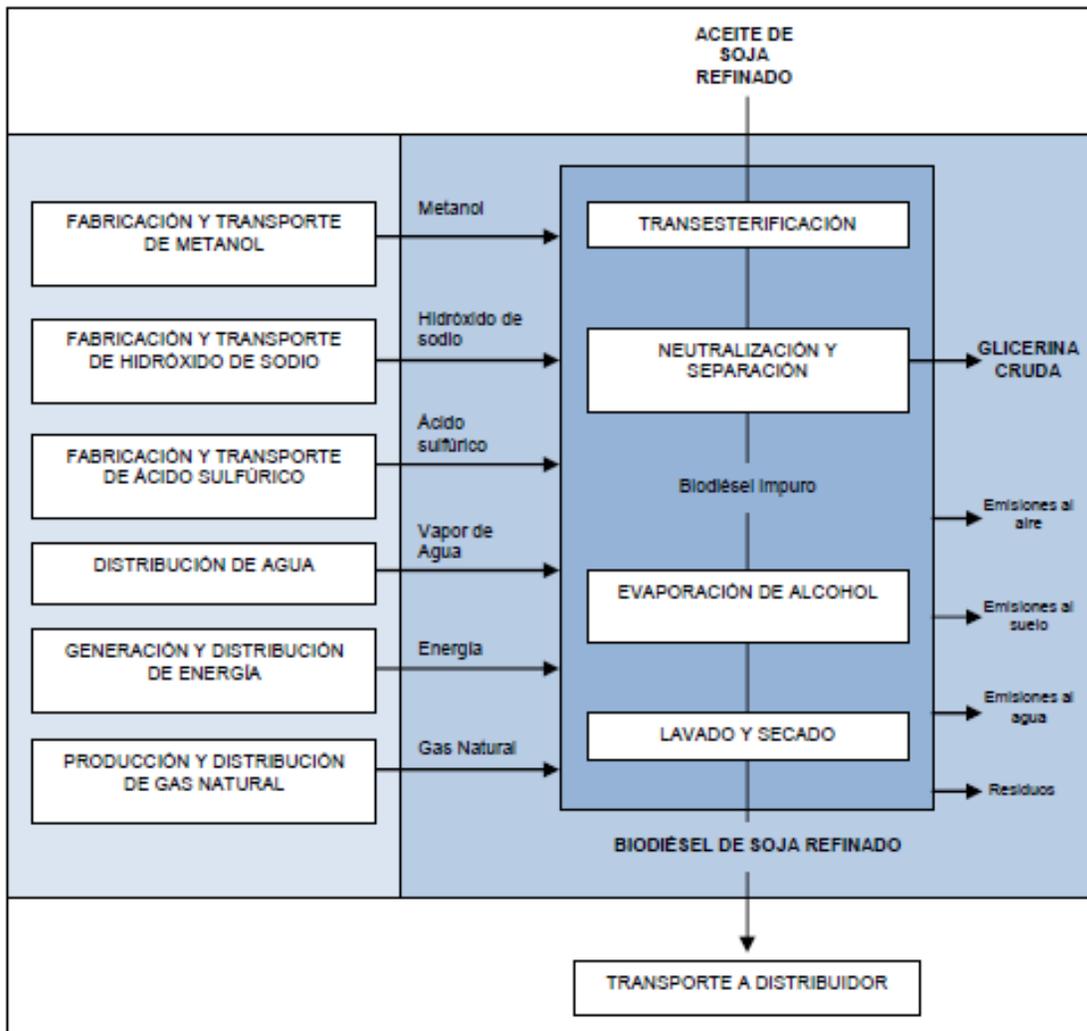


Figura 17: Esquema de obtención de biodiésel de soja por transesterificación alcalina. Fuente: Piastrellini (2015).

3.2.4. Transporte de materias primas e insumos

La distancia desde la zona de producción del grano de soja hasta las plantas procesadoras de biodiésel varía según la localidad estudiada. Para el caso de Tucumán, Salta y Santiago del Estero se utilizó la planta de VILUCO SA ubicada en la provincia de Santiago del Estero. Para el caso de Mendoza se utilizó la planta PITEY SA, ubicada en San Luis. Las distancias se midieron utilizando la aplicación google maps y se muestran a continuación en la tabla 14. Se consideró que el traslado se realizaba en camiones de 28 t.

Sistema	Distancia a planta (km)
Tucumán	137
Salta	518
Santiago del Estero	407
Mendoza	401

Tabla 14: Distancia desde la zona de producción del grano de soja a la planta productora de biodiesel. Fuente: Google maps (2018)

Los datos del transporte de los insumos requeridos en los procesos de extracción de aceite y transesterificación se toman de Piastrellini (2015). Se presenta en la tabla 15 los resultados de inventario del transporte de insumos y materias primas de la etapa industrial.

Datos de inventario (tkm/MJ)	
Transporte del grano de soja	
Tucumán	1,99E+01
Salta	1,25E+02
Santiago del Estero	7,90E+01
Mendoza_1	6,02E+01
Mendoza_2	9,03E+01
Transporte insumos extracción de aceite	
Bentonita	
Camión 28t	5,92E-05
Flete corto	1,18E-05
Ácido fosfórico	
Camión 28t	4,35E-06
Flete corto	8,70E-07
Transporte insumos transesterificación	
Hidróxido de sodio	
Camión 28t	2,56E-05
Flete corto	2,12E-06
Metanol	
Camión 28t	1,52E-03
Flete corto	3,04E-04
Ácido sulfúrico	
Camión 28t	2,56E-05
Flete corto	5,12E-06

Tabla 15: Resultados de inventario para el transporte de materias primas e insumos de la etapa industrial. Fuente: Elaboración propia en base a datos de Google maps y Piastrellini (2015).

3.2.5. Efluentes industriales

Durante el proceso de extracción de aceite de soja se generan 2,7 kg de efluentes líquidos por tonelada de grano que ingresa al sistema, mientras que durante el proceso de transesterificación del metil éster se producen 58,7 kg de efluentes por tonelada de aceite refinado (Piastrellini 2015). Se asume que estos efluentes son tratados en una planta local, diseñada para tal fin. Los resultados de inventario se presentan en la tabla 16.

Etapa	Efluentes líquidos tratados (m ³ /MJ)
Extracción de aceite	4,63E-07
Síntesis de biodiesel	1,75E-06

Tabla 16: Resultados de inventario de los efluentes líquidos industriales generados durante la producción de biodiesel a partir de aceite de soja. Fuente: Piastrellini (2015).

CAPÍTULO 4: COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DEL BIODIÉSEL DE ACEITE DE SOJA PRODUCIDO EN ARGENTINA

Los resultados de la evaluación de impactos del biodiésel de soja elaborado en Argentina se estiman a partir de los datos de inventario detallados en el capítulo anterior, para cada uno de los sistemas productivos analizados. En esta fase se considera el balance energético y el potencial de emisión de gases de efecto invernadero. El balance de energía se evalúa a través de la Tasa de retorno de energía (índice EROI) según la metodología detallada anteriormente, teniendo en cuenta: i) el consumo energético: energía proveniente de fuentes fósiles requerida para producir el biodiésel, y ii) la energía generada: contenido energético del biocombustible y de los coproductos, expresado como PCI. El potencial de emisiones de gases de efecto invernadero se evalúa a través de la metodología desarrollada por el Panel intergubernamental para cambio climático (IPCC)⁸. Las Directrices del IPCC reflejan los requisitos internacionales de calidad de los datos definidos por la UNI ISO 14064, con el objetivo de construir inventarios que sean consistentes, comparables, completos, precisos y transparentes; esto, por su parte, permite que la calidad del inventario mejore con el tiempo. El sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use, siglas que corresponden al término en inglés) se ocupa de las emisiones y absorciones antropogénicas de GEI, definidas como todas las emisiones y absorciones que ocurren en las “tierras gestionadas” y que están asociadas con el uso de la tierra, incluidas la agricultura y la cría animal. La tierra gestionada es una tierra donde se han aplicado intervenciones y prácticas humanas para llevar a cabo funciones productivas, ecológicas o sociales (IPCC, 2006).

Estos procesos implican transformaciones de carbono y nitrógeno, dirigidas por procesos biológicos (actividad de microorganismos, plantas y animales) y físicos (combustión, lixiviación y escorrentía).

Las estimaciones de las emisiones y absorciones de GEI procedentes del sector AFOLU incluyen:

- Las emisiones y absorciones de CO₂ que resultan de las variaciones de las reservas de carbono en la biomasa, materia orgánica muerta (MOM), materia orgánica del suelo (MOS) de suelos

⁸ El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC es el principal organismo internacional encargado de la evaluación del cambio climático. Fue establecido conjuntamente en 1988 con el objetivo de abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas. En el mismo año, la creación conjunta del IPPCC fue aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas. Una de las principales actividades desempeñadas por el IPCC es la preparación de Informes de Evaluación completos sobre el estado del conocimiento científico, técnico y socioeconómico del cambio climático, sus causas, impactos potenciales y estrategias de respuesta. La publicación más reciente e importante son las Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. El TFI (Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, por sus siglas en inglés), equipo especial sobre los inventarios nacionales GEI del IPCC con base en Japón, es el órgano ejecutivo para el mejoramiento del Programa de Inventarios Naciones de Gases de Efecto Invernadero del IPCC.

orgánicos y minerales, y productos de madera recolectada (PMR) para todas las tierras gestionadas;

- CO₂ procedente de los suelos orgánicos cultivados;
- Emisiones distintas del CO₂ provenientes de incendios en toda la tierra gestionada;
- Emisiones de CH₄ procedentes del cultivo del arroz;
- Emisiones de N₂O de todos los suelos gestionados;
- Emisiones de CO₂ asociadas con la aplicación de cal y urea a los suelos gestionados;
- Emisiones de CH₄ que provienen de la fermentación entérica del ganado;
- Emisiones de CH₄ y N₂O procedentes de los sistemas de gestión del estiércol.

Los flujos de los gases de efecto invernadero pueden ser estimados de dos formas:

- Como cambios netos en las reservas de carbono en el tiempo (usada para la mayoría de flujos de CO₂)
- Directamente, como tasas de flujo del gas hacia y desde la atmósfera (usada para la estimación de gases no-CO₂)

El IPPCC contempla los gases de efecto invernadero para los cuales se conoce el potencial de calentamiento atmosférico, por ello el vapor de agua, a pesar de ser el más importante GEI, queda excluido del alcance de esta metodología (IPCC, 2006).

Para la evaluación de las categorías de impacto se utilizó como herramienta el software SimaPro 8 (System for Integrated environmental Assessment of PROducts), desarrollado por Dutch PRé Consultants.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para ambas categorías, analizando en primer lugar las provincias en las que actualmente se cultiva soja (Tucumán, Santiago del Estero y Salta), y luego los dos escenarios hipotéticos para Mendoza. Finalmente, los resultados hallados se comparan con valores de impacto correspondientes a la Región Pampeana, extraídos de literatura.

4.1 Análisis energético

En el Anexo I se muestran en detalle los resultados del balance energético del biodiesel de soja. Los resultados arrojaron que ninguno de los escenarios planteados en esta tesina produce una ganancia de energía neta.

En las provincias analizadas el índice EROI es menor que uno esto significa que el sistema no está generando energía, debido a la baja eficiencia energética de las tecnologías utilizadas o al gran requerimiento de insumos y energía necesarios para mejorar los rendimientos de producción. Lo ideal en estos casos sería que fuera mayor que uno, ya que mostraría que el sistema está funcionando correctamente y, por lo tanto, sería sustentable sustituir al combustible tradicional o fósil por el biocombustible.

En todos los sistemas productivos estudiados, la mayor parte de la energía consumida corresponde al proceso agrícola. Por lo tanto, las diferencias observadas en el índice EROI se asocian directamente con las prácticas de manejo del cultivo.

4.1.1 Provincias productoras de soja: Tucumán, Santiago del Estero y Salta

Dentro de las provincias donde actualmente se cultiva soja el sistema mejor ranqueado, como puede observarse en la Figura 17, es el de la provincia de Tucumán con un valor de EROI de 0,77; mientras que el peor escenario es el de la provincia de Salta cuyo valor de EROI es 0,22.

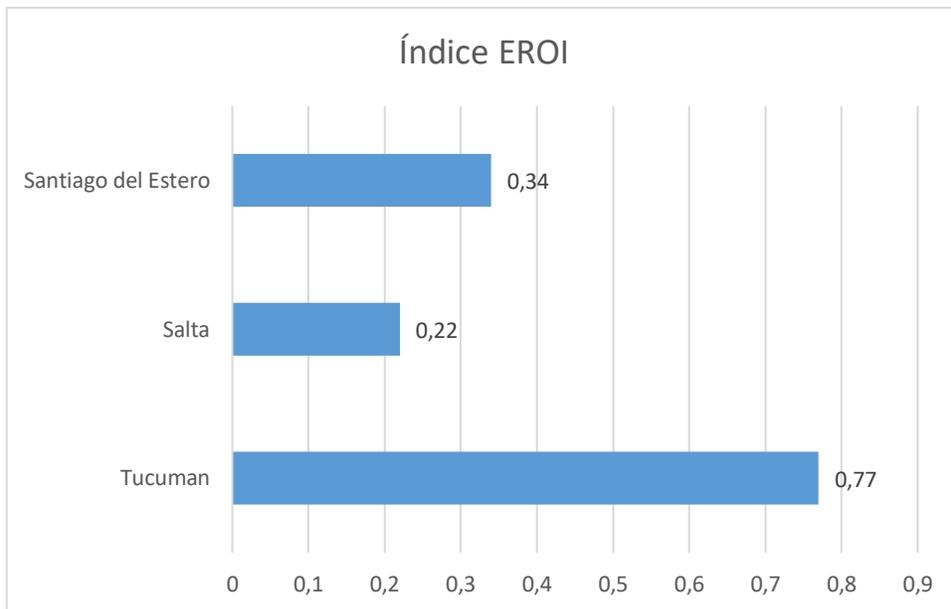


Figura 18: Índice EROI de las provincias de Santiago del Estero, Salta, Tucumán.

Analizando la provincia de Tucumán (Figura 19) se detecta que los puntos críticos en cuanto a demanda de energía se presentan en el transporte del grano (con un valor de 19,85 MJ/Kg de biodiesel) y en la producción de metanol (con un valor de 12,70 MJ/Kg de biodiesel).

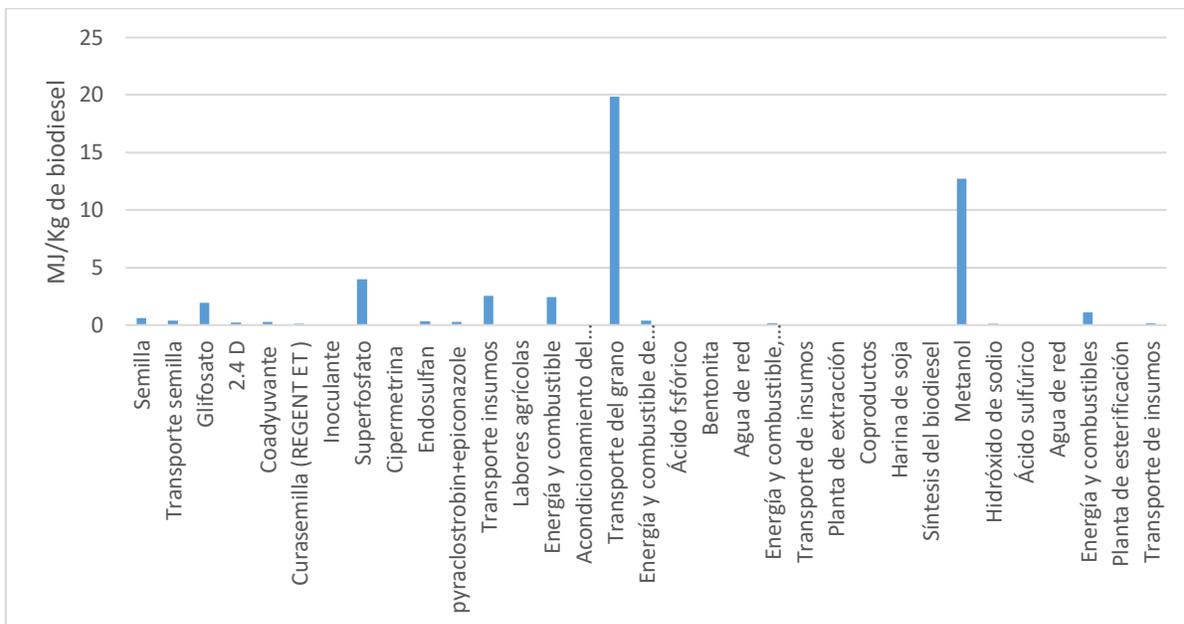


Figura 19: Demanda energética del cultivo de soja en la provincia de Tucumán.

Dentro de la etapa agrícola, el uso de fertilizantes, en este caso superfosfato, es lo que demanda mayor energía con un valor de 3,97 MJ/Kg de biodiesel (Figura 20) seguido por el uso de glifosato con un valor de 3,18 MJ/Kg de biodiesel. El transporte de insumos requiere 2,52 MJ/Kg de biodiesel y el uso de combustible 2,45 MJ/Kg de biodiesel, por lo que ambos procesos son de considerable demanda energética.

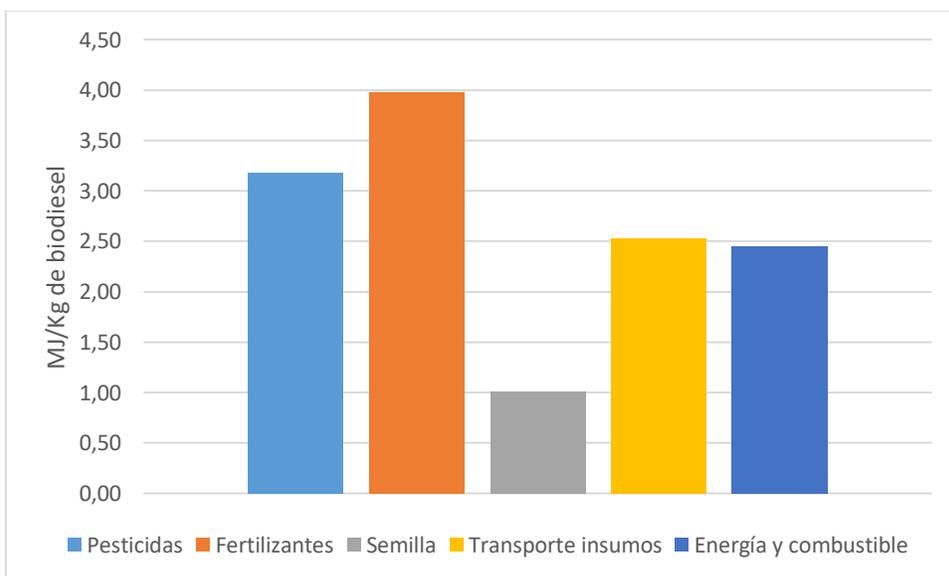


Figura 20: Demanda energética en la etapa agrícola del cultivo de soja. Provincia de Tucumán.

En la provincia de Santiago del Estero (Figura 21) el punto crítico del proceso es el transporte de grano con una demanda energética de 78,99 MJ/Kg de biodiesel, seguido por la fabricación de metanol usado en el proceso de síntesis de biodiesel con 12,70 MJ/Kg de biodiesel.

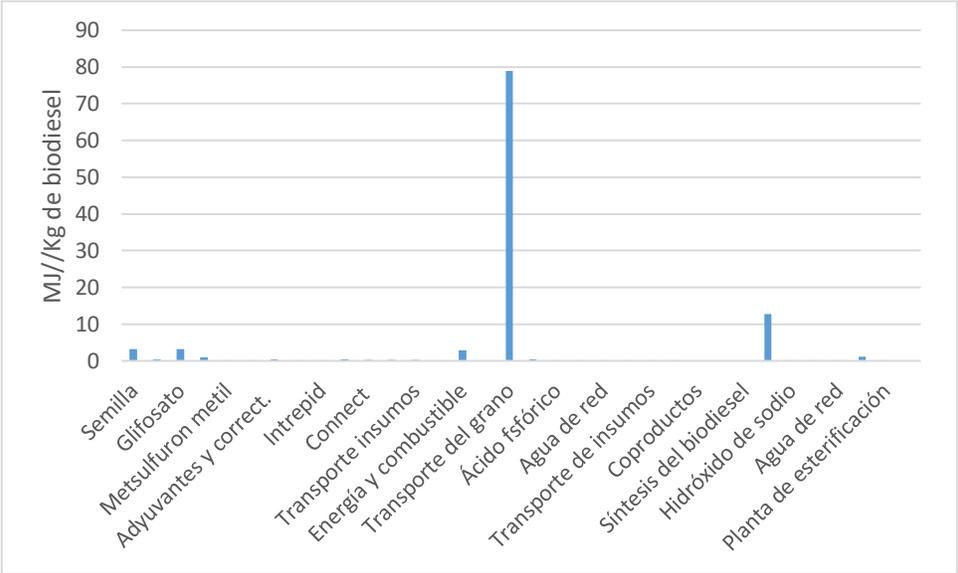


Figura 21: Demanda de energía para la producción de biodiesel en la provincia de Santiago del Estero.

En cuanto a la etapa agrícola (Figura 22) se observa que los pesticidas son los que requieren más energía y dentro de ellos el mayor demandante es el glifosato con 3,14 MJ/Kg de biodiesel. La producción de la semilla demanda 3,14 MJ/Kg de biodiesel, y por último el uso de energía y combustible demanda 2,78 MJ/Kg de biodiesel.

A diferencia de Tucumán, donde lo que más influye en el proceso es la utilización de fertilizantes fosfatados, en Santiago del Estero no se utilizan fertilizantes, según los datos de inventario.

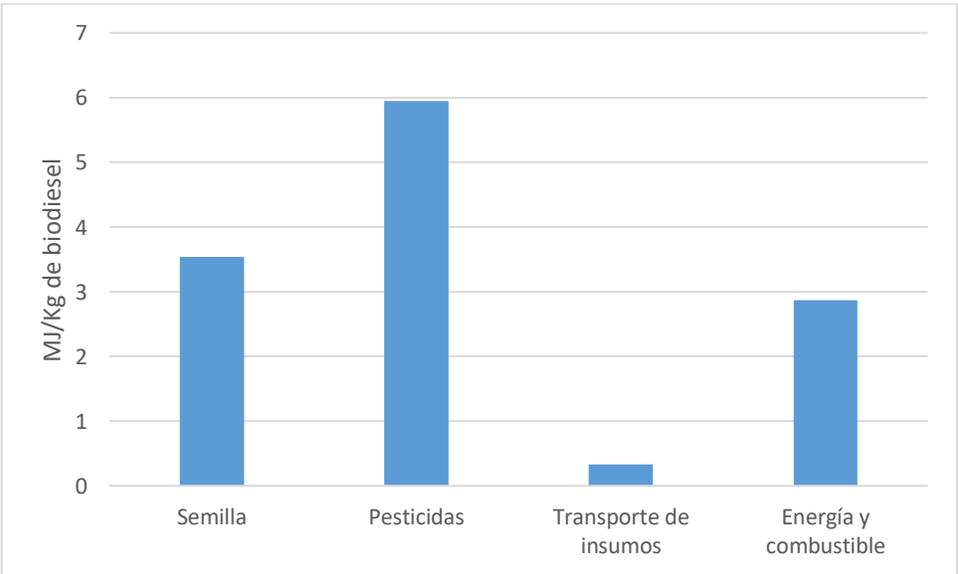


Figura 22: Demanda energética de la etapa agrícola de la producción de biodiesel de soja en Santiago del Estero.

De las provincias analizadas en esta tesis que actualmente tienen cultivo de soja, Salta es la más desfavorable para la producción de biocombustibles. El insumo crítico es, al igual que en Santiago del Estero y Tucumán, el transporte de grano con una demanda energética de 124,56 MJ/Kg de biodiesel, seguido por la fabricación de metanol usado en el proceso de síntesis de biodiesel con un valor de 12,7 MJ/Kg de biodiesel (Figura 23).

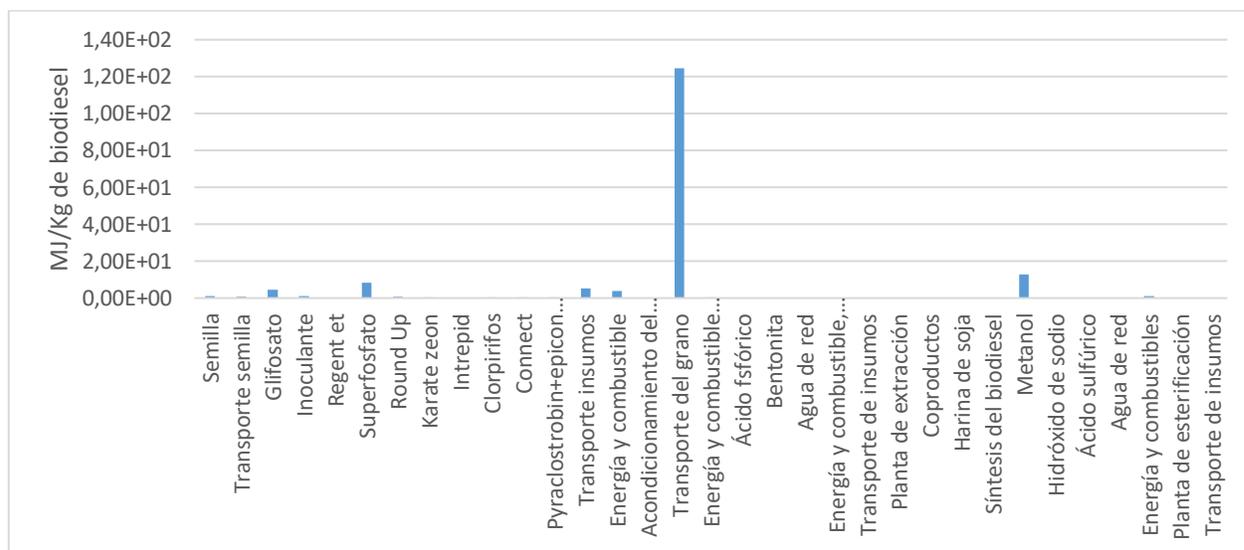


Figura 23: Demanda energética de la producción de biocombustible en la provincia de Salta.

En cuanto a la etapa de producción de grano (Figura 24), los factores críticos para Salta son los pesticidas, con una demanda energética de 8,23 MJ/Kg de biocombustible, seguidos de los fertilizantes con un valor de 8,19 MJ/Kg de biocombustible. El tercer lugar está ocupado por el transporte de insumos con un valor de 5,38 MJ/Kg de biodiesel. Finalmente se ubica el uso de energía y combustible con un valor de 3,78 MJ/Kg de biodiesel.

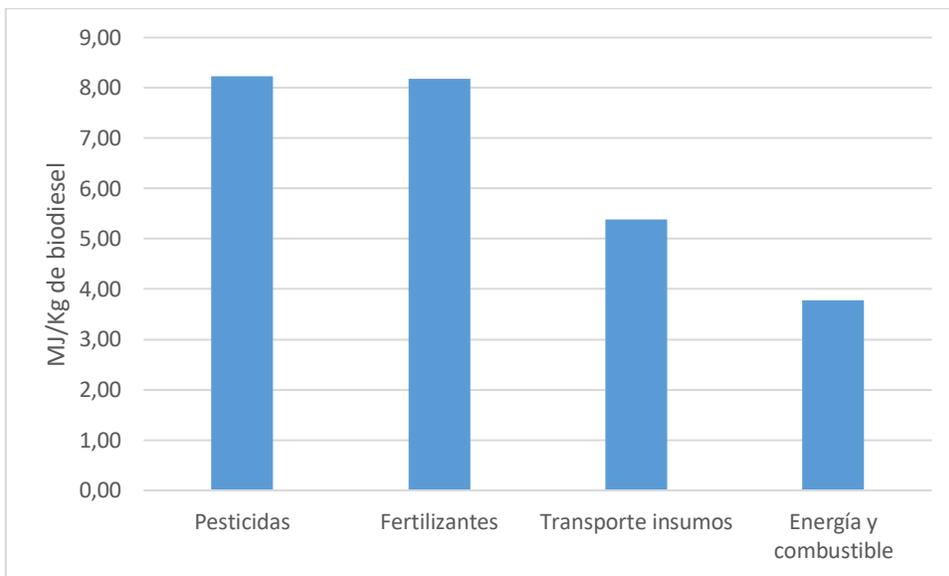


Figura 24: Demanda energética del cultivo de soja en su fase de producción en la provincia de Salta.

Al comparar la fase de producción del grano para Tucumán, Santiago del Estero y Salta (Figura 25), se observa que la producción de pesticidas seguido de la producción de fertilizantes son los procesos más demandantes de energía.

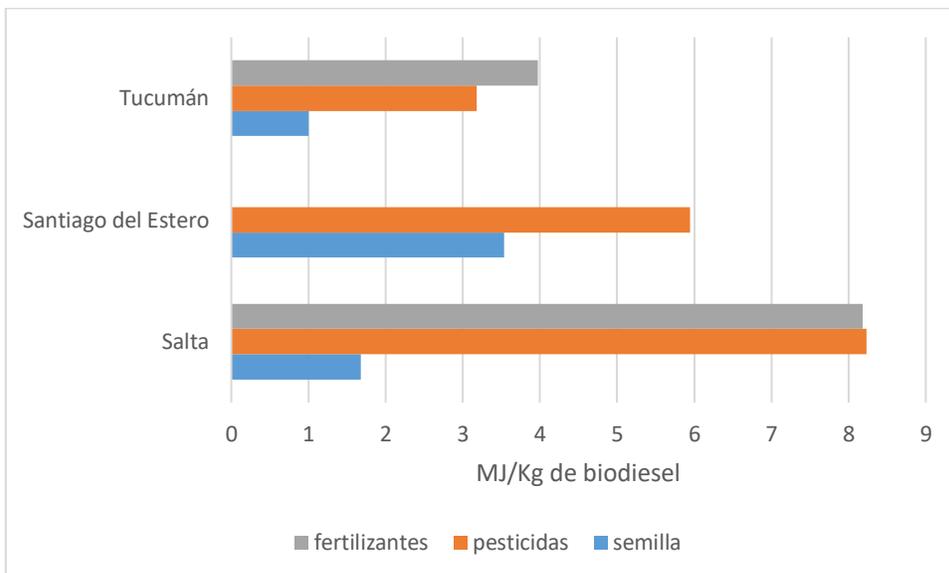


Figura 25: Comparación de la demanda energética en la etapa de producción de grano en las provincias de Salta, Santiago del Estero y Tucumán.

Como se mencionó anteriormente, el transporte de grano es un proceso crítico en los tres sistemas analizados, las diferencias se deben por un lado a las distancias entre el sitio agrícola y la industria más cercana, y por otro lado al rendimiento del cultivo alcanzado en cada región en particular.

Como se observa en la figura 26, la provincia de Salta es la que invierte mayor energía en el transporte del grano con un valor de 124,56 MJ/Kg de biodiesel, seguida de Santiago del Estero con un valor de 79,00 MJ/Kg de biodiesel. Finalmente está Tucumán con un valor de 19,85 MJ/Kg de biodiesel. Esto es porque la distancia entre el sitio agrícola y la localización actual de las plantas de procesamiento de biocombustibles es mayor para Salta que para el resto de las provincias analizadas, a su vez el rendimiento del cultivo en esta provincia es menor que en Tucumán y en Santiago del Estero.

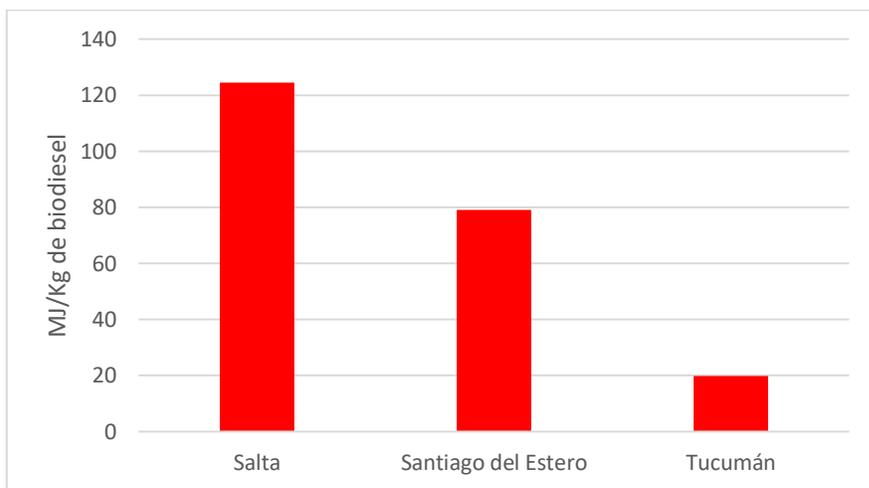


Figura 26: Demanda energética del transporte de grano durante el proceso de síntesis de biodiesel, para las provincias de Tucumán, Salta y Santiago del Estero.

El transporte de insumos también demanda gran cantidad de energía, debido principalmente a la distancia que existe entre las regiones estudiadas y las industrias que fabrican dichos insumos. En este sentido, el biodiesel producido en Salta es el más demandante ya que se requiere recorrer mayores distancias para abastecer a los productores de los agroquímicos necesarios (Figura 27).

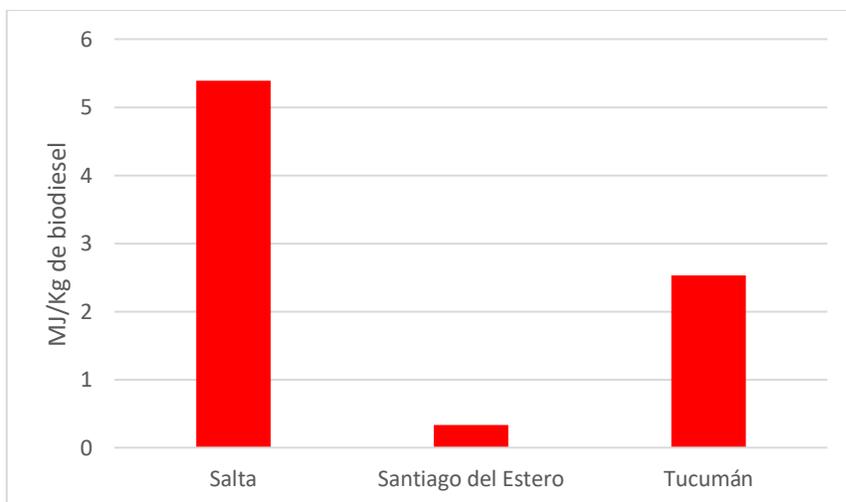


Figura 27: Demanda energética del transporte de insumos en la fase de producción de grano para la elaboración de biodiesel en Salta, Tucumán y Santiago del Estero.

Con respecto a la energía y combustibles demandadas, se observa en la figura 28 que la demanda de Salta es mayor que la del resto de las provincias, esto debido a que las distancias recorridas son mayores en esta provincia, lo que implica mayor uso de combustibles fósiles, tanto en transporte de insumos como en el uso de los mismos.

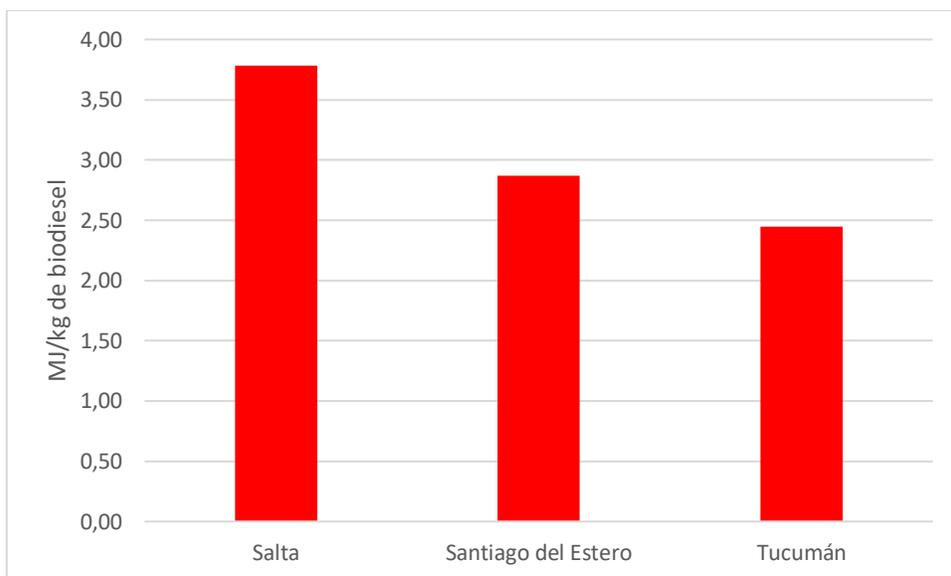


Figura 28: Demanda de energía y combustibles por las provincias de Salta, Santiago del Estero y Tucumán.

4.1.2 Provincia de Mendoza

Los resultados obtenidos arrojan valores de EROI muy bajos, siendo el sistema 1 (riego con pivote central) el mejor posicionado con un valor de 0,086 en comparación con el sistema 2 (riego mediante canales discontinuos) que obtuvo un valor de EROI de 0,079.

En ambos sistemas, la mayor demanda de energía se produce en la etapa agrícola, específicamente debido al el uso de energía y combustible para realizar las labores (Figura 29 y 30)

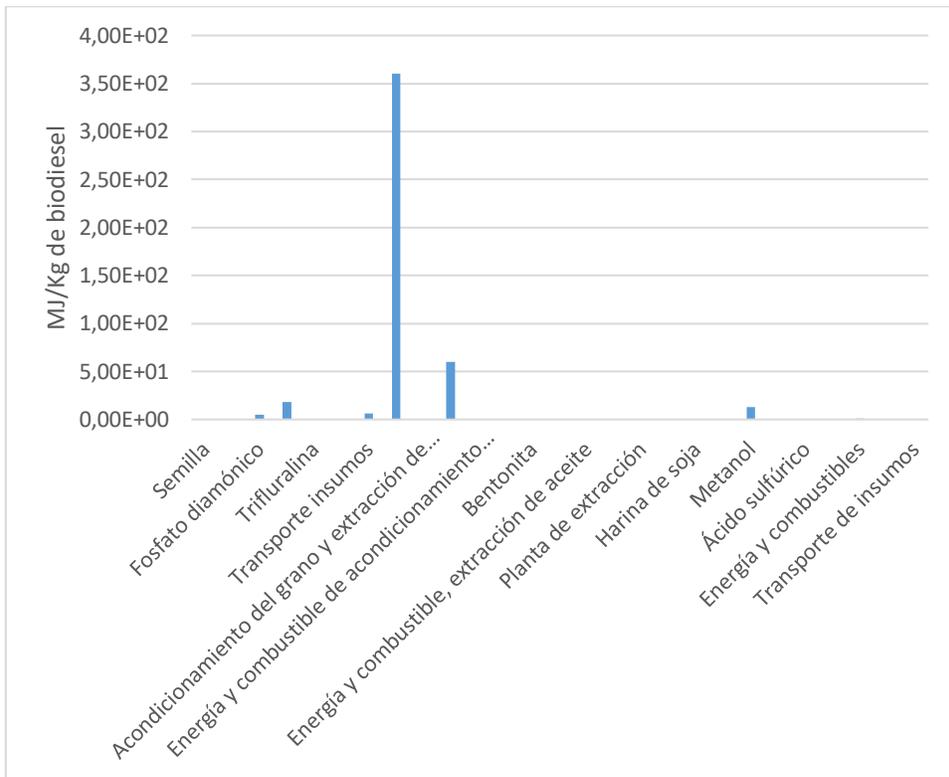


Figura 29: Demanda de energía en el Sist_1 de Mendoza.

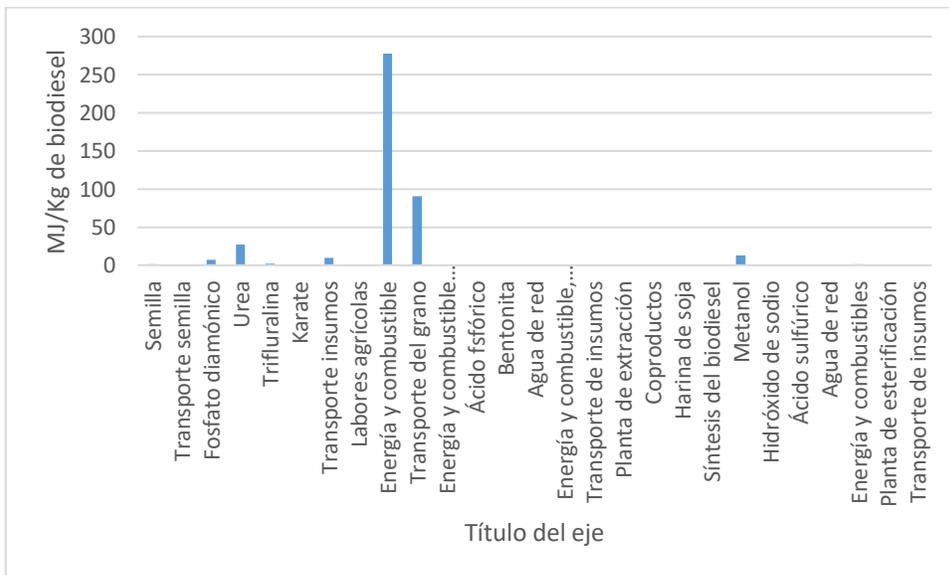


Figura 30: Demanda de energía en Sist_2 de Mendoza.

Es por eso que a continuación se analiza en profundidad la etapa agrícola, en busca de puntos críticos del proceso.

Cabe destacar que, en este caso, la fabricación de los fertilizantes es el proceso más demandante de energía. Esto se explica por las importantes cantidades de fertilizantes (Figura 31) que se

requieren para hacer frente al escaso contenido de materia orgánica que caracteriza a los suelos mendocinos.

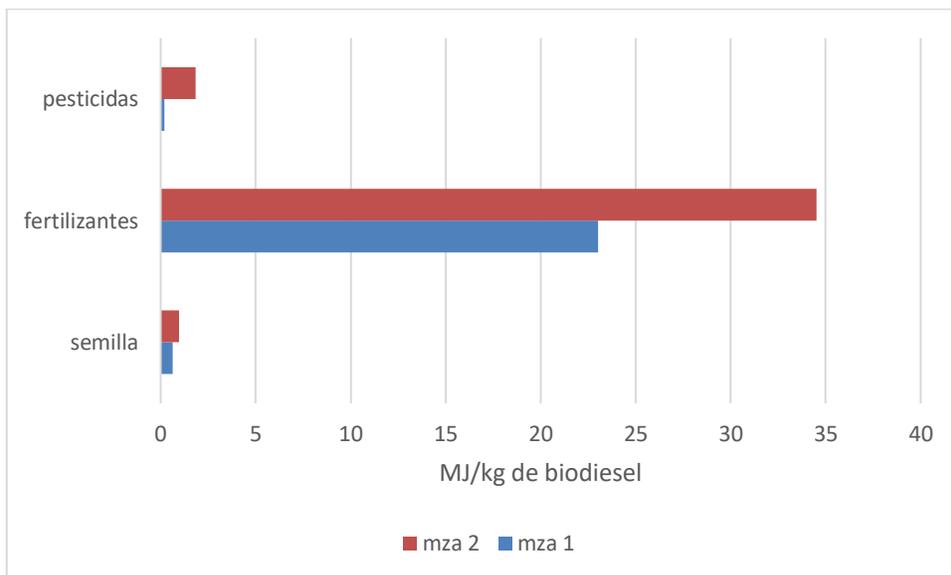


Figura 31: Demanda de energía en sistema 1 y sistema 2 de Mendoza.

Al analizar el ítem de energía y combustible (Figura 32) se encuentra que es hasta cien veces mayor que en las otras regiones analizadas. Esto se debe al bajo rendimiento del cultivo de soja en Mendoza (para el sistema_1 es de 3.000 kg/ha y para el sistema_2 es de 2.000 kg/ha), comparado con el resto de las provincias analizadas. También el factor que más influye en este punto es el uso de un sistema de riego artificial en Mendoza, mientras que los demás sistemas analizados se producen en condiciones de secano.

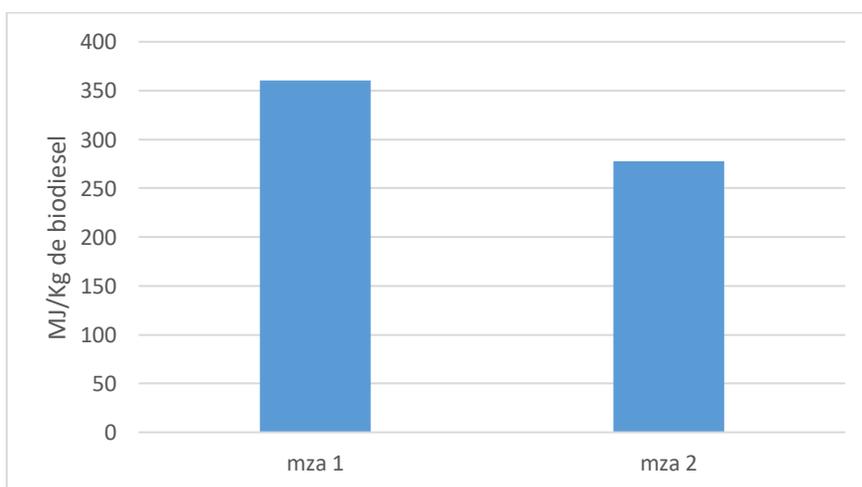


Figura 32: Demanda de energía y combustible en Mendoza.

En cuanto al transporte del grano y de los insumos, estos son considerablemente mayores a las demás provincias estudiadas (Figura 33), debido también a las diferencias en los rendimientos del cultivo y además a las distancias de transporte, ya que se consideró el transporte del grano a la industria más cercana, que en este caso fue la empresa Pitey SA en la provincia de San Luis.

Por otro lado, el transporte de insumos en la etapa agrícola también es considerable teniendo en cuenta la distancia hasta la provincia de Buenos Aires.

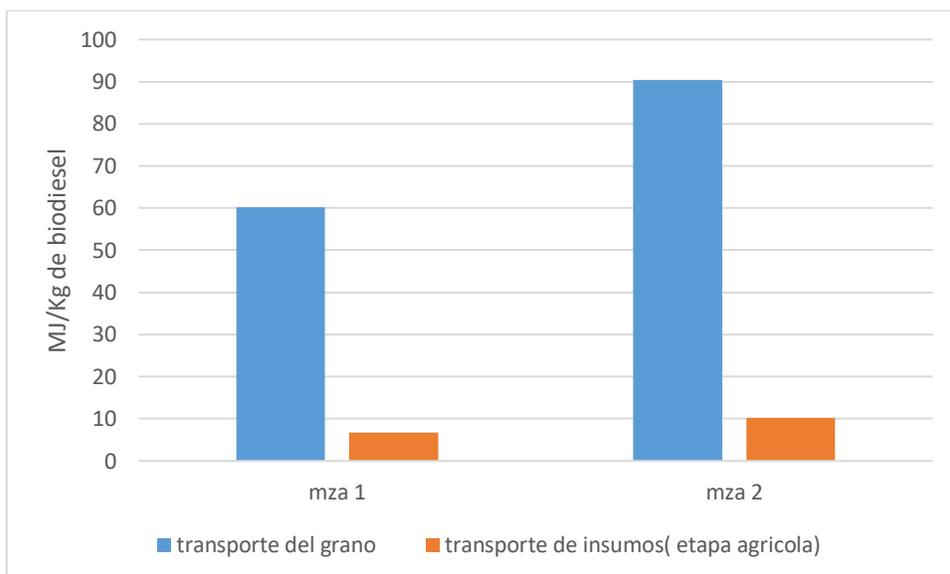


Figura 33: Demanda energética del transporte de grano y de insumos en ambos sistemas de Mendoza.

4.1.3 Situación respecto a la Región Pampeana

A continuación se presentan los resultados de la comparación entre los tres sistemas que actualmente cultivan soja (Tucumán, Santiago del Estero y Salta) y el modelo de producción característico de la Región Pampeana, emblema de la producción de soja en el país. Para lo cual se tomaron los datos de Piastrellini et al. (2015) y se compararon con los obtenidos en este trabajo con el propósito de reflejar la diferencia entre los distintos sistemas productivos, realizando el mismo método de análisis.

Los datos del biodiesel de soja en la Región Pampeana arrojan un índice EROI de 2,64 cuando la soja es de primera y se produce en siembra directa, y de 1,64 cuando se aplica riego suplementario. Ambos índices indican una ganancia de energía neta, por lo cual es favorable realizar la sustitución de combustible fósil a biocombustible (Piastrellini, 2015).

Al analizar específicamente la etapa agrícola de los sistemas productivos de la Región Pampeana, se observa en la figura 34 que la demanda energética de los insumos utilizados es considerablemente menor al de las localidades estudiadas en esta Tesina. Se mantiene en la Región Pampeana el predominio de pesticidas y fertilizantes en cuanto a la demanda de energía, y se observa también el aumento considerable de demanda de energía y combustible cuando el sistema se realiza bajo riego.

En cuanto a los sistemas analizados, se observa que demandan una cantidad de energía considerablemente mayor a la Región Pampeana. Es la provincia de Salta la que mayor demanda tiene en cuanto a pesticidas con un valor ocho veces mayor al reportado para la Región Pampeana (Piastrellini, 2015), y ocho veces mayor también en cuanto a fertilizantes. Tucumán

demanda cuatro veces más energía en la producción de fertilizantes y tres veces en la producción de pesticidas. Por último, Santiago del Estero demanda tres veces más energía en cuanto a producción de semilla y seis veces más en cuanto a producción de pesticidas.

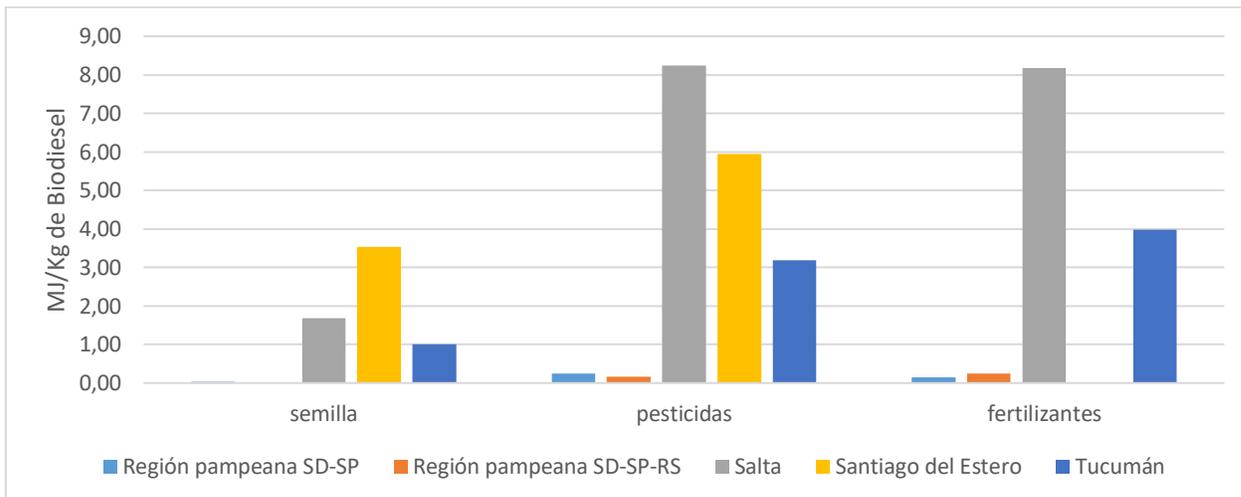


Figura 34: demanda energética en la etapa agrícola de Salta, Santiago del Estero, Tucumán y Región Pampeana. SD-SP: siembra directa-soja primera. SD-SP-RS: siembra directa-soja primera con riego suplementario. Fuente: Elaboración propia. Los datos de la región pampeana se extrajeron de Piastrellini (2015).

En cuanto al transporte de insumos, incluyendo el transporte de semilla, podemos observar en la Figura 35 que la demanda energética asociada a este proceso para los sistemas analizados en esta tesina son mayores a los reportados por Piastrellini (2015) para la región pampeana. Esto se debe a que las fábricas de insumos se localizan en la misma Región Pampeana, acortando las distancias entre el sitio de producción y los proveedores de insumos.

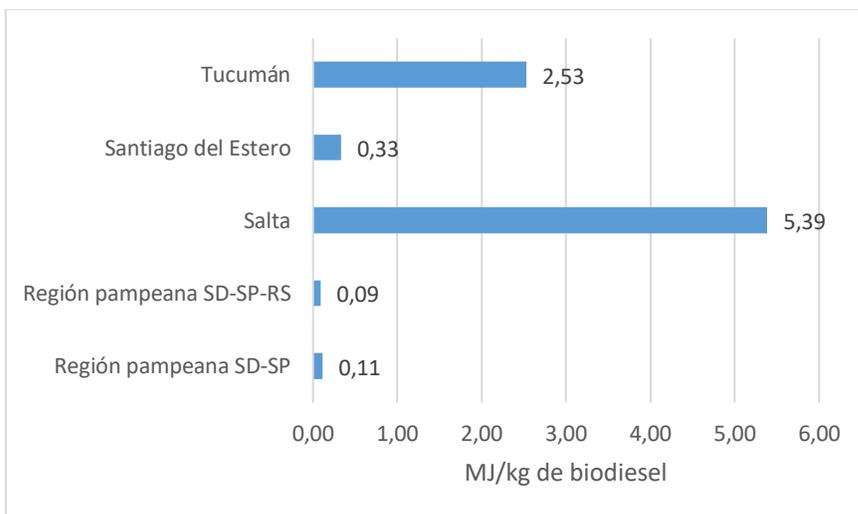


Figura 35: Demanda energética asociada al transporte de insumos en los distintos sistemas analizados. SD-SP: siembra directa-soja primera. SD-SP-RS: siembra directa-soja primera con riego suplementario. Fuente: Elaboración propia. Los datos de la región pampeana se extrajeron de Piastrellini (2015).

En cuanto a energía y combustible, el consumo en los sistemas norteños es entre tres y cuatro veces mayor que en los reportados para la Región Pampeana por Piastrellini (2015) (Figura 36). Esto debido a las distancias que tienen que recorrer los insumos para llegar a destino, que son mucho mayores que para la Región Pampeana.

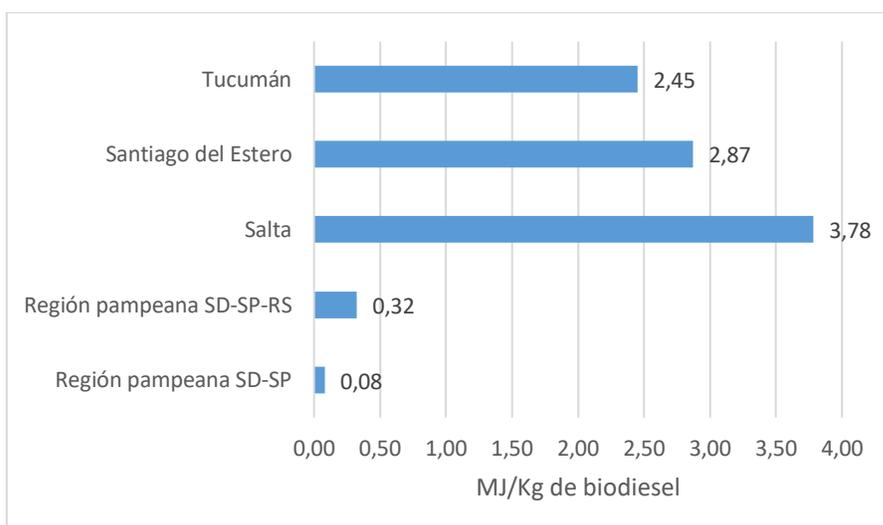


Figura 36: Demanda energética asociada a la energía y combustibles utilizados en los cinco sistemas analizados. Elaboración propia. SD-SP: siembra directa-soja primera. SD-SP-RS: siembra directa-soja primera con riego suplementario. Fuente: Elaboración propia. Los datos se la región pampeana se extrajeron de Piastrellini (2015).

Otro punto crítico a analizar y comparar es el de transporte de grano que es el mayor consumidor de energía en las provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero, pero despreciable en la Región Pampeana (Tabla N° 17). Esto debido a las distancias entre el sitio agrícola y los centros de fabricación del biocombustible y a los rendimientos de los cultivos. En la Región Pampeana, las plantas de extracción de aceite y transesterificación se ubican en promedio a 330 km de distancia de los campos donde se cultiva la soja. Además, el rendimiento alcanzado en esta región es en promedio de 2.800 kg/ha, mientras que en Salta, Tucumán y Santiago del Estero los rendimientos son de 2.141 kg/ha, 3109 kg/ha y 2.653 kg/ha respectivamente y las distancias a recorrer (tanto para obtener insumos como una vez producido el grano) son mayores.

	Región Pampeana seco (MJ/Kg de biodiesel)	Región Pampeana riego (MJ/Kg de biodiesel)	Salta (MJ/Kg de biodiesel)	Santiago del Estero (MJ/Kg de biodiesel)	Tucumán (MJ/Kg de biodiesel)
Transporte del grano	0,17	0,17	124,56	78,99	19,85

Tabla 17: Demanda energética asociada al transporte de grano para las provincias de Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Región Pampeana. Fuente: Elaboración propia. Los datos se la región pampeana se extrajeron de Piastrellini (2015).

4.2 Potencial de emisión de gases de efecto invernadero

El Potencial de calentamiento global para todos los sistemas analizados arrojó los siguientes valores: Tucumán $1,73E-02$ kg CO₂ eq/MJ, Salta $4,70E-02$ kg CO₂ eq/MJ, $1,89E-02$ kg CO₂ eq/MJ, Mendoza sist_1 $1,33E-01$ kg CO₂ eq/MJ, y Mendoza sist_2 $1,46E-01$ kg CO₂ eq/MJ.

En la provincia de Mendoza, se dan los casos más críticos, esto debido a que la implementación de riego aumenta el valor del impacto respecto a sistemas de secano, asociado esto al consumo de energía requerida para el funcionamiento del sistema de riego (Figura 37).

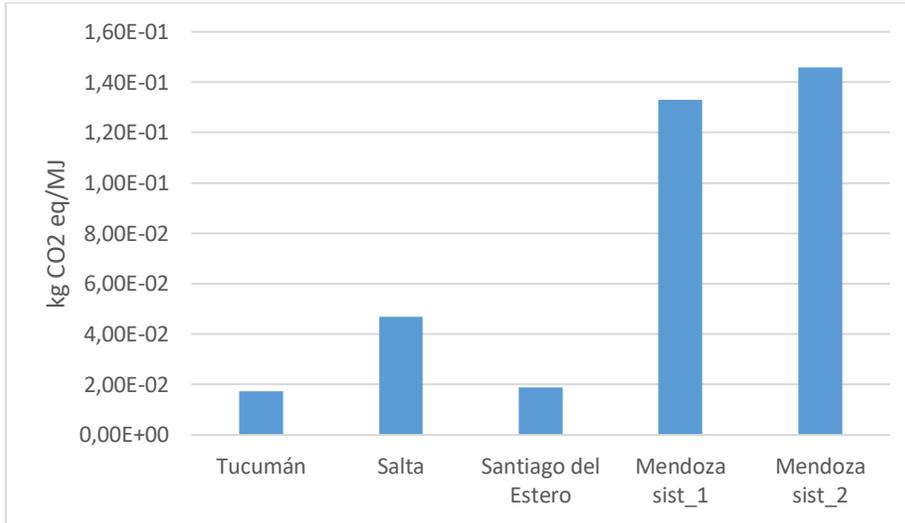


Figura 37: Potencial de calentamiento global de los sistemas analizados.

Al igual que lo que ocurre con el balance de energía, el proceso más impactante en cuanto a emisiones GEI es la etapa agrícola. El principal GEI emitido en todos los sistemas analizados es el CO₂, debido principalmente a la utilización de pesticidas y fertilizantes derivados del petróleo. (Figura 38).

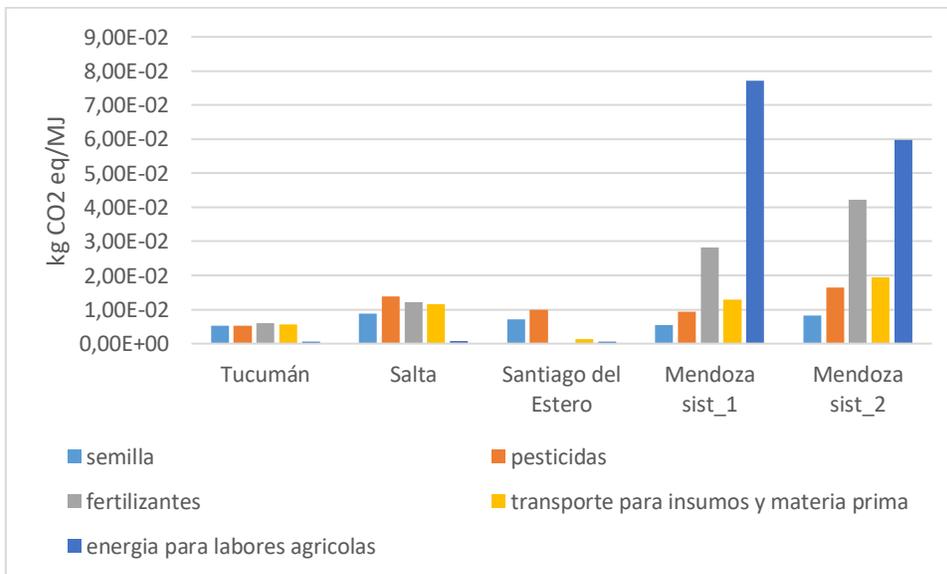


Figura 38: Potencial de calentamiento global de la etapa agrícola, para cada sistema estudiado.

Se destaca la escasa contribución del N₂O a las emisiones totales de GEI. Esto es poco común en sistemas productivos de base agrícola. En este caso, al ser la soja una planta fijadora de nitrógeno, las tasas de aplicación de fertilizantes nitrogenados son bajas en comparación con otros cultivos. Por ello, las emisiones directas e indirectas asociadas a la aplicación de estos fertilizantes son poco significativas

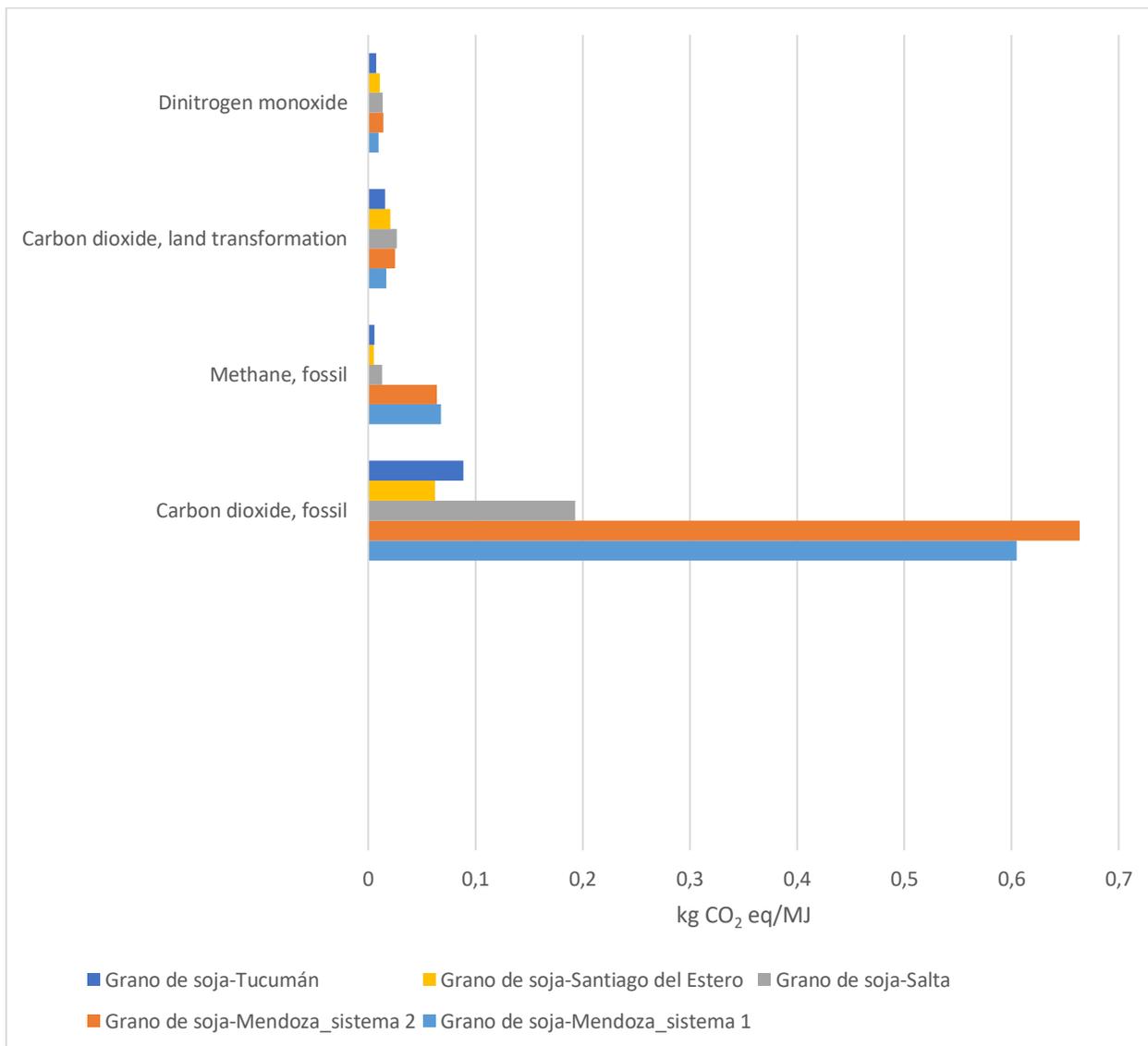


Figura 39: Contribución de distintos GEI al Potencial de calentamiento global de la etapa agrícola de la producción de biodiesel de soja.

Los resultados encontrados en este trabajo muestran que los sistemas productivos de Tucumán, Salta y Santiago del Estero representan una reducción de emisiones de GEI con respecto al combustible fósil. La provincia de Tucumán es la más favorecida en este aspecto, con un porcentaje de reducción del 79%, seguida de la provincia de Santiago del Estero con 77% y finalmente Salta con una reducción de emisiones del 43%.

En el caso de la provincia de Mendoza, según los resultados de este trabajo, no existe reducción de emisiones sino que, por el contrario, se emite un 59% más de GEI en el sistema uno y 74% más en el sistema dos, en relación al gasoil de origen fósil.

A continuación se analizan en detalle cada uno de los sistemas abordados en este estudio.

4.2.1 Provincias productoras de soja: Tucumán, Santiago del Estero y Salta

Los resultados hallados en esta tesis indican que, de las tres provincias analizadas, Santiago del Estero es la que menos impacta en esta categoría, con un valor de Potencial de calentamiento global de 0,02 kg CO₂ eq/MJ (Figura 40). Esto se debe a que este sistema productivo no requiere fertilizantes durante la etapa de cultivo. La fabricación de pesticidas es el proceso que mayor impacto produce, seguido de la producción de la semilla.

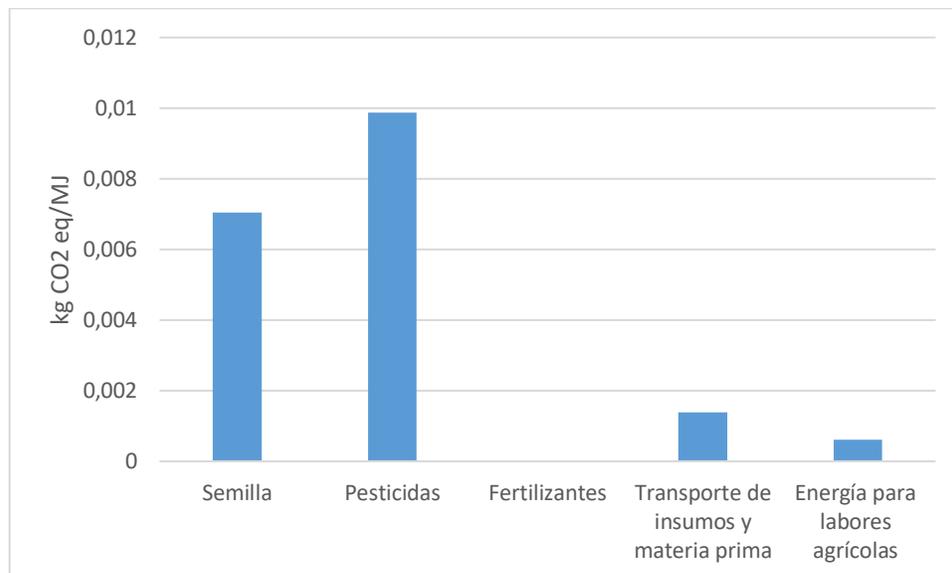


Figura 40: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Santiago del Estero.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en esta tesis para los diferentes insumos y categorías analizadas en cada localidad estudiada.

El mayor impacto para esta categoría se registra en la provincia de Salta (Figura 41), con un valor de 0,05 kg CO₂ eq/MJ. En este sistema productivo, es notable la contribución de la fabricación de los fertilizantes y pesticidas y del transporte de insumos y materias primas, en el impacto total. Estos tres procesos son los responsables del 79% de las emisiones totales de GEI.

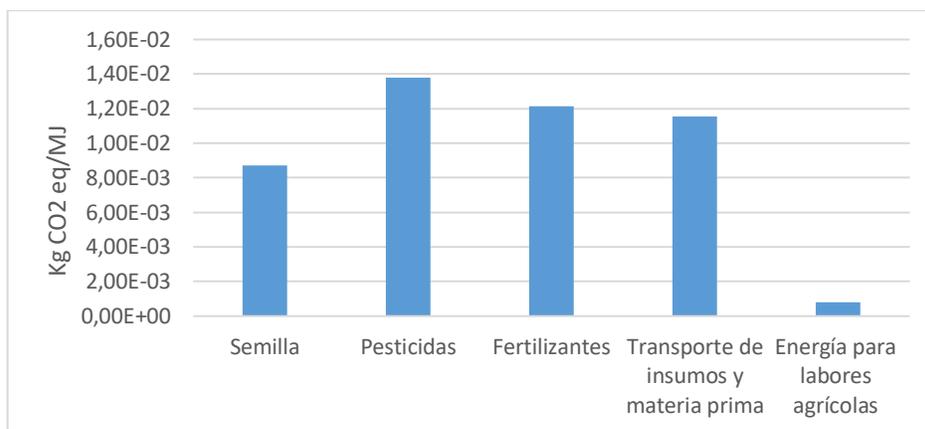


Figura 41: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Salta.

En cuanto a Tucumán, el total de emisiones es de 0,03 kg CO₂ eq/MJ y, al igual que en Salta, la mayor contribución corresponde a la fabricación de fertilizantes y pesticidas y al transporte de insumos y materias primas. (Figura 42)

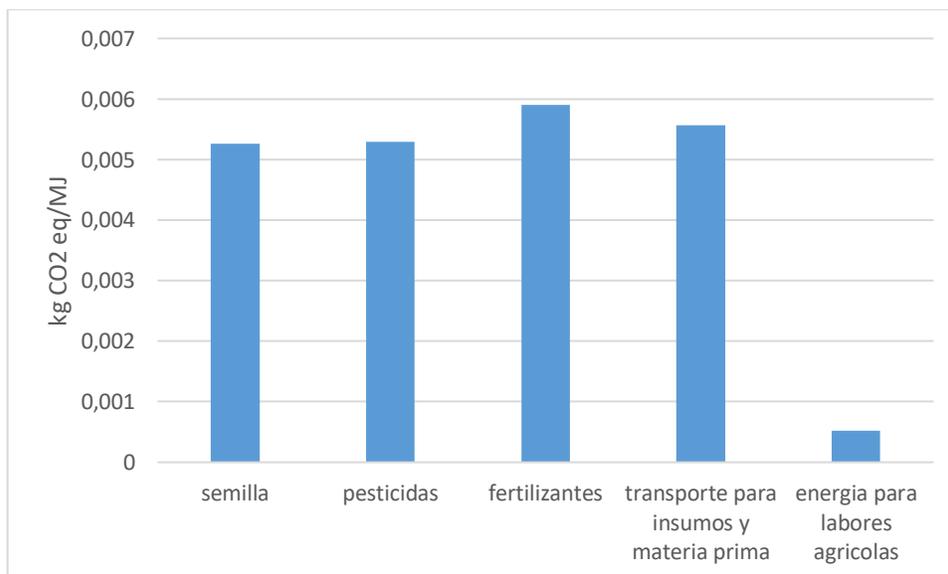


Figura 42: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Tucumán.

4.2.2 Provincia de Mendoza

Al analizar los sistemas de Mendoza, los resultados que arrojan los datos de esta tesis indican que el uso de energía para labores agrícolas encabeza la lista de procesos emisores representando el 58% en el sistema 1 y el 41% en el sistema 2, seguido por los fertilizantes representando el 21% y el 29 % del total respectivamente. A continuación se presenta en las figuras 43 y 44 las emisiones de GEI de la producción de biodiesel para los sistemas estudiados.

Las labores que más influyen son las que conciernen a la cosecha con un valor de 0,977 kg CO₂ eq/MJ que representa el 87% del total de labores. En cuanto a fertilizantes tanto la urea como el

18-46-0 representan cada uno el 50% del valor de impacto, en el uso de pesticidas Karate es el que más influye con un valor de 0,00005 kg CO₂ eq/MJ para el sistema dos y de 0,0000333 kg CO₂ eq/MJ para el sistema uno.

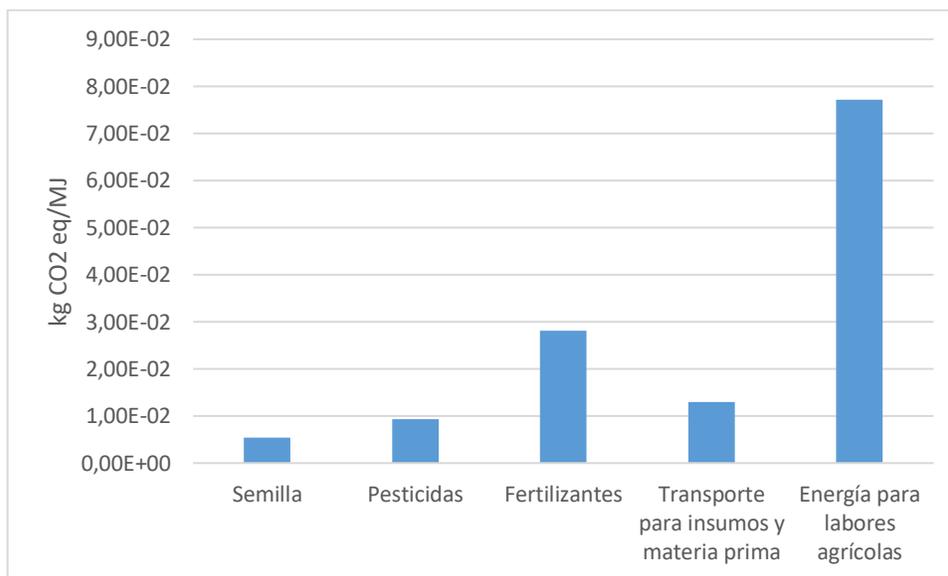


Figura 43: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Mendoza sist_1.

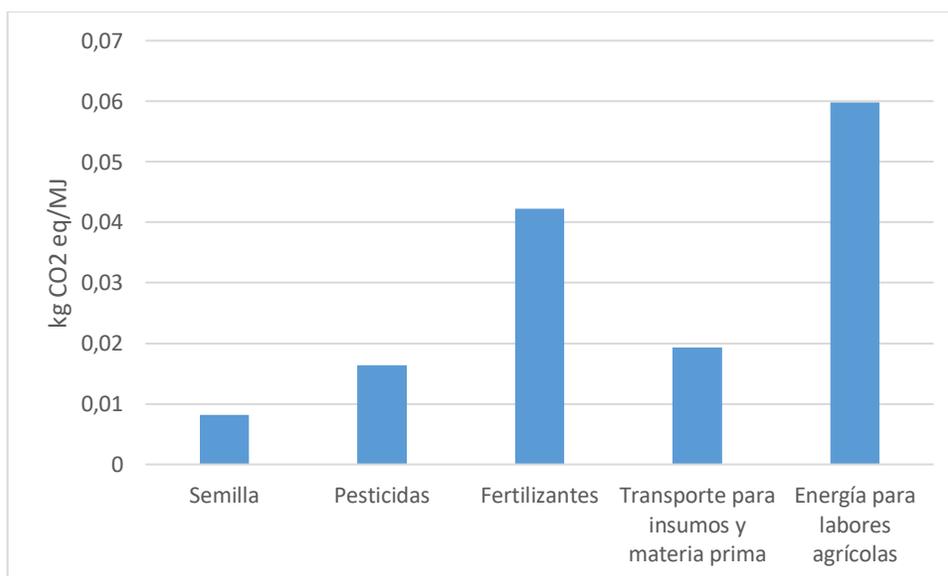


Figura 44: Contribución de los insumos al potencial de calentamiento global total en la provincia de Mendoza sist_2.

4.2.3 Situación respecto a la Región Pampeana

En cuanto al Potencial de calentamiento global para la Región Pampeana, se toma lo expuesto en la tesis de Piastrellini (2015) donde las emisiones GEI resultantes de la producción de soja alcanzan valores de 0,30 kg CO₂ equivalentes por kg de grano para el sistema SD-SP. En este caso, el proceso más impactante corresponde a la fabricación de agroquímicos. Por otro lado,

según la misma autora, se observa que la implementación de riego suplementario aumenta el valor del impacto para el PCG en 37,2% con respecto a SD-SP, debido a importantes incrementos en las emisiones de CO₂ y CH₄ de origen fósil, asociados al consumo de energía requerida para el funcionamiento del sistema de riego.

Ahora comparando con las provincias estudiadas se afirma que el PCG en estas es mayor que lo informado para la Región Pampeana (Figura 45), como se detalla en el Anexo II, según los resultados obtenidos en esta tesis. Los sistemas productivos de Mendoza son los que tienen los índices más altos de PCG, mientras que de las provincias que actualmente son productoras de soja, Salta es la que mayor índice de PCG presenta, debido al uso de fertilizantes y pesticidas y al uso de combustible fósil para transporte de grano y de insumos. La provincia con menor valor de PCG es Santiago del Estero, debido en parte a que no utiliza fertilizantes químicos ni riego artificial.

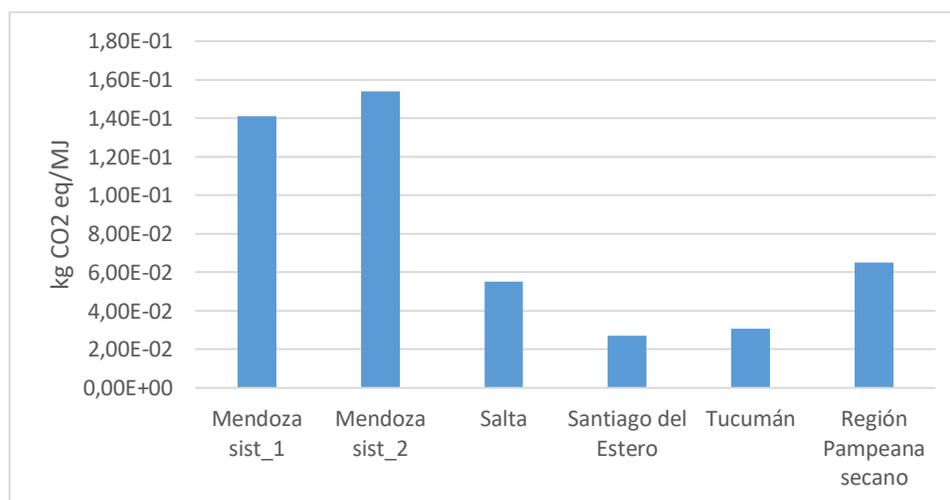


Figura 45: Potencial de calentamiento global de la producción de biodiesel de soja en las provincias de Salta, Santiago del Estero, Tucumán, Mendoza y Región Pampeana en secano. Fuente: Elaboración propia. Los datos de la región pampeana se extrajeron de Piastrellini (2015).

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente tesis se confeccionó un análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel de soja en Argentina, con un enfoque de la cuna a la puerta, teniendo en cuenta la expansión hacia áreas extrapampeanas. Específicamente se trabajó con las provincias de Salta, Santiago del Estero y Tucumán. Se comparó luego estas provincias actualmente productoras de soja con la Región Pampeana, en dos aspectos, balance de energía y potenciales emisiones de GEI. Además, se evaluó en un escenario hipotético a la provincia de Mendoza, considerando distintos sistemas de riego.

Teniendo en cuenta trabajos anteriores, el presente trabajo se enfocó en la etapa agrícola, considerada como la etapa de mayor impacto en el ciclo de vida de este biocombustible. Los resultados indicaron que, independientemente del sistema analizado, todos los balances energéticos son negativos, es decir que no existe una ganancia neta de energía produciendo biodiesel de soja en las provincias extra-pampeanas analizadas. Con respecto al caso hipotético de Mendoza, el balance energético también es negativo, y además no se cumple con la premisa de reducción de emisiones de GEI respecto al gasoil de origen fósil.

Se concluye que la producción de biocombustibles en las localidades sojeras estudiadas demanda una importante cantidad de recursos naturales que deben ser abastecidos desde regiones distintas a las de producción, por lo tanto, la elaboración de biodiesel no es sustentable desde el punto de vista energético-ambiental. De esta forma queda demostrada la hipótesis de trabajo.

Por tanto, se recomienda no replicar sistemas productivos de regiones específicas en otras donde la disponibilidad de recursos naturales sea un factor limitante para alcanzar niveles aceptables de productividad de la biomasa energética.

A continuación se mencionan algunos aspectos que podrían conducir a mejorar el comportamiento ambiental de los sistemas estudiados:

- Considerando que el uso de pesticidas y fertilizantes son los que mayor energía demandan en la producción del grano, se podría evaluar la factibilidad del uso de bioinsumos o producción orgánica de la soja.
- En cuanto a acondicionamiento del grano y extracción de aceite, el proceso que mayor energía demanda es el transporte del grano, se recomienda entonces que las plantas productoras de biodiesel se instalen cerca de las áreas de producción de soja en estas provincias.
- En la síntesis de biodiesel, el insumo industrial más demandante de energía es el metanol. En concordancia con Piastrellini (2015) se sugiere evaluar la posibilidad de usar glicerina de soja como materia prima para producir etanol y así reemplazar al metanol en el proceso de transesterificación.

REFERENCIAS

AAPRESID-ASOCIACIÓN ARGENTINA DE PRODUCTORES EN SIEMBRA DIRECTA. 2012. Evolución de la superficie en siembra directa en Argentina. Campaña 1977/78 a 2010/2011. Disponible online: http://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2013/02/aapresid.evolucionsuperficie_sd_argentina.1977_a_2011.pdf (acceso 22/05/2016).

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA. 2011. Estudio básico sobre el sector de los biocarburantes. Disponible online: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/estudio_basico_sobre_el_sector_de_los_biocarburantes.pdf (acceso: 20/05/2016).

AIZEN, M.; GARIBALDI, L.; DONDO, M. 2009. Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología austral*, 19(1), 45-54. Disponible online en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2009000100004&lng=es&tlng=es. (Acceso en: 08/09/2018).

ALTIERI, M.A.; PENGUE, W.A. 2006. La soja transgénica en América Latina. Una maquinaria de hambre, deforestación y devastación socio-ecológica. *Biodiversidad*, 47, 14-19.

ÁLVAREZ MACIEL, C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 359, 63-89.

ÁLVAREZ, C.; COSENTINO, V.; COSTANTINI, A.; ÁLVAREZ, C.R.; TABOADA, M.A. 2014. Efecto de la secuencia de cultivo y la siembra directa sobre las emisiones de óxido nitroso. En: *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina*, 1° ed. Eds: Pascale Medina, C.; Zubillaga, M.M.; Taboada, M.A. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Buenos Aires, Argentina, vol. 1.

ARAUJO, P; ARENA, AP; CIVIT, B; CURADELLI, S; FELDMAN, S; JOZAMI, E; MELE, F; PIASTRELLINI, R; SILVA COLOMER, J. 2018. The water footprint in bioenergy - A comparison of four biomass sources to produce biofuels in Argentina. In book: *Environmental Water Footprints*, pp.1-33.

ARENA, A.; PIASTRELLINI, R.; NOVELLO, E.; CUCCIA, S.; CIVIT, B. 2010. PERFIL AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN LA REGIÓN PAMPEANA NORTE DE ARGENTINA. II Congresso Brasileiro em Gestao do Ciclo de Vida. Florianópolis, Brasil.7p.

BAO, Z.; BENSON, S.M.; CUI, Y.; DIONNE, J.A.; MAHER, K. 2014. In search of clean, affordable energy. *Oilfield Review* Spring, 2014:26, n°1.

CALZADA, J. 2017. Datos claves de biocombustibles. Bolsa de comercio de Rosario, AÑO XXXIV - N° EDICIÓN 1793. Disponible online en: https://www.bcr.com.ar/Pages/Publicaciones/informativosemanal_noticias.aspx?pldNoticia=472 (acceso 22/04/2018).

CARBALLO, S.; HILBERT, J.A. 2010. Análisis de metodologías empleadas para el cálculo de emisiones GEI derivados del cambio de uso del suelo. Informe INTA, N° Doc. BC-INF-13-10, Buenos Aires, Argentina, 16 p.

CARBIO-CÁMARA ARGENTINA DE BIOCOMBUSTIBLES. 2013. Exportaciones de biodiésel de Argentina. Disponible online: http://www.carbio.com.ar/es/?con=bio_estadisticas (acceso: 11/09/2013).

CARBIO-CÁMARA ARGENTINA DE BIOCOMBUSTIBLES. 2014. Integrantes. http://www.carbio.com.ar/es/?con=car_integrantes_mas&id=6 (acceso: 17/11/2014).

CARO, R. F.; DILASCIO, M. P.; ABASCAL, G. F.; ROMERO, E. R.; SCANDALIARIS, J. Y CASEN, S. D.2012. Uso del análisis del ciclo de vida (acv) para mejorar la sustentabilidad de la cadena productiva del

bioetanol en Tucumán. Disponible online en: <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20121204152509000000.pdf> (acceso 20/10/2015).

CASTELLAR, G.; ANGULO, E.R.; CARDOZO, B.M. "Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts", *Prospect*, Vol 12, N° 2, 90-104, 2014.

CASTILLO, P. (2008-12) Expansión regional del cultivo de soja en Argentina. Doc. CIEA Nro. 03 (2008), p. 119-132.

CGIAR-CONSULTATIVE GROUP ON INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH Y FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Bio-fuels Research in the CGIAR: A Perspective from the Science Council. Roma, Italia: Science Council Secretariat, 2008. 40 p.

CHERUBINI, F.; BIRD, N.D.; COWIE, A.; JUNGMEIER, G.; SCHLAMADINGER, B.; WOESS-GALLASCH, S. 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuels and bioenergy systems: key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 434-447.

CHIARIOTTI, J.; RINALDI, S.; VILLALUCE, B.2011. Elaboración de Biodiesel a partir de aceite crudo de soja. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

CIANI, M.2017. Informativo mensual de biocombustibles y productos relacionados con su elaboración. Dirección de Agroenergía. Disponible online en: [https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/bioenergia/informes/archivos/000001_Informes%20Biocombustibles%202017/000005_Informe%20biocombustibles%20\(mayo%202017\).pdf](https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/bioenergia/informes/archivos/000001_Informes%20Biocombustibles%202017/000005_Informe%20biocombustibles%20(mayo%202017).pdf) (acceso 18/09/2017).

CIVIT, B. (2009). Sostenibilidad ambiental: Desarrollo de indicadores regionales para su aplicación en estudios de Análisis de Ciclo de Vida en la región árida del centro oeste argentino. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza Argentina. ISBN 978-987-9126-91-2.

CLEVELAND, C.J.; COSTANZA, R.; HALL, C.A.S.; KAUFMANN, R. 1984. Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science*, 255, 890-897.

DE GUARDIA DE PONTE, J. 2013. Enciclopedia digital de Salta. Disponible online en: <http://www.portaldesalta.gov.ar/fundamentos.htm> (acceso 16/03/2017)

DE LISI, V.; REZNIKOV, S.; ESCOBAR, M.; CLAPS, M.; GÓMEZ PONCE, E.; DEVANI, G.; PEREYRA, M.; MARTÍNEZ MONTEROS, M.; GONZALEZ, V.; PLOPER, L. (2017). Evaluación del comportamiento de genotipos de soja frente a la mancha anillada en el noroeste argentino durante la campaña 2016/2017. *Publicación Especial EEAOC*. 109-113.

DEMIRBAS, M.F. 2011. Biofuels from algae for sustainable development. *Applied Energy*, 88, 3473–3480.

DILASCIO, M. 2009. Balances Energéticos del Cultivo de Soja como Fuente para la Obtención de Biodiesel en Tucumán, Argentina. *Revista Brasileira de Agroecologia*, [S.l.], v. 4, n. 2, dec. ISSN 1980-9735. Disponible online en: <http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/9354>. (Acceso en 14/07/2018).

DONATO, L.; HUERGA, I.; HILBERT, A. 2008. Balance energético de la producción de biodiésel a partir de aceite de soja en la República Argentina. INTA Reporte 2008, N° Doc. IIR-BC-INF-08-08, Buenos Aires, Argentina, 25 p.

EEAOC-ESTACION EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPOS COLOMBRES.2016. EL CULTIVO DE LA SOJA EN EL NOROESTE ARGENTINO. Campaña 2015/2016. *Publicación Especial N° 52*. Disponible online en: <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/16/639/Soja-en-el-NOA---2016.html> (acceso 20/02/2017).

ERRASQUIN, L.; TROSSERO, J.; SOSA, N.; SAAVEDRA, A.; MÉNDEZ, J. Sin fecha. Visitas a Plantas de Extracción de Aceite de Soja. Unidad Ejecutora Proyecto PRECOP II. EEA INTA Manfredi Disponible en: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/VisitasPlantasExtraccionAceiteSoja.asp> (acceso 13/09/2018).

FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UN. 2004. Unified Bioenergy Terminology–UBET. Disponible online: <http://www.fao.org/DOCREP/007/j4504E/j4504e00.htm> (acceso: 16/05/2016).

FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UN. 2013. Resumen del Informe del Grupo de Alto Nivel de Expertos (HLPE) sobre los Biocombustibles y la Seguridad Alimentaria. CFS 2013/40/2 Add.1 Rev.1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 12 p.

FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UN. 2014. AQUASTAT database. Disponible online: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html> (acceso 30/05/2014).

FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UN.; IFA-Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y N₂O provenientes de las tierras agrícolas. Disponible online: <http://www.fao.org/3/a-y2780s.pdf> (acceso: 22/02/2014).

FENÉS, G. 2018. 2018 se presenta complicado para la industria exportadora de biodiesel. ENERGÍA ESTRATÉGICA. Disponible online en: <http://www.energiaestrategica.com/panorama-2018-se-presenta-complicado-la-industria-exportadora-biodiesel/> (acceso 09/04/2018).

FULQUET, G.2015. ¿La maldición de los recursos naturales? Conocimiento experto, política e intereses sectoriales en el desarrollo de biocombustibles en sudamérica. BJIR, Marília, v. 4, n. 1, p. 38-70.

FUNDACIÓN EXPORTAR (2011). Informe provincial de Tucumán. Disponible online en: https://issuu.com/exportar/docs/exportar_-_tucuman (acceso 10/08/2018).

GALLARDO, M. 2015. Soja: harinas de extracción para la alimentación del ganado. INTA. Disponible en: http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/art_divulgacion/ad_0015.htm (acceso 18/07/2018).

GONZALEZ, S. 2013. El negocio de la soja ahora desembarca en Mendoza. *Los Andes*. Disponible en: <https://losandes.com.ar/article/negocio-soja-ahora-desembarca-mendoza-701104> (acceso 11/09/2014).

GONZALEZ, S.2018. Analizan extender a Mendoza la siembra de soja y maíz. *Los Andes*. Disponible en: <https://losandes.com.ar/article/view?slug=analizan-extender-la-frontera-de-soja-y-maiz-hacia-mendoza> (acceso 15/08/2018).

GRAGEDA CABRERA, O., MEDINA CÁZARES, T., AGUILAR ACUÑA, J., HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, M., SOLÍS MOYA, E., AGUADO SANTACRUZ, G., PEÑA CABRIALES, J. 2004. Pérdidas de nitrógeno por emisión de N₂ y N₂O en diferentes sistemas de manejo y con tres fuentes nitrogenadas. *Agrociencia*, 38 (6), 625-633.

GUDYNAS, E. 2013. Conflictos y extractivismos: Conceptos, contenidos y dinámicas. Disponible online en: https://www.researchgate.net/publication/326191722_Conflictos_y_extractivismos_conceptos_contenidos_y_dinamicas (acceso en 18/03/2018).

GUINÉE J. (2001) Handbook of life cycle assesment-operational guide to the ISO standars. *Int J LCA* 6(5) 255. SEGÚN LA ISO SSS.

HALL, C.A.S.; CLEVELAND, C.; BERGER, M. 1981. Yield per effort as a function of time and effort for United States petroleum, uranium, and coal. En *Energy and Ecological Modelling*; Mitsch, W.J., Bosserman, R.W., Klopatek, J.M., (Eds.); Elsevier Scientific: Amsterdam, Países Bajos, 715-724.

HILBERT J.A; DONATO L.B.; MUZIO J.; HUERGA I. 2009. Análisis comparativo del consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de biodiésel a base de soja bajo manejos de siembra directa y labranza convencional. INTA: N° Doc IIR-BC-INF-06-09, Buenos Aires, Argentina.

HILBERT, J.A.; GALBUSERA, S. 2011. Cálculo de la reducción de emisiones producida por el corte obligatorio y la exportación de biodiésel argentino. INTA: N° Doc BC-INF-11-11, Buenos Aires, Argentina.

HILBERT, J.A.; GALBUSERA, S. 2012. Actualización del cálculo de la reducción de emisiones producida por el corte obligatorio y la exportación de biodiésel argentino 2011. INTA. Informes Técnicos Bioenergía 2012, Buenos Aires, Argentina.

HILBERT, J.A.; GALBUSERA, S. 2014. Análisis de Emisiones Producción de Biodiésel y coproductos en una planta de producción integrada regional. En: *Avances en ciclo de vida y huellas ambientales en Argentina*. Piastrellini, R.; Arena, A. P.; Civit, B. (Eds), UTN, Argentina, 36-37 p.

HILBERT, J.A.; LAVALLE LOPARDO, N.C.; GUERRA, V.I. 2014. Evolución de la percepción pública de los biocombustibles en Argentina. Proyecto Global Bio Pact. INTA. Informes Técnicos Bioenergía 3, Buenos Aires, Argentina, 106 p.

HLPE-HIGH LEVEL PANEL OF EXPERTS. 2013. Los biocombustibles y la seguridad alimentaria. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. Disponible online en: <http://www.fao.org/3/a-i2952s.pdf> (acceso 22/06/2018).

HONTY G. Y GUDYNAS E. (2007). Agrocombustibles y desarrollo sostenible en américa latina y el caribe situación, desafíos y opciones de acción. Disponible online en: <http://www.probioma.org.bo/HontyGudynasAgroCombustiblesBolivia.pdf> (acceso 07/10/2015).

HUERGA, I.; DONATO, L. 2012. Avances en la evaluación de la eficiencia energética del proceso de producción de biodiésel para distintas escalas. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 38, 78-85.

HUERGA, I.; HILBERT, J.A.; DONATO, L. 2009. Balances energéticos de la producción argentina de biodiésel con datos locales de la etapa industrial. INTA Reporte, N° Doc IIR-BC-INF-03-09, Buenos Aires, Argentina.

IEA-INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. 2014. Key world energy statistics. Disponible online: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf> (acceso 12/11/2016).

IGLESIAS, D. 2005 "Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario" en Contribuciones a la Economía. Disponible online en: <http://www.eumed.net/ce/2005/dhi-acv.pdf> (acceso 17/10/2017).

INDEC-INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS. 2014. Biocombustibles. Disponible online: http://www.indec.mecon.ar/uploads/informesdeprensa/biocombustibles_11_14.pdf (acceso: 12/11/2016).

INDEC-INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS. 2017. Informes Técnicos vol. 1 n° 153, Energía vol. 1 n° 14 Biocombustibles. Disponible online en: http://www.indec.gov.ar/uploads/informesdeprensa/biocombustibles_08_17.pdf (acceso 12/04/2018).

INSTITUTO DE GESTIÓN DE CIUDADES (2016). Plan Estratégico Territorial Argentina 2016, Provincia de Salta. Disponible online en: <http://www.igc.org.ar/metropolitano/lerma/Docs/1.InfoReferencia/PlanEstrategicoTerritorial.pdf> (acceso 10/08/2018).

INSTITUTO SANTO TOMAS DE AQUINO.(2016). Santiago Educativo. Disponible online en: <http://santiagoeducativo.com/division-poitica/> (acceso 12/08/2018).

INTA-INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA. 2009. Sistema de Clasificación de la cobertura del suelo (Land cover classification system- LCCS). Proyecto Nacional de cobertura y uso del suelo de la República Argentina. INTA PNECO 1643. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.

IPCC-INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (Eds.). IGES, Japón.

ISO, 2006a. ISO Norm 14040:2006. Life cycle assessment: principles and framework. Environmental Management. International Organisation for Standardisation, Ginebra.

ISO, 2006b. ISO Norm 14044:2006. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. Environmental Management. International Organisation for Standardisation, Ginebra.

ISO, 2014. ISO Norm 14046:2014. Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines. International Organisation for Standardisation, Ginebra.

JUNGBLUTH, N.; FAIST EMMENEGGER, M.; DINKEL, F.; STETTLER, O.; DOKA, G.; CHUDACOFF, M.; DAURIAT, A.; GNANSOUNOU, E.; SUTTER, J.; SPIELMANN, M.; KLJUN, N.; SCHLEISS, K. 2007. Life cycle inventories of bioenergy. Data v2.0, ecoinvent report No. 17, Swiss Center for Life Cycle Inventories, Uster, Suiza.

KWON, H-Y.; MUELLER, S.; DUNN, J.B.; WANDER, M.M. 2013. Modeling state-level soil carbon emission factors under various scenarios for direct land use change associated with United States biofuel feedstock production. *Biomass and Bioenergy*, 55, 299-310.

LEY NACIONAL N° 26.093/2006. Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentable de Biocombustibles. Poder Legislativo de la República Argentina, Buenos Aires, Argentina.

LEY NACIONAL N° 26.942/2014. Impuesto sobre los combustibles líquidos y el gas natural. Poder Legislativo de la República Argentina, Buenos Aires, Argentina.

MARTELLOTO, E; SALINAS, A; LOVERA, E; SALAS, P; ÁLVAREZ, C; GIUBERGIA, J; LINGUA, S. 2005. Inventario y caracterización del riego suplementario en la provincia de Córdoba. Riego presurizado. Pívor central. INTA, Boletín N°10, Manfredi, Argentina.

MENDOZA INVEST. Cultivos en los oasis productivos de Mendoza. Disponible online en: http://invest.mendoza.gov.ar/?page_id=2530 (acceso 29/11/2018).

MINISTERIO DE PRODUCCIÓN Y TRABAJO.2017. SECRETARIA DE AGROINDUSTRIA DE ARGENTINA. Disponible online en: <https://www.argentina.gob.ar/agroindustria> (acceso 29/11/2017)

MORÁBITO, J.; REARTE, E.; SCHILARDI, C.; MARTIN, L.; SALATINO, S. 2015. Desempeño del riego de equipos de pivote central en la provincia de Mendoza, Argentina. CONAGUA. 12p.

MUNICIPALIDAD DE LA COCHA (sin fecha). Características de La Cocha. Disponible online en: <https://www.lacocha.gob.ar/?q=turismo> (acceso 10/08/2018).

MURPHY, D.J.; HALL, C.A. 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185, 102-118.

PANICHELLI, L. 2006. Analisis de ciclo de vida (ACV) de la produccion de biodiesel (B100) en Argentina. Escuela para graduados Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Buenos Aires.90p.

PANICHELLI, L.; DAURIAT, A.; GNANSOUNOU, E. 2009. Life cycle assessment of soybean-based biodiésel in Argentina for export. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 144-159.

PANIGATTI, J.L. 2010. *Argentina 200 años, 200 suelos*. Ed. INTA Buenos Aires. 345 p.

PIASTRELLINI R. (2015). Aportes a la determinación de la huella ambiental de biocombustibles en argentina. Influencia de los sistemas de manejo de cultivos sobre el impacto del consumo de agua, del uso del suelo y de las emisiones de gases de efecto invernadero para el biodiésel de soja. Tesis doctoral. Universidad tecnológica nacional.

PIASTRELLINI, R., ARENA, A. P., & CIVIT, B. 2017. Energy life-cycle analysis of soybean biodiesel: Effects of tillage and water management. *Energy*, 126, 13-20.

PIASTRELLINI, R; CURADELLI, S; ARENA, A.; CIVIT, B.2013.Indicadores ambientales y barreras comerciales - el caso de la huella de carbono. VII Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería - ENIDI 2013.

PIASTRELLINI, ROXANA & CIVIT, B & ARENA, ALEJANDRO. (2015). Influence of Agricultural Practices on Biotic Production Potential and Climate Regulation Potential. A Case Study for Life Cycle Assessment of Soybean (*Glycine max*) in Argentina. *Sustainability*. 2015. 4386-4410. 10.3390/su7044386.

- PIMENTEL, D.; PATZEK, T.W. 2005. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Research*, 14, 65–76.
- PLANELELLES, M. Europa limita ahora los biocombustibles por el daño medioambiental. EL PAÍS. Disponible online en: https://elpais.com/economia/2016/12/10/actualidad/1481376500_627713.html (acceso 09/04/2018).
- POSSETTO, M., NUÑEZ, S. 2011. Cadenas de valor en el sector agroindustrial en la provincia de San Luis. *Industrialización. Revista de estudios regionales*, 7, 197-214.
- PRÉ CONSULTANTS. 2014. <http://www.pre-sustainability.com> (acceso: 02/04/2014).
- REBORATTI, C. 2010. Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Revista de geografía Norte Grande*, (45), 63-76. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100005> (acceso en 12/04/2018).
- REIJNDERS, L., HUIJBREGTS, M.A.J. 2008b. Biogenic greenhouse gas emissions linked to the life cycles of biodiesel derived from European rapeseed and Brazilian soybeans. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1943–1948.
- REIJNDERS, L.; HUIJBREGTS, M.A.J. 2008a. Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases. *Journal of Cleaner Production*, 16, 477–482.
- REJÓN, R. 2015. Europa rectifica y obliga ahora a reducir el uso del biodiesel. EL DIARIO.ES. Disponible online en: https://www.eldiario.es/sociedad/Europa-rectifica-frenara-burbuja-biodiesel_0_382162476.html (acceso 09/04/2018).
- REN 21. Renewables 2017. Global Status Report, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf; 2017 (acceso 29/07/ 2018).
- REVISTA MARGENES AGROPECUARIOS. 2017. Costos y márgenes de soja de primera y de segunda. Disponible online en: <https://www.margenes.com/margenesonline/> (acceso 20/03/2017).
- SANTIAGO TUR. (Sin fecha) Clima semitropical continental en Santiago del Estero. Disponible online en: <http://www.santiagotur.com/index.php/clima/17634-clima-semitropical-continental> (acceso 12/08/2018).
- SAYDS-SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE. 2008. El avance de la frontera agropecuaria y sus consecuencias. Disponible online: http://www.grr.org.ar/sym/avance_soja.pdf (acceso 07/11/2016).
- SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R.A.; DONG, F.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J., TOKGOZ, S.; HAYES, D.; YU, T-H. 2008. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319, 1238-1240.
- SENSA-SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA. 2009. Importación y exportación de fertilizantes. Disponible online: www.sensa.gov.ar/contenido.php?to=n&in=524 (acceso 26/08/2016).
- SENSA-SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA. 2012. Importación de fitoterápicos-año 2012. Disponible online: <http://www.ciafa.org.ar/fito2.html> (acceso 26/08/2016).
- SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRABOSKI, M.; SHAPOURI, H. 1998. Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. Final Report, US Department of Agriculture-USDA, US Department of Energy-DOE, Estados Unidos, 286 p.
- SIIA-SISTEMA INTEGRADO DE INFORMACIÓN AGROPECUARIA. 2015. Estimaciones agrícolas informe semanal al 1 de mayo del 2015. Disponible online: http://www.siia.gov.ar/_informes/Estimaciones_Agricolas (acceso 04/08/2015).

SORIA, F.; FANDOS, C. 2003. Estimación de superficie cultivada con soja y maíz utilizando datos de los satélites landsat en la provincia de Tucumán y áreas de influencia campaña 2001/2002. Disponible online en: http://www.eeaoc.org.ar/up-load/upload/l_sojmaiz_Abr03.pdf (acceso 22/03/2014).

THE EUROBSERV'ER. 2010. Biofuels barometer. Systèmes solaires le journal des énergies renouvelables N° 198.

UNEP- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME/SETAC-SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. 2005. Working environment in Life Cycle Assessment. Poulsen; Jensen; Antonsson; Bengtsson; Karling; Schmidt; Brekke; Becker; Verschoor (Eds.). SETAC, Pensacola, 95 p.

VIGLIZZO, E.; CARREÑO, L.V.; PEREYRA, H.; RICARD, F.; CLATT, J.; PINCÉN, D. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental, 1° ed.; Viglizzo, E.F.; Jobbágy, E., (Eds.), Editorial: INTA, Buenos Aires, Argentina, Volumen 1, 9-16.

WATSON, R.T.; ZINYOWERA, M.C.; MOSS, R.H.; DOKKEN, D.J. (EDS.). 1996. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Working Group II Report, IPCC. Disponible online: <http://www.ipcc-wg2.gov/publications/SAR/> (acceso 21/03/2014).

YBRAN, R.; LACELLI, G. 2016. Informe estadístico mercado de la soja. INTA. Disponible online en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_informe_estadistico_del_mercado_de_soja.pdf (acceso en 22/11/2017).

ANEXOS

Anexo I

Tabla A1: Balance de energía de la producción de biodiesel de soja considerando el sistema agrícola Tucumán.

Producción del grano	Demanda de energía (MJ/kg de biodiesel)	Generación de energía (MJ/kg de biodiesel)
Semilla	6,12E-01	
Transporte semilla	3,91E-01	
Glifosato	1,92E+00	
2.4 D	2,10E-01	
Coadyuvante	2,97E-01	
Curasemilla (Regent et)	9,16E-02	
Inoculante	4,26E-02	
Superfosfato	3,98E+00	
Cipermetrina	7,78E-02	
Endosulfan	3,24E-01	
Pyraclostrobin+epiconazole	2,66E-01	
Transporte insumos	2,53E+00	
Energía y combustible	2,45E+00	
Acondicionamiento del grano y extracción de aceite*		
Transporte del grano	1,99E+01	
Energía y combustible de acondicionamiento del grano	3,84E-01	
Ácido fosfórico	3,54E-03	
Bentonita	9,12E-04	
Agua de red	4,77E-04	
Energía y combustible, extracción de aceite	1,64E-01	
Transporte de insumos	1,56E-03	
Planta de extracción	1,62E-04	
Coproductos		
Harina de soja		8,94E+01
Síntesis del biodiesel*		
Metanol	1,27E+01	
Hidróxido de sodio	1,25E-01	
Ácido sulfúrico	1,29E-02	
Agua de red	1,71E-03	
Energía y combustibles	1,10E+00	
Planta de esterificación	5,33E-03	
Transporte de insumos	1,74E-01	
Total Energía consumida	4,77E+01	
Productos y coproductos		
Biodiesel		3,70E+01
Glicerina		1,98E+00
Total Energía generada		1,28E+02
Índice EROI	7,75E-01	

* Datos extraídos de Piastrellini (2015)

Tabla A2: Balance de energía de la producción de biodiesel de soja considerando el sistema Salta.

Producción del grano	Demanda de energía (MJ/kg de biodiesel)	Generación de energía (MJ/kg de biodiesel)
Semilla	1,02E+00	
Transporte semilla	6,66E-01	
Glifosato	4,45E+00	
Inoculante	1,24E+00	
Regent et	1,60E-01	
Superfosfato	8,18E+00	
Round Up	6,12E-01	
Karate zeon	3,48E-01	
Intrepid	5,00E-02	
Clorpirifos	5,65E-01	
Connect	4,22E-01	
Pyraclostrobin+epiconazole	3,87E-01	
Transporte insumos	5,39E+00	
Energía y combustible	3,78E+00	
Acondicionamiento del grano y extracción de aceite*		
Transporte del grano	1,25E+02	
Energía y combustible de acondicionamiento del grano	3,84E-01	
Ácido fosfórico	3,54E-03	
Bentonita	9,12E-04	
Agua de red	4,77E-04	
Energía y combustible, extracción de aceite	1,64E-01	
Transporte de insumos	1,56E-03	
Planta de extracción	1,62E-04	
Coproduetos		
Harina de soja		8,94E+01
Síntesis del biodiesel*		
Metanol	1,27E+01	
Hidróxido de sodio	1,25E-01	
Ácido sulfúrico	1,29E-02	
Agua de red	1,71E-03	
Energía y combustibles	1,10E+00	
Planta de esterificación	5,33E-03	
Transporte de insumos	1,74E-01	
Total Energía consumida	1,67E+02	
Productos y coproduetos		
Biodiesel		3,70E+01
Glicerina		1,98E+00
Total Energía generada		1,28E+02
Índice EROI	2,22E-01	

* Datos extraídos de Piastrellini (2015)

Tabla A3: Balance de energía de la producción de biodiesel de soja considerando el sistema agrícola Santiago del Estero.

	Demanda de energía (MJ/kg de biodiesel)	Generación de energía (MJ/kg de biodiesel)
Producción del grano		
Semilla	3,14E+00	
Transporte semilla	3,95E-01	
Glifosato	3,14E+00	
Inoculante	9,99E-01	
Metsulfuron metil	1,80E-03	
2.4 d	1,23E-01	
Adyuvantes y correct. lt/ha	4,35E-01	
Karate zeon 5% lt/ha	9,50E-02	
Intrepid lt/ha	4,03E-02	
Clorpirifos	4,56E-01	
Connect lt/ha	3,41E-01	
Pyraclostrobin+epiconazole	3,12E-01	
Transporte insumos	3,31E-01	
Energía y combustible	2,87E+00	
Acondicionamiento del grano y extracción de aceite*		
Transporte del grano	7,90E+01	
Energía y combustible de acondicionamiento del grano	3,84E-01	
Ácido fosfórico	3,54E-03	
Bentonita	9,12E-04	
Agua de red	4,77E-04	
Energía y combustible, extracción de aceite	1,64E-01	
Transporte de insumos	1,56E-03	
Planta de extracción	1,62E-04	
Coproductos		
Harina de soja		8,94E+01
Síntesis del biodiesel*		
Metanol	1,27E+01	
Hidróxido de sodio	1,25E-01	
Ácido sulfúrico	1,29E-02	
Agua de red	1,71E-03	
Energía y combustibles	1,10E+00	
Planta de esterificación	5,33E-03	
Transporte de insumos	1,74E-01	
Total Energía consumida	1,06E+02	
Productos y coproductos		
Biodiesel		3,70E+01
Glicerina		1,98E+00
Total Energía generada		1,28E+02
Indice EROI	3,48E-01	

* Datos extraídos de Piastrellini (2015)

Tabla A4: Balance de energía de la producción de biodiesel de soja considerando el sistema agrícola Mendoza 1.

	Demanda de energía (MJ/kg de biodiesel)	Generación de energía (MJ/kg de biodiesel)
Producción del grano		
Semilla	6,34E-01	
Transporte semilla	3,19E-01	
Fosfato diamónico	4,89E+00	
urea	1,81E+01	
trifluralina	1,30E-01	
karate	6,72E-02	
Transporte insumos	6,46E+00	
Energía y combustible	3,60E+02	
Acondicionamiento del grano y extracción de aceite*		
Transporte del grano	6,02E+01	
Energía y combustible de acondicionamiento del grano	3,84E-01	
Ácido fosfórico	3,54E-03	
Bentonita	9,12E-04	
Agua de red	4,77E-04	
Energía y combustible, extracción de aceite	1,64E-01	
Transporte de insumos	1,56E-03	
Planta de extracción	1,62E-04	
Coproductos		
Harina de soja		8,94E+01
Síntesis del biodiesel*		
Metanol	1,27E+01	
Hidróxido de sodio	1,25E-01	
Ácido sulfúrico	1,29E-02	
Agua de red	1,71E-03	
Energía y combustibles	1,10E+00	
Planta de esterificación	5,33E-03	
Transporte de insumos	1,74E-01	
Total Energía consumida	4,66E+02	
Productos y coproductos		
Biodiesel		3,70E+01
Glicerina		1,98E+00
Total Energía generada		1,28E+02
Indice EROI	7,94E-02	

* Datos extraídos de Piastrellini (2015)

Tabla A5: Balance de energía de la producción de biodiesel de soja considerando el sistema agrícola Mendoza 2.

	Demanda de energía (MJ/kg de biodiesel)	Generación de energía (MJ/kg de biodiesel)
Producción del grano		
Semilla	9,52E-01	
Transporte semilla	4,79E-01	
Fosfato diamónico	7,33E+00	
Urea	2,72E+01	
Trifluralina	1,74E+00	
Karate	1,01E-01	
Transporte insumos	9,69E+00	
Energía y combustible	2,78E+02	
Acondicionamiento del grano y extracción de aceite*		
Transporte del grano	9,03E+01	
Energía y combustible de acondicionamiento del grano	3,84E-01	
Ácido fosfórico	3,54E-03	
Bentonita	9,12E-04	
Agua de red	4,77E-04	
Energía y combustible, extracción de aceite	1,64E-01	
Transporte de insumos	1,56E-03	
Planta de extracción	1,62E-04	
Coproductos		
Harina de soja		8,94E+01
Síntesis del biodiesel*		
Metanol	1,27E+01	
Hidróxido de sodio	1,25E-01	
Ácido sulfúrico	1,29E-02	
Agua de red	1,71E-03	
Energía y combustibles	1,10E+00	
Planta de esterificación	5,33E-03	
Transporte de insumos	1,74E-01	
Total Energía consumida	4,30E+02	
Productos y coproductos		
Biodiesel		3,70E+01
Glicerina		1,98E+00
Total Energía generada		1,28E+02
Indice EROI	8,60E-02	

* Datos extraídos de Piastrellini (2015)

ANEXO II

Tabla A6: Contribución de cada proceso a las emisiones totales de CO₂e, para el sistema Tucumán

Tucumán	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/MJ
Semilla	2,76E-02	5,26E-03
Pesticidas	2,78E-02	5,29E-03
Fertilizantes	3,10E-02	5,89E-03
Transporte para insumos y materia prima	2,92E-02	5,56E-03
Energía para labores agrícolas	2,74E-03	5,21E-04
TOTAL		1,72E-02

Tabla A7: Contribución de cada proceso a las emisiones totales de CO₂e, para el sistema Salta

Salta	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/MJ
Semilla	4,59E-02	8,73E-03
Pesticidas	7,26E-02	1,38E-02
Fertilizantes	6,39E-02	1,21E-02
Transporte de insumos y materia prima	6,07E-02	1,15E-02
Energía para labores agrícolas	4,24E-03	8,06E-04
TOTAL		4,70E-02

Tabla A8: Contribución de cada proceso a las emisiones totales de CO₂e, para el sistema Santiago del Estero

Santiago del Estero	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/MJ
Semilla	3,71E-02	7,05E-03
Pesticidas	5,19E-02	9,87E-03
Fertilizantes	0,00E+00	0,00E+00
Transporte de insumos y materia prima	7,28E-03	1,38E-03
Energía para labores agrícolas	3,22E-03	6,11E-04
TOTAL		1,89E-02

Tabla A9: Contribución de cada proceso a las emisiones totales de CO₂e, para el sistema Mendoza 1

Mendoza 1	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/MJ
Semilla	2,87E-02	5,45E-03
Pesticidas	4,92E-02	9,35E-03
Fertilizantes	1,48E-01	2,81E-02
Transporte para insumos y materia prima	6,80E-02	1,29E-02
Energía para labores agrícolas	4,06E-01	7,72E-02
TOTAL		1,33E-01

Tabla A10: Contribución de cada proceso a las emisiones totales de CO₂e, para el sistema Mendoza 2

Mendoza 2	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/MJ
Semilla	4,30E-02	8,18E-03
Pesticidas	8,65E-02	1,64E-02
Fertilizantes	2,22E-01	4,22E-02
Transporte para insumos y materia prima	1,02E-01	1,94E-02
Energía para labores agrícolas	3,15E-01	5,98E-02
TOTAL		1,46E-01

Tabla A11: Emisiones de GEI de la producción de Biodiesel de soja en las provincias de Salta, Santiago del Estero, Tucumán y Mendoza.

Categoría de impacto CO ₂ eq/MJ)	de (kg)	Grano de soja-Mendoza sistema 1	Grano de soja-Mendoza sistema 2	Grano de soja-Salta	Grano de soja-Santiago del Estero	Grano de soja-Tucumán	Región Pampeana seco
IPCC GWP 100a		1,33E-01	1,46E-01	4,70E-02	1,89E-02	2,25E-02	5,70E-02
Acondicionamiento y extracción de aceite		2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,00E-04
Transesterificación		7,88E-03	7,88E-03	7,88E-03	7,88E-03	7,88E-03	7,88E-03
Total emisiones		1,41E-01	1,54E-01	5,51E-02	2,70E-02	3,06E-02	6,51E-02

Tabla A12: Contribución de cada GEI a las emisiones totales de CO₂e, para cada sistema agrícola

Sustancia	Grano de soja-Mendoza_sist 1	Grano de soja-Mendoza_sist 2	Grano de soja-Salta	Grano de soja-Santiago del Estero	Grano de soja-Tucumán
Carbon dioxide, fossil	6,05E-01	6,64E-01	1,93E-01	6,21E-02	8,86E-02
Methane, fossil	6,77E-02	6,39E-02	1,28E-02	5,50E-03	5,81E-03
Carbon dioxide, land transformation	1,66E-02	2,48E-02	2,67E-02	2,09E-02	1,60E-02
Dinitrogen monoxide	9,74E-03	1,42E-02	1,37E-02	1,06E-02	7,60E-03
Total	7,00E-01	7,68E-01	2,47E-01	9,95E-02	1,19E-01
Substancias remanentes	1,41E-03	1,72E-03	1,29E-03	3,99E-04	6,16E-04