

DISPONIBILIDAD DE RASTROJOS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO EN URUGUAY

URUGUAYAN STRAW AVAILABILITY AND ITS ENERGY POTENTIAL

Gabriel Peña ¹, Pedro Curto-Risso ²

Recibido: 24/3/2023 y Aceptado: 15/6/2023
ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (74 - 94)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Eric Prouzet en Unsplash.

1 Facultad de ingeniería - UdelaR
Uruguay
gabpena@fing.edu.uy
<https://orcid.org/0000-0003-0414-2658>

2 Facultad de ingeniería - UdelaR
Uruguay
pcurto@fing.edu.uy
<https://orcid.org/0000-0002-7331-8621>

RESUMEN

A nivel internacional, el peso relativo de las fuentes de energía renovables aún es muy inferior al de las fósiles. En este contexto, la biomasa, si bien presenta una gran tradición, continúa vigente y con perspectivas de crecimiento. En los últimos años, debido al incremento en la competencia entre el uso del suelo con fines energéticos y para la producción de alimentos, el aprovechamiento de biomasa residual ha surgido como una de las alternativas de mayor interés para lidiar con esta disyuntiva. Uruguay, país con gran tradición de uso de leña y una matriz energética con gran presencia de fuentes renovables, presenta grandes superficies de tierra destinadas a la producción de granos (soja, arroz, trigo, maíz, cebada cervecera y sorgo). Este trabajo tiene como objetivo determinar la disponibilidad de rastrojos cosechables, así como su potencial energético total y distribuido en el territorio. Se puede concluir que los rastrojos de cultivos uruguayos presentan un potencial muy elevado, destacándose, por ejemplo, que la cosecha parcial de los rastrojos de soja, arroz o trigo fue suficiente para satisfacer la demanda

de leña del Uruguay (industrial o residencial). En algunas zafas era posible satisfacer toda la demanda nacional con rastrojos de un solo cultivo.

Palabras clave: Biomasa residual, Rastrojos, Disponibilidad, Potencial energético, Capacidad de sustituir la biomasa tradicional.

ABSTRACT

On an international level, the relative weight of renewable energy sources is still much lower than that of fossil fuels. In this context, biomass, although it has a great tradition, today it is still used and with growth prospects. In recent years, due to increased competition between the use of land for energy purposes and for food production, the use of residual biomass has emerged as one of the most interesting alternatives to deal with this dilemma. Uruguay, a country with a long tradition of using firewood and an

energy matrix with a large presence of renewable sources, has large areas of land devoted to the production of grains (soybeans, rice, wheat, corn, malting barley and sorghum). This work aims to determine the availability of harvestable straws, as well as its energy potential and distribution in the territory. It can be concluded that crop straws have a very high potential, highlighting for instance, that the partial harvest of soybean, rice or wheat straws was sufficient to satisfy the demand for firewood in Uruguay in the years 2018 to 2022 (industrial or residential). In some harvests it was possible to satisfy the entire national demand with stubble from a single crop.

Keywords: *Waste biomass, Straws, Availability, Energy potential, Ability to replace traditional biomass*

INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades humanas, la producción y consumo de energía, son de las más intensivas en el consumo de recursos, así como de las principales fuentes de emisiones contaminantes, representado alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Barbosa-Cortez, 2008; Naciones Unidas, 2019). Por tal motivo, una de las Metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 (Energía Asequible y no Contaminante) para el 2030, es aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas (Naciones Unidas, 2019). Si bien en las últimas décadas comenzó a incorporar el uso de nuevas fuentes de energía renovable, a nivel internacional el peso relativo de las fuentes renovables aún es muy inferior al

de las fósiles, donde estas últimas representaron el 78,9% del consumo de energía total (contemplando todos los usos) en el 2019 (Ritchie, 2020).

En Uruguay el uso de la biomasa y particularmente la leña, presenta una fuerte tradición. Los sectores de consumo de la biomasa son principalmente el residencial e industrial, en los cuales el peso relativo de la biomasa es altamente relevante sobre el total (DNE-MIEM, 2019).

La utilización de biomasa como combustible tiene asociado una serie de ventajas y desventajas respecto a otros combustibles o fuentes de energía. En primer lugar, la biomasa es una fuente de energía renovable (cuando es manejada bajo determinados criterios de sostenibilidad), la cual es formada continuamente a partir de la interacción de CO₂, aire, agua, suelo y luz solar con las plantas y animales. Cuando la biomasa es quemada, o utilizada luego de ser convertida en otro tipo de combustible, el carbono de la biomasa reacciona con el oxígeno del aire generando CO₂, que se libera a la atmósfera. Si se quema completamente, la cantidad de CO₂ generado es igual a la que adquirió la planta en su crecimiento. En otras palabras, el dióxido de carbono generado en la combustión de la biomasa no incrementa el CO₂ del planeta, por ello la biomasa podría considerarse neutra en emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, este ciclo de emisiones neutras no contempla las emisiones generadas por los consumos de energéticos en los procesos de siembra, cosecha y transporte de la biomasa (Basu, 2010; Saidur, 2011; Vassilev, 2010).

Comparado con otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, la biomasa puede ser almacenada por largos períodos de tiempo. Por lo tanto, la generación de energía con biomasa es gestionable y fiable, a diferencia de otras fuentes de energía renovable, como la eólica o solar, cuya generación depende de que las condiciones meteorológicas sean favorables. A partir de la biomasa pueden ser generados

otros tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos o directamente energía térmica y/o eléctrica (Saidur, 2011).

Dependiendo de las condiciones locales, puede ser un recurso barato y de gran disponibilidad, por lo cual presenta un potencial en la diversificación del suministro de combustibles y favorece a la soberanía energética. Esto es relevante en países como Uruguay, los cuales no cuentan con reservas probadas de petróleo, carbón mineral ni gas natural. Adicionalmente, colabora con la revitalización rural mediante la creación de puestos de trabajo.

Por otro lado, como principales desventajas se puede destacar su baja densidad energética, lo cual aumenta los costos de transporte además de tener altos costos de cosecha y almacenamiento. Esto hace que la disponibilidad de la misma sea regional. En aplicaciones de quema directa, si esta no se realiza en buenas condiciones, puede contribuir fuertemente al calentamiento global y a la emisión de material particulado. Además, su combustión, u otras alternativas de conversión termoquímica, pueden generar emisiones de compuestos contaminantes, inclusive hay emisiones generadas por el lixiviado de la biomasa. Sumado a esto, los residuos de la combustión y otros procesos térmicos no presentan un uso claro. La explotación de cultivos energéticos puede generar daños al suelo y a la biodiversidad, o en ocasiones puede generar una competencia con la producción de alimentos.

En los últimos años, debido al incremento en la competencia entre el uso de la tierra con fines energéticos y para la producción de alimentos, el aprovechamiento de biomasa residual (y en particular los residuos agrícolas) ha surgido como una de las alternativas de mayor interés para lidiar con esta disyuntiva (Horvat, 2018).

Los residuos agrícolas y agroindustriales como rastrojos de cultivos, bagazo de caña, cáscaras de arroz y café, así como residuos de la industria forestal tales como aserrín, corteza, entre otros,

son generados en todo el planeta. A pesar de las grandes cantidades generadas de estas biomasa, su utilización como combustible es baja (Werther, 2000). La biomasa no tradicional suele tener un uso local debido a su baja densidad aparente bulk comparado con la biomasa tradicional, a fin de minimizar los costos de transporte (Horvat, 2018; Werther, 2000). Debido a esto, muchas aplicaciones se limitan a plantas de pequeño porte, con desempeños inferiores comparados con plantas de gran porte (Werther, 2000). Así mismo, la densificación de estas biomasa (pellets y briquetas) es necesaria para viabilizar el transporte de mayores distancias.

Sumado a las problemáticas que pueden generar los residuos agrícolas directamente relacionadas con su combustión, también son relevantes los impactos que se pueden generar en el ecosistema debido a su extracción. Desde el punto de vista agrícola, la disposición de los rastrojos en el campo cumple un rol de vital importancia para la conservación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, evitando (o minimizando) la erosión generada por la lluvia y el viento, favoreciendo la reincorporación de nutrientes al suelo, permitiendo la captura de carbono, reduciendo la pérdida de materia orgánica y por lo tanto minimizando la pérdida de fertilidad del suelo (IPCC, 2006; Monteleone, 2015; Sastre, 2015; USDA - NRCS, 2006; Whittaker, 2014). Es así que, retirar los rastrojos puede generar un impacto negativo en el ambiente, afectando la fertilidad del suelo y por lo tanto la productividad de futuras cosechas. El impacto que se deriva por la ausencia de rastrojos en el campo depende de las condiciones locales (clima, tipo de suelo, topografía), así como del cultivo en sí y de la gestión agrícola aplicada (rotación de cultivos, fertilización, etc). Por lo tanto, el impacto ambiental generado depende de cada aplicación en particular (Bird, 2011).

A pesar de las desventajas que presentan los residuos agrícolas frente a las biomasa tradicionales, los mismos son utilizados como fuente de energía en varios países como Dina-

marca, Reino Unido, España, Suecia, China e India, donde se han instalado plantas de gran escala, siendo la ventaja principal de estas biomasa su reducido impacto en uso de la tierra. Dinamarca es el pionero en la utilización rastrojos en plantas de generación de gran porte desde 1989 (Batidzirai, 2016). Países como España, cuentan con asociaciones de todos los actores del sector de la bioenergía (Avebiom, 2021) que impulsan el uso de la biomasa en general y los rastrojos de cultivos en particular.

Las Directivas Europeas de Energías Renovables (RED) (EP, 2009) promueve el uso de biomasa residuales como forma de minimizar la competencia entre los cultivos energéticos y alimenticios, previniendo los cambios en el uso de la tierra (Monteleone, 2015). En algunos casos particulares, la gestión agrícola de rotación de cultivos requiere la extracción de los rastrojos del campo, siendo habitual (principalmente en las superficies con riego) el quemado del rastrojo a cielo abierto. Esto se debe a que la presencia del rastrojo dificulta la implantación del siguiente cultivo. Esta combustión no solo repercute en emisiones de CO₂ sino que también genera daños en la estructura del suelo y facilita su erosión, destruye microorganismos útiles y genera pérdida de nutrientes y por lo tanto la calidad del suelo (Batidzirai, 2016).

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), es probable que a largo plazo los residuos agrícolas contribuyan a la matriz energética mundial entre 15 y 70 EJ (ExaJoules), principalmente en países donde la producción agrícola es importante (Batidzirai, 2016). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) (Bird, 2011), la recolección de rastrojos para su posterior uso como energético solamente se justifica en caso donde se determinen beneficios ambientales, económicos y sociales respecto a la retención de los mismos en el campo, siendo fundamental el análisis caso a caso debido a la gran dependencia y variabilidad con las condiciones locales y particulares de cada aplicación.

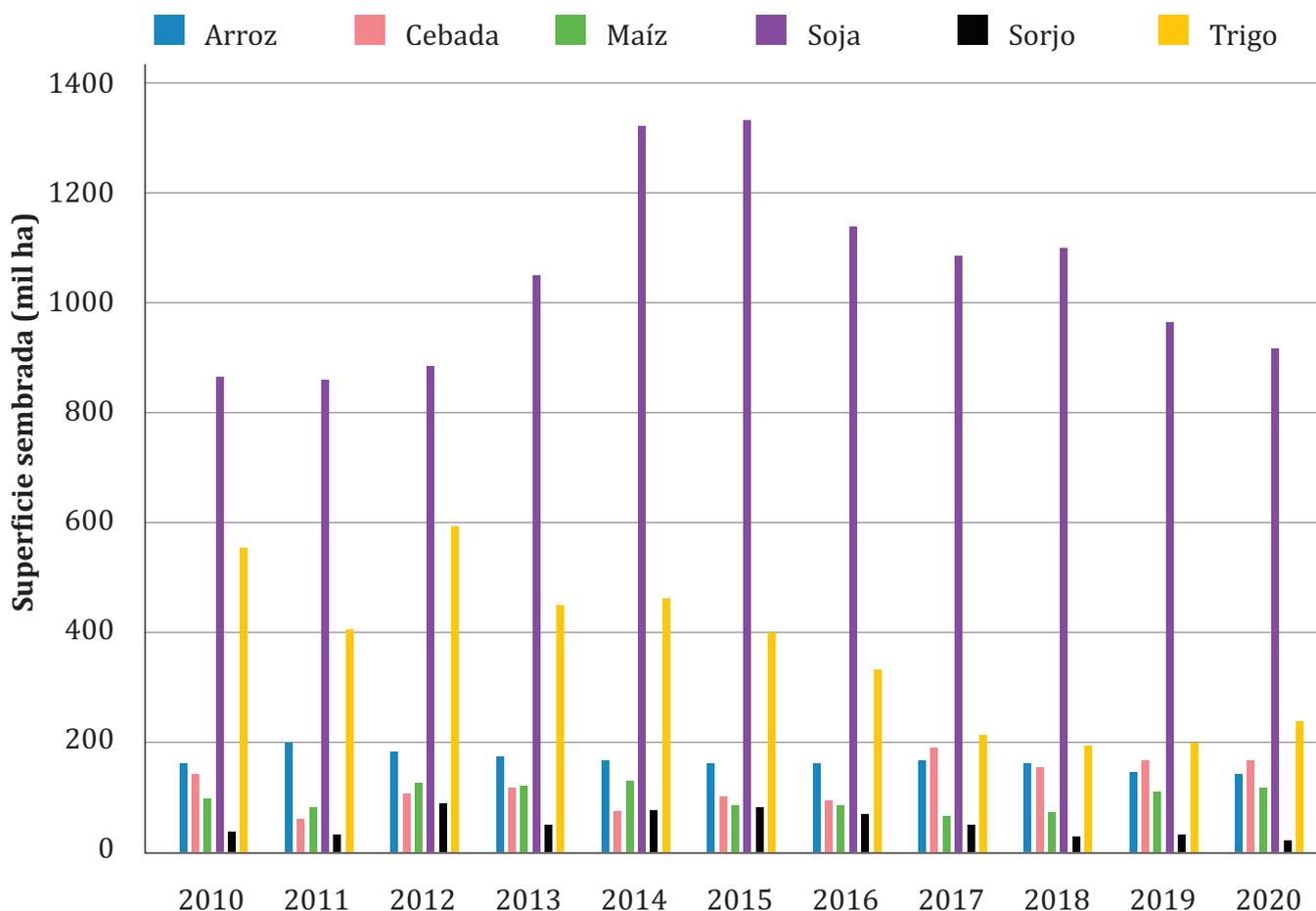


A nivel internacional, el peso relativo de las fuentes renovables aún es muy inferior al de las fósiles, donde estas últimas representaron el 78,9% del consumo de energía total (contemplando todos los usos) en el 2019.

Los principales cultivos del Uruguay, en términos de superficie cultivada y producción de grano, son la soja, arroz, trigo, maíz, cebada, cerveza y sorgo (DIEA-MGAP, 2020). Por lo tanto, son los cultivos que generan mayor cantidad de biomasa residual (en términos absolutos a nivel nacional), y cabe preguntarse qué potencial energético se dispone en ese residuo (o parte de él), esto motiva el interés de este estudio. Existe una gran diferencia entre las áreas sembradas de los diferentes cultivos. En la figura 1 se observa la evolución de la superficie sembrada de cada cultivo entre 2010 y 2020¹, donde se aprecia notoriamente que el cultivo de soja es el más extendido, superando las 1.3 millones de hectáreas en las zafas de 2013/14 y 2014/15 (DIEA-MGAP, 2020). El resto de cultivos en estudio presentan superficies cultivadas notablemente menores, que pueden ordenarse en forma decreciente (en los últimos años) como: trigo, cebada, arroz, maíz y por último sorgo. No obstante, el rendimiento (o producción por unidad de superficie) de cada cultivo es diferente. Por lo tanto, las producciones totales no mantienen las tendencias o diferencias observadas en la superficie cultivada. De este modo, respecto a la producción total de grano, se ordenan de forma decreciente como: soja, arroz, trigo, maíz, cebada y sorgo.

1 Los años indicados en el gráfico corresponden al segundo año del año agrícola, por ejemplo 2010 corresponde a la zafra 2009/2010.

Figura 1. Evolución anual de la superficie sembrada



Fuente: Elaboración propia con datos del MGAP (DIEA-MGAP, 2020).

El principal residuo de los cultivos de grano es la biomasa aérea (exceptuando el grano en sí), el cual se denomina rastrojo. Esta biomasa cumple un rol vital en la sustentabilidad de la producción agrícola, protegiendo al suelo de la erosión, así como conservando sus propiedades y devolviendo nutrientes (Batidzirai, 2016; USDA-NRCS, 2006). Por lo tanto su retiro afecta directamente la calidad del suelo y la producción de los futuros cultivos, factores determinantes al momento de estimar la cantidad de rastrojo cosechable con fines energéticos.

Estimar la fracción cosechable, o los requerimientos mínimos de biomasa que debe quedar en el campo, no es simple dado que depende

de las condiciones climáticas del lugar, tipo de suelo, topografía, las prácticas agrícolas, el cultivo en cuestión, entre otras, existiendo gran variedad de criterios en los estudios consultados (Batidzirai, 2016; Monteleone, 2015; USDA-NRCS, 2006).

Si bien la disponibilidad y potencial de estas biomásas en Uruguay es elevado (según se verá a continuación) casi no hay estudios al respecto. Carlos Faroppa (Faroppa, 2010) realizó una evaluación de disponibilidad de biomasa residual en Uruguay, donde cuantifica el potencial del uso de rastrojos de trigo y cebada (entre otras biomásas residuales, principalmente residuos forestales). De acuerdo con lo estimado por

López (2016), el potencial de generación de biogás a partir de los rastrojos de avena, cebada, girasol, maíz, soja, sorgo y trigo. Los mapas energéticos desarrollados por la DNE (DNE, 2017), si bien especifican el potencial energético a partir de algunas fuentes renovables (solar, eólica y microhidráulica), respecto a la biomasa sólo detallan la cobertura forestal y zonas con emprendimientos agropecuarios sin una estimación del potencial energético. También se pueden ver detalles del uso de biomasa no tradicionales del Uruguay en la memoria del proyecto ANII FSE 102079-14 (AUTOR, 2017) (“Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales”), siendo éste último el antecesor del presente estudio.

El objetivo de este trabajo es estimar el potencial energético disponible a partir del aprovechamiento de rastrojos de los principales cultivos del Uruguay, determinando su potencial a nivel nacional y por unidad de superficie cultivada, así como identificar las zonas geográficas de mayor concentración. Para ello, en primera instancia se debe cuantificar la cantidad de rastrojo generado y estimar la fracción cosechable a partir de restricciones técnicas y ambientales.

A partir de la estimación de disponibilidad de biomasa residual y la cuantificación de su potencial energético se puede concluir que los rastrojos de cultivos presentan un potencial muy elevado, promediando 1284 ktep por año.

El documento se organiza de la siguiente forma, en la siguiente sección se presenta la metodología utilizada para determinar la cantidad de rastrojos y su potencial energético; luego se muestran los resultados, sobre la cantidad de rastrojos, considerando las limitaciones de uso de suelo y de producción, el potencial energético y su distribución en el Uruguay y por último se presentan las conclusiones y se proponen temas a estudiar a futuro.

METODOLOGÍA

Estimación de rastrojos cosechables

Disponibilidad de rastrojos totales: El residuo en estudio consiste en rastrojo del cultivo. Al ser el grano la fracción de interés del cultivo, se tiene registro anual (global nacional) de la producción total de grano, superficie cultivada y rendimiento de cada cultivo a partir del Anuario Estadístico Agropecuario (DIEA-MGAP, 2018) y registro regional únicamente de la superficie sembrada a partir del último censo nacional (DIEA-MGAP, 2012), ambos elaborados por la Oficina de Estadísticas Agropecuarias del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (DIEA-MAGP). No se cuenta con un relevamiento de la biomasa residual que genera cada uno. Por lo tanto, para su estimación se debe utilizar el índice de cosecha (IC) de cada cultivo. Este se define como el cociente entre la masa de grano cosechado (m_{gr}) y la masa aérea total del cultivo (m_{AT}), ambos en base seca (Amanullah, 2016). Este índice permite cuantificar la producción por hectárea de biomasa residual (rendimiento de rastrojo total [$kg_{RTot} ha^{-1}$]) de cada cultivo en función del rendimiento de grano ($\eta_{Gr} [kg_{Gr} ha^{-1}]$). En las ecuaciones 1 y 2 se explica el cálculo del índice de cosecha y su empleo para calcular el rendimiento de rastrojo. Para cada cultivo, los factores que influyen en el IC son el contenido energético y proteico de las semillas, las temperaturas extremas (ya sea frías o calientes) durante el desarrollo reproductivo del cultivo, las condi-

ciones climáticas (ecosistema), la fecha de siembra, el grado de madurez en la cosecha (longitud del ciclo del cultivar), el cultivar, entre otras (Amanullah, 2016; Bongiovanni, 2001; Fan, 2017; Kemanian, 2007;).

$$IC = \frac{m_{Gr}}{m_{AT}} \quad (1)$$

$$\eta_{tot} = \frac{1 - IC}{IC} \quad \eta_{Gr} = \frac{\text{Producción}}{\text{Superficie}} \quad (2)$$

A efectos del cálculo del rendimiento de rastrojo total de cada cultivo, los índices de cosecha se calcularon con base en funciones y datos de la literatura consultada (Amanullah, 2016; Bongiovanni, 2001; Fan, 2017; Kemanian, 2007; Khaliq, 2018; Tang, 2017; Unkovich, 2010), así como valores estimados a nivel nacional. Es importante destacar que, si bien el IC es una relación entre masas secas, la información de producción y rendimiento de grano presentada en el Anuario Estadístico Agropecuario se encuentra en masa de grano con 13% de humedad (b.h.). Por lo tanto, antes de calcular los rendimientos de rastrojo se debe calcular el rendimiento de masa seca de grano.

Disponibilidad de rastrojo cosechable: A fin de estimar la cantidad de rastrojo cosechable (o fracción cosechable respecto al total generado), se debe contemplar el efecto que implica retirar el mismo del campo para garantizar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, manteniendo los niveles de producción y minimizando los impactos ambientales asociados a su retiro (Batidzirai, 2016; IPCC, 2006; Whittaker, 2014). El impacto de retirar parte de los rastrojos (inclusive cosechando fracciones bajas) depende de varios factores como el tipo de cultivo, el rendimiento del mismo, la rotación de cultivos (incluyendo pasturas) o cultivos continuos, las prácticas agrícolas (con o sin laboreo de la tierra), clima y las condiciones físicas del suelo como la topografía, entre otros (Batidzirai, 2016; IPCC, 2006; Whittaker, 2014).

De acuerdo a lo estudiado por Lal (2009), en situaciones de monocultivo de maíz, el 25% de los rastrojos podrían ser cosechados conservando el carbono orgánico del suelo.

Cabe destacar que la gestión agrícola de los cultivos de cebada, maíz, soja, sorgo y trigo en Uruguay se realizan minimizando el laboreo de la tierra y con rotación de cultivos (incorporando pasturas) bajo un Plan de Uso y Manejo del Suelo (MGAP, 2018), a fin de garantizar la conservación del mismo (Ley 15.239). Estos dos aspectos mejoran las cualidades de suelo respecto a técnicas de laboreo convencional y/o monocultivo por períodos prolongados, reduciendo la erosión, así como la pérdida de materia orgánica y agotamiento de nutrientes (Batidzirai, 2016).

Adicionalmente, en los sistemas con cosecha de rastrojos, para mantener los niveles de producción se deben compensar los nutrientes extraídos al retirar los rastrojos. Por lo tanto es necesario un aumento en el uso de fertilizantes (Batidzirai, 2016; Giuntoli, 2013; Monteleone, 2015; Sastre, 2015).

Según Batidzirai et al. (2016), en los sistemas de cultivos de maíz y trigo sin laboreo (en inglés *no-tillage practice*) donde permanecen 2000 kg ha⁻¹ de rastrojos en el campo, se logra controlar la erosión aceptablemente. Sin embargo, para algunos cultivos implicaría extraer porcentajes muy altos de rastrojo, lo cual puede generar problemas en el suelo.

Además, a partir de la consulta con expertos en el área, se estima que bajo las condiciones climáticas y de siembra en Uruguay, aconsejable no retirar más del 60% del rastrojo generado para evitar (o minimizar) los problemas de erosión así como para contemplar las limitaciones tecnológicas en la cosecha del material.

Por lo tanto, en este trabajo, al tratarse de cultivos sin laboreo, se determinó la cantidad de rastrojo cosechable de forma tal que se cumplan los dos requisitos simultáneamente:

1. En el campo deben quedar al menos 2000 kg ha⁻¹ de rastrojo.
2. La fracción máxima de rastrojos a cosechar es del 60% respecto al total generado.

De esta forma, los rendimientos se calculan según las ecuaciones 3 y 4, donde η_{RTot} corresponde al rendimiento de rastrojo total generado por hectárea y η_{RCos} al rendimiento de rastrojo cosechable [kg ha⁻¹].

$$\text{Si } 0,4 \eta_{RTot} > 2000 \text{ kg ha}^{-1} \Rightarrow \eta_{RCos} = 0,6\eta_{RTot} \quad (3)$$

$$\text{Si } 0,4 \eta_{RTot} \leq 2000 \text{ kg ha}^{-1} \Rightarrow \eta_{RCos} = \eta_{RTot} - 2000 \text{ kg ha}^{-1} \quad (4)$$

Evolución temporal y distribución geográfica

Se dispone de dos fuentes de información para la estimación de rastrojos (disponibles y cosechables). Por un lado, un histórico anual donde se compila la información total nacional, discriminada por tipo de cultivo pero no por zona territorial o región. Esta información se encuentra en los Anuarios Estadísticos Agropecuarios (MGAP, 2020), los cuales detallan el área sembrada (AS), producción total de grano y rendimiento para cada cultivo como promedio nacional. Por otro lado, se cuenta con información discriminada por regiones (o áreas de enumeración - AE) pero solamente de años específicos. Esta información se obtiene a partir del Censo Agropecuario, siendo el último del 2011 (DIEA-MGAP, 2012). La información publicada del Censo detalla el AS de cada cultivo en cada AE pero no su rendimiento. Por lo tanto, para estimar la disponibilidad de rastrojo cosechable en cada AE se utilizó un rendimiento promedio obtenido a partir del rendimiento nacional del 2011 para cada cultivo (datos del Anuario Estadístico de Uruguay).

De este modo, es posible determinar la evolución temporal (histórico) de la disponibilidad de rastrojos cosechables a nivel nacional (sin discriminación regional) y la distribución geográfica (por AE) solamente para el año 2011.

Determinación del Potencial Energético

Una vez estimada la cantidad de rastrojo cosechable por hectárea (η_{RCos}), se determina la densidad energética por unidad de superficie sembrada (DE) [kJ ha⁻¹], es decir, la energía disponible por unidad de superficie sembrada, como el producto del rendimiento de rastrojo cosechable por el Poder Calorífico Neto² (PCN) según se explica en la ecuación 5. Conociendo el AS total de cada cultivo, se calcula el potencial energético (PE) de cada cultivo como el producto entre DE y AS del mismo (ecuación 6). Nótese que con esta metodología se determina el potencial (o densidad) térmico máximo debido a que el cálculo no está afectado por el rendimiento de un eventual sistema.

$$DE = \eta_{RCos} PCN \quad (5)$$

$$PE = DE \cdot AS \quad (6)$$

El PCN se determinó a partir del poder calorífico superior (PCS), el contenido de hidrógeno (H) y la humedad de las biomásas (W) según la ecuación 7 (UNE-EN, 2011), donde h_{fg} corresponde a la entalpía de vaporización del agua a la temperatura de referencia.

$$PCN = PCS - (w + 9H) h_{fg} \quad (7)$$

2 Definido según la norma UNE-EN 14918.

Dado que no es conveniente realizar fardos con biomasas que contengan más de 15% de humedad (bh) (Hinge, 2009), para el caso de los rastrojos de arroz, maíz y sorgo, los cuales suelen tener humedad inicial mayor a este valor, se los consideró con 15% de humedad, estimando que primero se reduce su humedad de forma natural y luego son enfardados.

Dentro de cada AE existe una fracción del terreno cultivada y otra sin cultivar, más aún parte del terreno puede cultivarse con cultivos de invierno y verano en el mismo año. Con la finalidad de poder contemplar estos factores y conociendo la superficie cultivada (área sembrada - AS) de cada región (área de enumeración), se define la densidad energética específica (DE') para cada AE como el potencial energético de cada AE dividido la superficie de cada AE, según se

explica en la ecuación 8. De este modo, se puede estimar, para cualquier superficie arbitraria, el potencial energético de la misma considerando uno o varios cultivos, los cuales no tienen por qué estar cultivados en la misma tierra.

$$DE'_i = \frac{AS_i}{AE_i} DE \quad (8)$$

RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan las propiedades de los rastrojos (humedad y poder calorífico neto) así como el índice de cosecha de cada cultivo utilizados para los cálculos de potencial y densidad energética presentados en esta sección.

Tabla 1. Propiedades de los rastrojos e índice de cosecha de cada cultivo

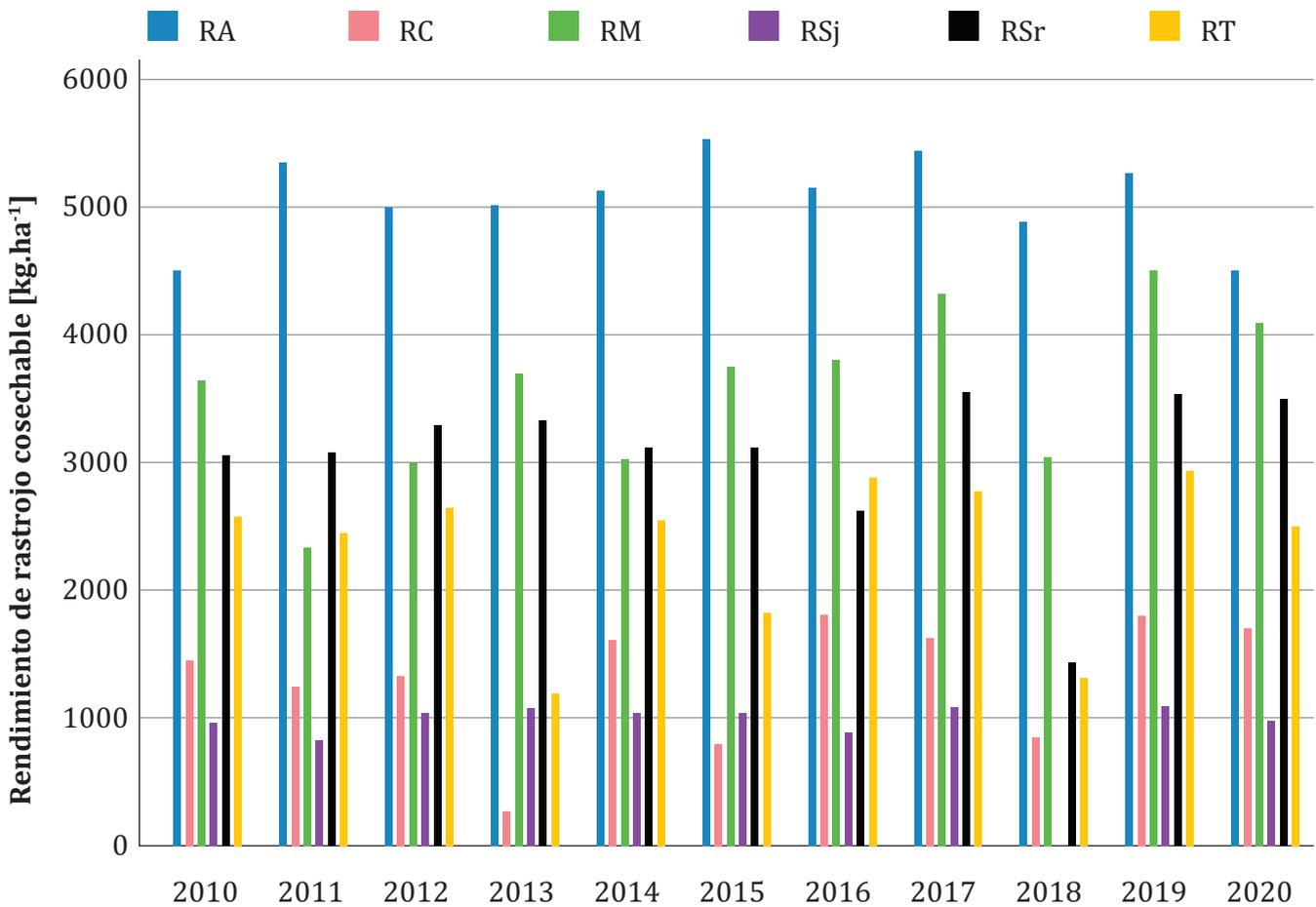
	RA	RC	RM	RSj	RSr	RT
W (%)	15,0	8,8	15,0	9,2	15,0	8,1
PCN (MJ/kg _{Seco})	13,51	16,68	16,66	16,23	16,28	16,27
IC (%)	45,0	45,0	44,1	39,4	40,0	38,5

Disponibilidad de rastrojos

A partir de los datos suministrados por el Anuario Estadístico Agropecuario (MGAP, 2020), se observó elevadas superficies cultivadas con granos, principalmente de soja. No obstante, debido a que los rendimientos de producción de cada cultivo son diferentes y por tanto la producción vegetal es diferente, la cantidad de rastrojos que genera cada cultivo por unidad de superficie también es muy diferente. En la

figura 2 se presenta la evolución entre 2010 y 2020 de la cantidad de rastrojo cosechable por hectárea de los seis cultivos: Rastrojo de Arroz (RA); Rastrojo de Cebada (RC); Rastrojo de Maíz (RM); Rastrojo de Soja (RSj); Rastrojo de Sorgo (RSr); Rastrojo de Trigo (RT), contemplando las dos restricciones antes mencionadas (dejar al menos de rastrojos en el campo y no retirar más del 60% del rastrojo generado).

Figura 2. Evolución anual del rendimiento de rastrojo cosechable.



A partir de estos resultados se observa que los rastrojos de soja (principal cultivo en extensión) son los de menor rendimiento ($kg_{RCos} ha^{-1}$), donde la limitante se encuentra en la cantidad de rastrojo que se debe dejar en el campo como cobertura del (estimada en $2000 kg ha^{-1}$). Para los cultivos de soja, difícilmente se puede cosechar más de $1000 kg ha^{-1}$ (oscila entre 840 y $1090 kg ha^{-1}$) de rastrojos (lo cual representa un tercio del rastrojo generado), más aún considerando que su relación C:N es baja y por ende su velocidad de descomposición es alta (Rodríguez, 2011). En particular para la zafra 2017/18, el rendimiento de grano fue tan bajo que no era posible cosechar rastrojos de soja bajo estos supuestos.

En orden creciente de rendimientos de rastrojos cosechables a la soja le sigue el cultivo de cebada, con rendimientos entre 270 y $1800 kg_{RCos} ha^{-1}$, lo cual representa una fracción cosechada entre el 12 y 47% del rastrojo generado.

Con rendimientos de rastrojo cosechable superiores a la cebada se encuentran el sorgo y trigo, los cuales oscilaron entre 1450 a 3550 y 1200 a $2650 kg_{RCos} ha^{-1}$ respectivamente. Para estos cultivos, la fracción cosechable superó el 40% y en muchas zafras alcanzó el límite de 60%. En la figura 3 se observan fotografías de las diferencias cualitativas de la disponibilidad de rastrojo en el campo luego de cosechado el grano para los cultivos de soja (izquierda), sorgo (centro) y trigo (derecha).

Figura 3. Fotografías de los rastrojos inmediatamente después de cosechar el grano.



Izquierda: Soja; Centro: Sorgo; Derecha: Trigo

Seguidamente se encuentran los rastrojos de maíz, quienes presentaron rendimientos de rastrojo cosechable entre 2300 y $4500 \text{ kg}_{RCos} \text{ ha}^{-1}$, limitados en todas las zafras por la restricción de cosechar como máximo el 60% de lo generado. Por último, el cultivo de arroz es el que genera mayor cantidad de rastrojos cosechables (entre 4500 y $5500 \text{ kg}_{RCos} \text{ ha}^{-1}$) también limitando su cosecha al 60% de lo generado.

Contemplando los rendimientos de rastrojos cosechables de cada uno, así como el área sembrada por zafra para cada cultivo, a nivel nacional los rastrojos de arroz, soja y trigo han sido los generados en mayor cantidad, según se aprecia en la figura 4. Los rastrojos de arroz muestran una producción con pocas oscilaciones, superando los 800 Gg por año en la mayoría de las zafras. Los rastrojos de trigo, hasta la zafra del 2011/2012 fueron los de mayor disponibilidad alcanzando 1,6 millones de toneladas. A partir de la zafra del 2012/13 los rastrojos de soja fueron los principales (con excepción del 2017/18), superando las 700 Gg y alcanzando 1400 Gg en las zafras 2013/14 y 2014/15. De este modo se compensa el bajo rendimiento de rastrojo cosechable del cultivo de soja con su gran extensión superficial, siendo por lo tanto una de las biomásas residuales con mayor disponibilidad.

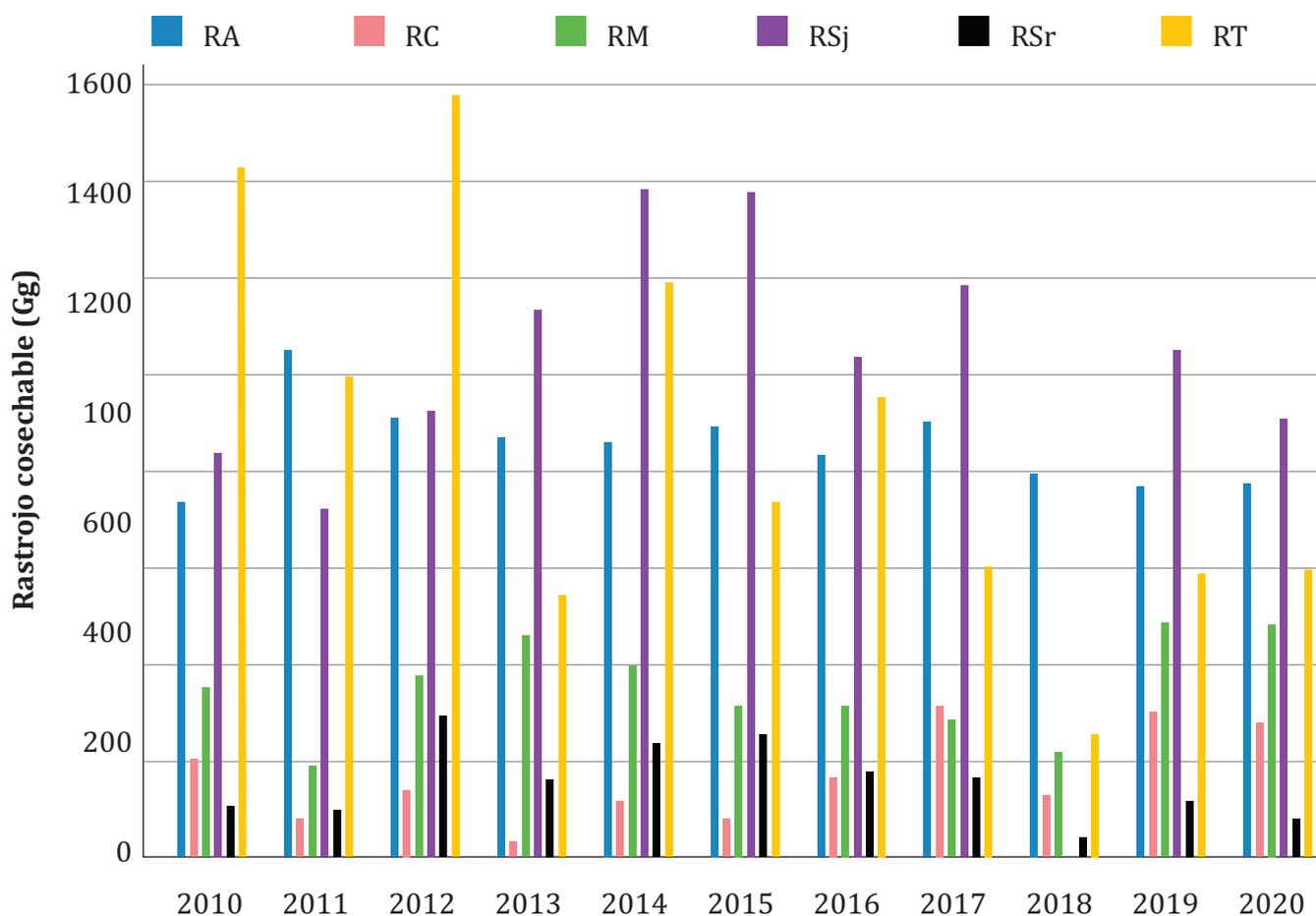
Los rastrojos de maíz son la cuarta biomasa en términos de masa disponible, los cuales han

alcanzado casi el medio millón de toneladas en los últimos años (con registro). Por debajo del maíz, en términos de rastrojo cosechable total, se posiciona la cebada desde la zafra de 2015/16, a partir de donde se alcanzó una disponibilidad entre 200 y 300 Gg por año. En último lugar se encuentran los rastrojos de sorgo, quienes muestran una tendencia a la baja en los últimos años con cantidades que no superan los 200 Gg por año.



Foto de Waldemar de Unsplash.

Figura 4. Evolución anual del rastrojo cosechable a nivel nacional



Potencial energético

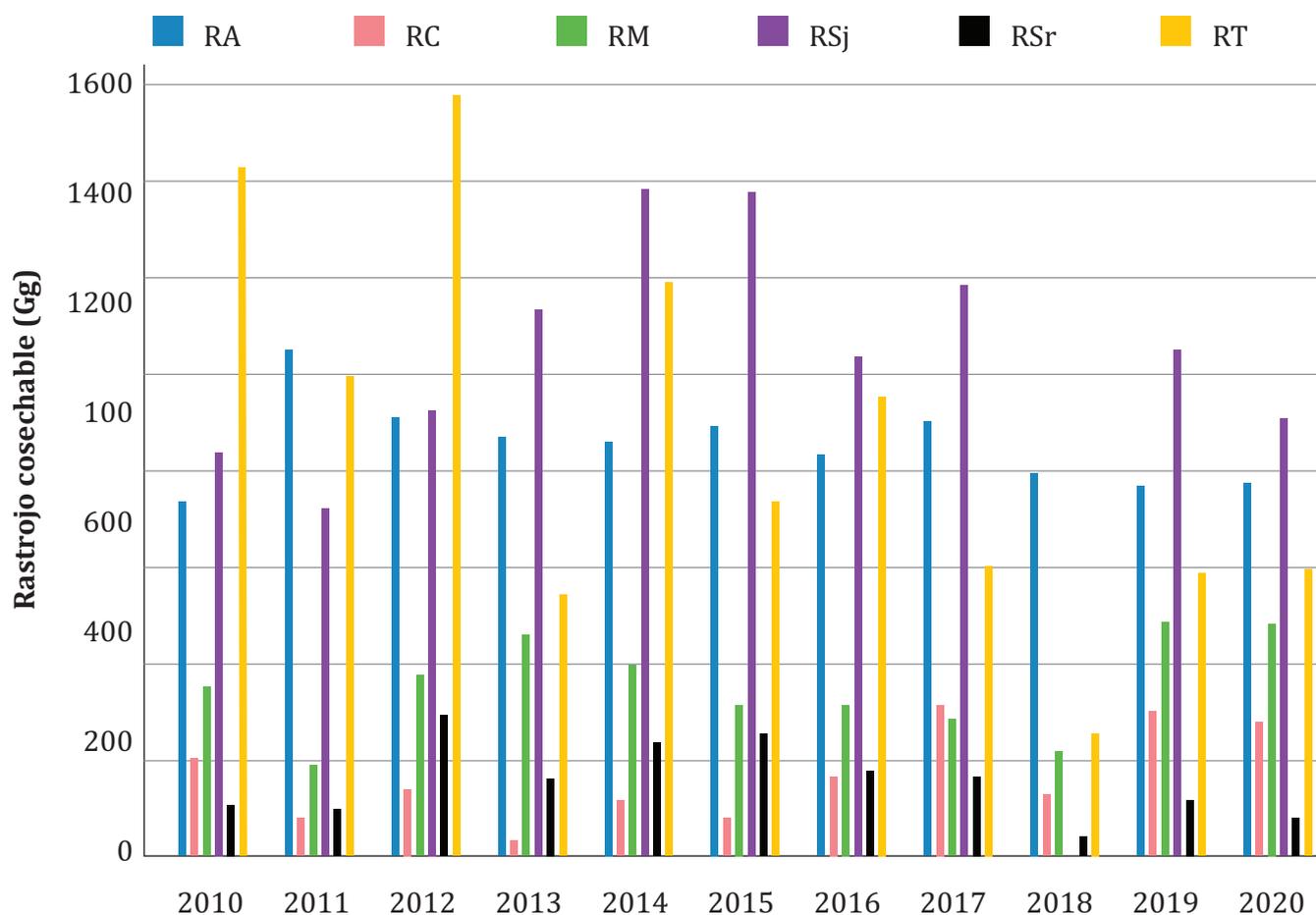
Hasta ahora se ha evaluado la disponibilidad en masa seca de cada biomasa residual. Debido a que los poderes caloríficos de las biomásas son relativamente similares, la densidad y potencial energético (térmico), determinados con las ecuaciones 5 y 6, presentan tendencias similares a las observadas para la disponibilidad en masa.

En la figura 5 se grafica la evolución temporal de la densidad energética, es decir, la capacidad de generación térmica a partir de la cosecha de una fracción de los rastrojos generados en una hectárea ($GJ ha^{-1}$). Se observa que los rastrojos de arroz fueron los de mayor densidad energética ($70 GJ ha^{-1}$ aproximadamente) y los de soja

los de menor densidad energética ($17 GJ ha^{-1}$ aproximadamente). Esto se debe a que son los cultivos con mayor y menor rendimiento de grano, o sea los de menor producción vegetal y por ende también menor rendimiento de rastrojo cosechable. En forma creciente respecto a la densidad energética se ordenan como soja, cebada, sorgo y trigo, maíz y por último arroz.

Considerando que el límite entre una industria “pequeña” y “mediana” en Uruguay es un consumo de 3000 toneladas de leña por año (con humedad próxima a 25% en b.h.) (Almeida, 2001), el equivalente en superficie necesaria para suplir la demanda energética de ese consumo de leña sería de 730 ha de arroz, 2350 ha de cebada, 870 ha de maíz, 3150 ha de soja, 1000 ha de sorgo o 1370 ha de trigo.

Figura 5. Evolución anual de densidad energética.



La densidad energética de cada rastrojo junto con la superficie cultivada, dan como resultado el potencial energético de generación térmica a nivel nacional para cada biomasa residual. Estos resultados, junto con los consumos de leña en el sector industrial, residencial y total (según el histórico de datos del Balance Nacional de Energía (BNE) (DNE-MIEM, 2019) se presentan en la figura 6.

Como principales resultados se destaca que los rastrojos de soja son los de mayor potencial energético a nivel nacional en los últimos años debido a que la soja fue el cultivo con más extensión territorial (representando aproximadamente el 28% del potencial total), seguido por los rastrojos de trigo y arroz (26 y 24% respectivamente).

El potencial energético de cada uno de estos rastrojos es suficiente (o al menos del orden) para satisfacer toda la demanda de leña del sector industrial o residencial del Uruguay, e inclusive para algunos años era posible satisfacer toda la demanda nacional con rastrojos de trigo o soja. Por lo tanto, si bien las cualidades como combustible de los rastrojos son inferiores a la de biomásas tradicionales (AUTOR, 2022), aprovechando estas biomásas residuales podría prescindirse de cultivos energéticos (con fines en la combustión directa³)⁴.

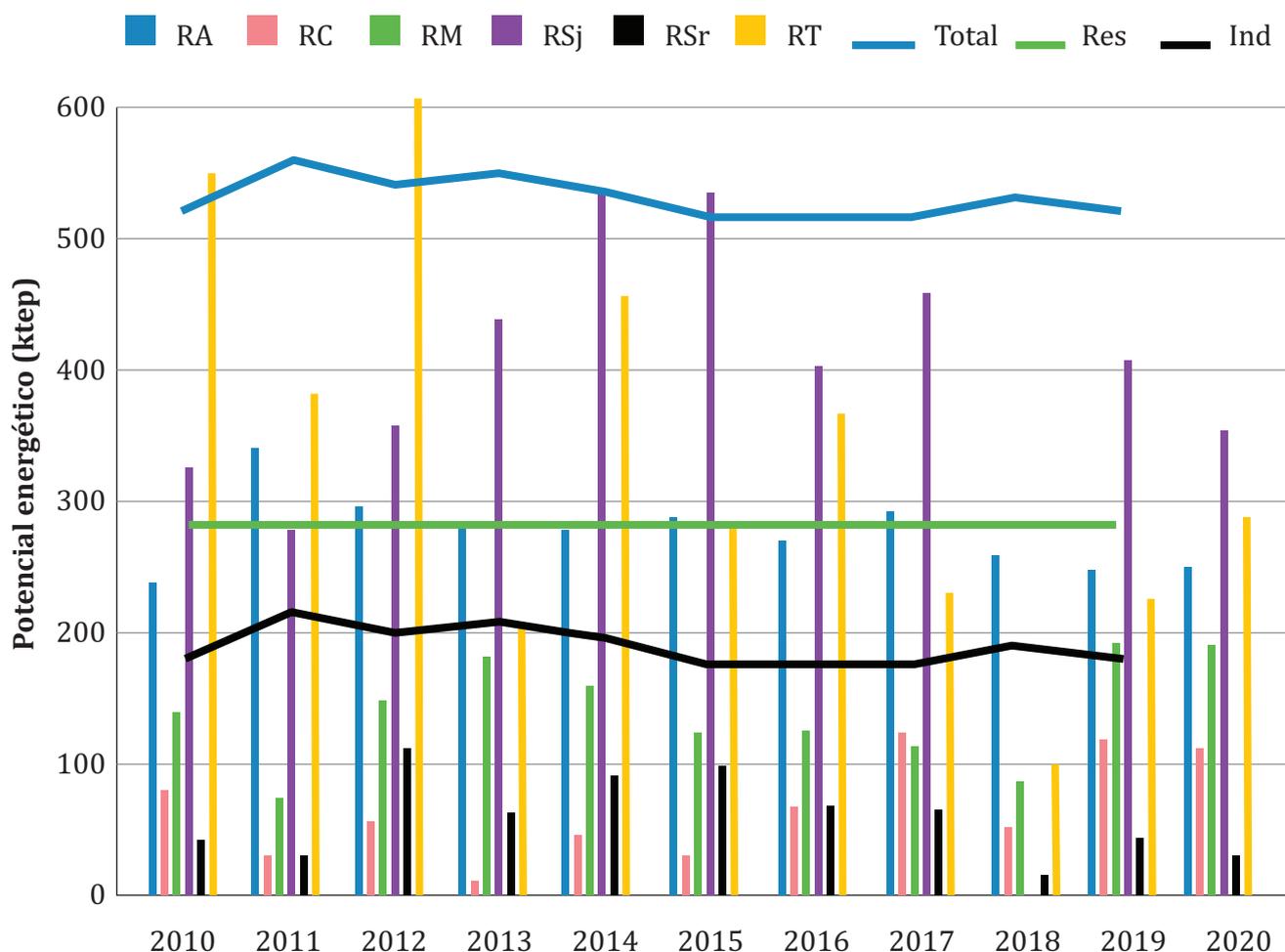
3 No se incluye cultivos energéticos con fines en la producción de biocombustibles como etanol, biodiesel, etc.

4 No obstante, una parte significativa de la leña del sector residencial y comercial es para cocción, la cual en principio no sería totalmente sustituible por rastrojos.

Los rastrojos de maíz son la cuarta biomasa residual estudiada en términos de potencial energético, la cual osciló entre 75 y 200 ktep⁵. Por debajo del maíz se posicionan los rastrojos

de cebada y sorgo, los cuales en ninguna zafra superaron las 120 ktep (10% del potencial total aproximadamente).

Figura 6. Evolución anual del potencial energético térmico disponible y consumos de leña total, industrial y residencial.



Este potencial energético principalmente se encuentra disponible en otoño/invierno debido a que varios de estos cultivos son de verano (arroz, maíz, soja y sorgo) por lo que su cosecha se realiza comenzando el otoño. De los últimos 8 años representados en la figura 6, dos tercios corresponden a rastrojos de cultivos de verano, mientras que el tercio restante a cultivos de invierno (27% trigo y 6% cebada).

En la tabla 2 se sintetiza el potencial energético disponible promedio, mínimo y máximo (ktep) de las últimas 11 zafas de cosecha para cada cultivo, así como su disponibilidad temporal (disponible en invierno y verano) y total nacional.

⁵ ktep: kilo tonelada equivalente de petróleo, 1 ktep = 41868 GJ

Tabla 2. Potencial energético disponible (ktep)

Biomasa	Promedio	Mínimo	Máximo
RA	277	238	341
RC	66,4	12,4	124
RM	140	75,2	193
RSj	410	0	356
RSr	60,8	16,1	113
RT	331	98,3	607
Disp. Invierno	887	361	1066
Disp. Verano	397	150	662
Total	1284	511	1577

Distribución geográfica

La distribución geográfica de la densidad energética por unidad de superficie total (no solo sembrada) determinada a partir de los datos del Censo Agropecuario de 2011 se presenta en las figuras 7 y 8.

A partir de estos resultados (figura 7c) se aprecia claramente que el mayor potencial energético (calculado como la sumatoria de todos los rastrojos cosechables) para el año 2011 se encontró en el litoral Oeste del país (Departamentos de Colonia, Soriano y Río Negro), superando en al-

gunas zonas los 35 $Gj ha^{-1}$. El mismo se dividió en partes similares entre rastrojos de cultivos de verano e invierno (figuras 7a y 7b), donde segregando por cultivo, el principal aporte lo realizó el trigo, seguido por la soja, sorgo y por último cebada y maíz (figura 8). Según se observó en la evolución temporal del potencial disponible (figura 6), el cultivo de trigo disminuyó a partir de la cosecha del 2013/2014 por lo que los mapas de disponibilidad total y estacional de los últimos años presentarían variaciones, inclinándose a mayor disponibilidad en el período frío debido a la cosecha de cultivos de verano.

Figura 7. Distribución geográfica de la densidad energética de rastrojos cosechables por estación para el 2011. (a) Disponible en otoño/invierno (b) Disponible en primavera/verano (c) Total anual.

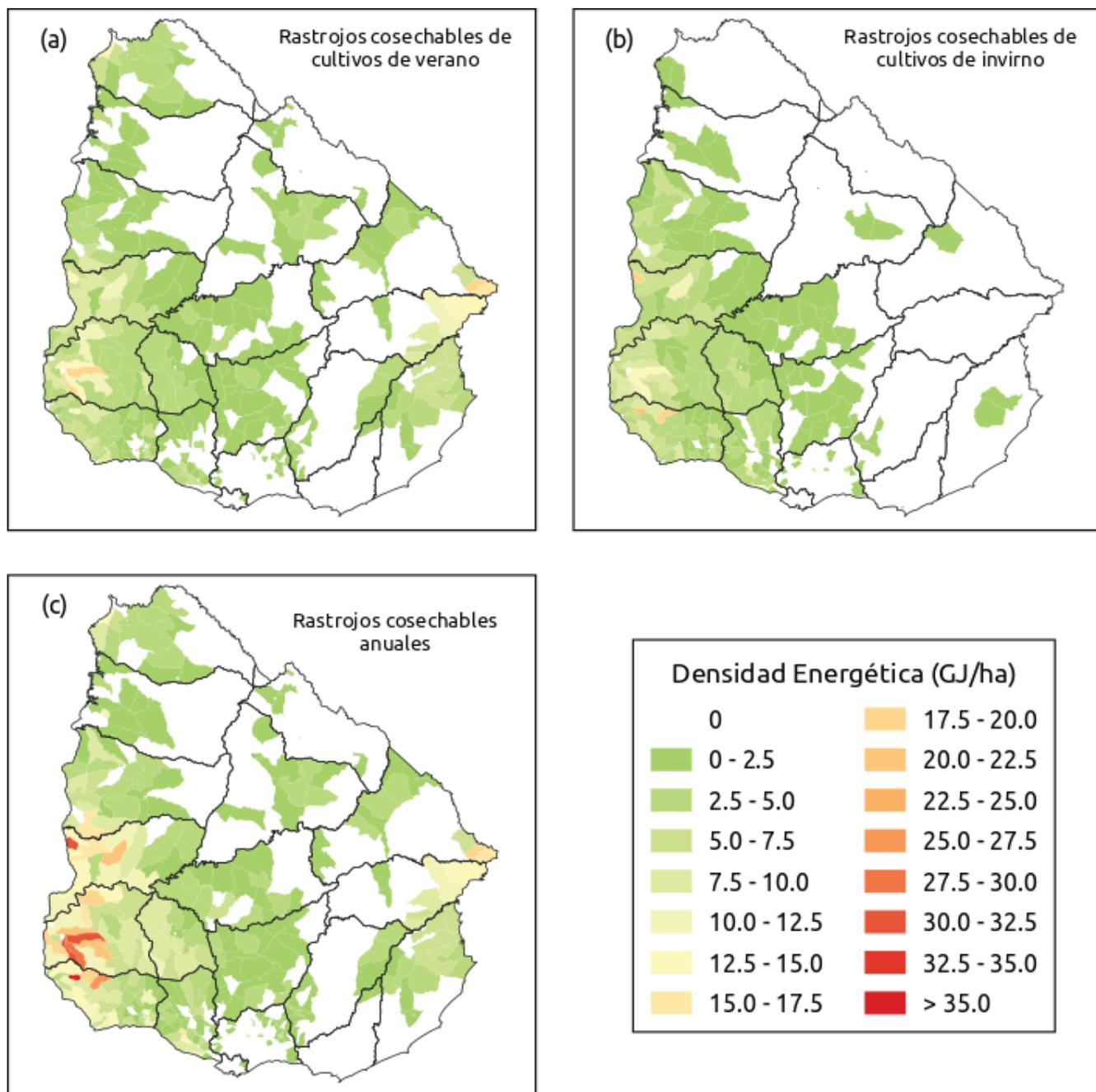
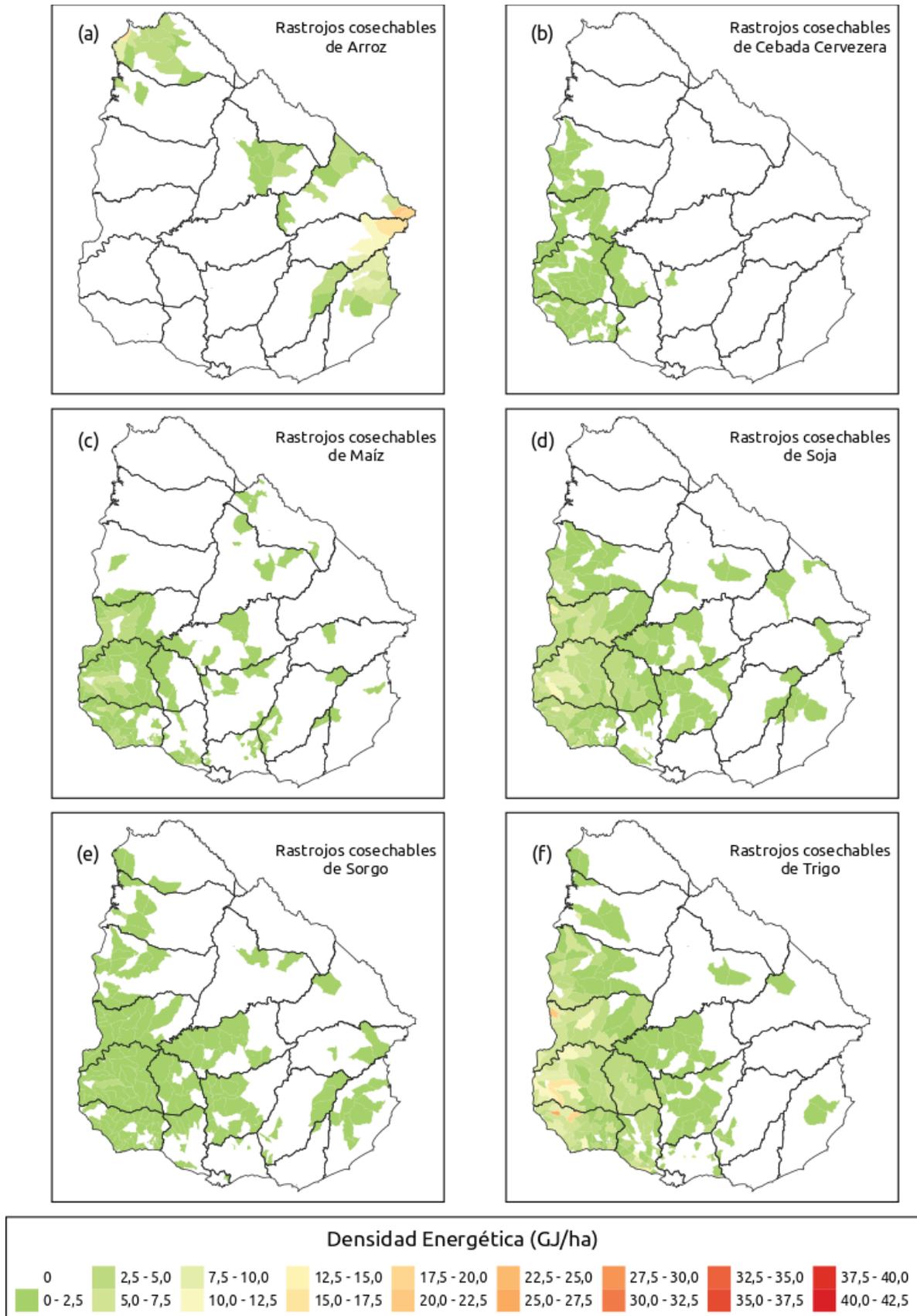


Figura 8. Distribución geográfica de la densidad energética de rastrojos cosechables por cultivo.



Otro foco importante de disponibilidad se encontró en el litoral Este, principalmente en los Departamentos de Cerro Largo y Treinta Y Tres, donde superó los 15 GJ ha^{-1} . Este foco se debe a la disponibilidad de rastrojos de arroz en esta región del país.

La zona Centro y Norte del país presentó disponibilidad de densidades energéticas menores, generalmente por debajo de 10 GJ ha^{-1} , la cual también se divide a grandes rasgos en partes similares entre cultivos de verano e invierno.

Analizando los cultivos de forma independiente, el cultivo de cebada se concentró en el litoral Oeste. Los cultivos de maíz y sorgo también se encontraron con mayor densidad en el litoral Oeste pero con presencia en el Centro y Este del país. Los cultivos de soja y trigo se extendieron por superficies muy similares, con mayores densidades en el litoral Oeste pero con presencia importante en el Centro del país y en menor medida en el Este. Por último, el cultivo de arroz se extendió por el litoral Este y Norte.

Por lo tanto, como análisis preliminar para un estudio de implementación de generación térmica a partir de la combustión de rastrojos, la región del litoral Oeste del país (Colonia, Soriano y Río Negro) es la de mayor concentración de potencial. Además, una planta de combustión de rastrojos debería ser diseñada para trabajar con una variedad de combustibles, pensando en la diversidad de combustibles disponibles y en la complementariedad entre invierno y verano.

CONCLUSIONES

A partir de la estimación de disponibilidad de biomasa residual y la cuantificación de su potencial energético se puede concluir que los rastrojos de cultivos presentan un potencial muy elevado, promediando 1284 ktep por año. Se destaca que la cosecha parcial de los rastrojos de soja, arroz o trigo fue suficiente para satisfacer la demanda de leña del Uruguay (industrial o residencial). En algunas zafras era

posible satisfacer toda la demanda nacional con rastrojos de un solo cultivo.

Existe una gran diferencia en la disponibilidad de biomasa o potencial energético total (a nivel nacional) y por unidad de superficie sembrada (rendimiento de rastrojo cosechable o densidad energética). A nivel nacional, el potencial energético de los rastrojos en los últimos años se ordenó de forma decreciente de la siguiente forma: soja, trigo y arroz, maíz, cebada y sorgo. Mientras que por unidad de superficie cultivada, la densidad energética de los mismos se ordena de forma decreciente como arroz, maíz, trigo y sorgo, cebada y por último soja. Dos tercios de este potencial suele estar disponible en otoño/invierno debido a que son residuos de la cosecha de cultivos de verano.

La disponibilidad de estos rastrojos se encontró principalmente en el litoral Oeste debido a las concentraciones de los cultivos de soja, trigo, sorgo, cebada y maíz. Algunos de estos cultivos también se extendieron por la zona Centro y en menor medida en el Este. Otro foco importante de disponibilidad de rastrojos se encuentra en el litoral Este debido al cultivo de arroz. Los cultivos que presentaron mayores valores de densidad energética por unidad de superficie total (no solo la cultivada) fueron los de soja y trigo en los Departamentos de Soriano y Río Negro, así como el arroz en los Departamentos de Cerro Largo y Treinta y Tres.

Como trabajos a futuro, complementario a los mapas de potencial energético, resulta relevante georeferenciar los focos de consumo de biomasa tradicional (industrias y ciudades) con la finalidad de matchear disponibilidad y consumo para identificar localizaciones y cultivos que minimicen el transporte.

Paralelamente, es de interés realizar ensayos de combustión en una planta piloto y/o en una instalación industrial con la finalidad de identificar los problemas tecnológicos más relevantes y analizar posibles soluciones. ■

REFERENCIAS

- Amanullah & Inamullah. (2016). Dry Matter Partitioning and Harvest Index Differ in Rice Genotypes with Variable Rates of Phosphorus and Zinc Nutrition. *Rice Science*. 23(2). 78–87.
- Avebiom. (2021). Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa. URL: <https://www.avebiom.org/>
- Barbosa-Cortez, L. A., Silva Lora, E. E. & Olivares-Gomez, E. (2008). *Biomassa para energia*. Editora da Unicamp.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Elsevier Inc.
- Batidzirai, B., Valk, M., Wicke, B., Junginger, M., Daioglou, V., Euler, W. & Faaij, A. P. C. (2016). Current and future technical, economic and environmental feasibility of maize and wheat residues supply for biomass energy application: Illustrated for South Africa. *Biomass and Bioenergy*. 92. 106–129.
- Bird, N. (2011). Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emission of Bioenergy. *Technical report, International Energy Agency*.
- Bongiovanni, M. G. (2001). Crecimiento de cultivares de soja de gm iii al viii en fechas de siembra de octubre a diciembre, en villa mercedes, campañas agrícolas 1998/99 y 1999/00.
- AUTOR, Mantero, C., Siri, G., Tancredi, N., Amaya, A., Durante, A., Ibañez, A., Ernst, F., Braga, L., & Flores. M. (2017). Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales. UdelaR, Montevideo, 2017.
- DIEA-MGAP. (2018). Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Anuario Estadístico Agropecuario 2017.
- DIEA-MGAP. (2012). Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. *Censo general agropecuario 2011*.
- DIEA-MGAP. (2020). Oficina de estadísticas agropecuarias (DIEA) / Ministerio de ganadería, agricultura y pesca (MGAP). *Anuario estadístico agropecuario 2020*. URL: <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2020/ANUARIO2020.pdf>.
- Dirección Nacional de Energía (DNE) - Ministerio de Industria Energía y Minería (MIEM). (2019). *Balance Energético 2019*.
- Dirección Nacional de Energía (DNE). (2017). Mapas energéticos. Energía.
- EP. (2009). European Parliament. Renewable energy directive. Directive 200928/EC of the European Parliament and of the council. *Official Journal of the European Union*. 140. 16–62.
- Fan, J., Mcconkey, B., Janzen, H., Townley-smith, L. & Wang, H. (2017). Field Crops Research Harvest index – yield relationship for estimating crop residue in cold continental climates. *Field Crops Research*. 204. 153–157.
- Faroppa, F. (2010). Evaluación de la disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional. *Energy Consulting Services SA*.
- Giuntoli, J., Boulamanti, A. K., Corrado, S., Motegh, M., Agostini, A. & Baxter, D. (2013). Environmental impacts of future bioenergy pathways: The case of electricity from wheat straw bales and pellets. *GCB Bioenergy*. 5(5). 497–512.
- Hinge, J. (2009). Elaboration of a Platform for Increasing Straw Combustion in Sweden, based on Danish Experiences. *Danish Technological Institute, Stockholm*.
- Horvat, I. & Dović, D. (2018). Combustion of agricultural biomass - Issues and solutions. *Transactions of Famena*, 42(1) 75–86.

- IPCC. (2006). Capítulo 5: Tierras de Cultivo. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. 1–74.
- Kemanian, A. R., Stöckle, C. O., Huggins, D. R. & Viega, L. M. (2007). A simple method to estimate harvest index in grain crops. *Field Crops Research*, 103. 208–216.
- Khaliq, Q. A., Karim, M. A.; Saleque, M. A., Haque, M. M., Karim, A. J. M. S. & Mamun, M. A. A.(2018). Evaluation of different fertilizer management guidelines for boro rice cultivation in south central coastal region of Bangladesh. *Annals of Agrarian Science*. 16(4). 466–475.
- Ley 15.239 (1981). Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. *Uso y conservación de los suelos y de las aguas*.
- Lol, R. (2009). Corn Stover Removal for Expanded Uses Reduces Soil Fertility and Structural Stability. *Soil Science Society of American Journal*. 72. 418-426.
- López Moreda, I. (2016). The potential of biogas production in Uruguay. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54. 1580–1591.
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (2018). Resolución N°397/18.
- Monteleone, M., Bernadette Cammerino, A. R., Garofalo, P. & Kami Delivand, M. (2015). Straw-to-soil or straw-to-energy? An optimal trade off in a long term sustainability perspective. *Applied Energy*. 154. 891–899.
- Naciones Unidas. (2019). Objetivos de Desarrollo Sostenible. URL: www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/
- AUTOR. Aprovechamiento energético de rastrojos en Uruguay Disertación doctoral, Universidad de la República, Uruguay. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31283>
- Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Energy. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/energy>
- Rodríguez Pleguezuelo, C. R., Durán Zuazo, V. H., Muriel Fernández, J. L. & Tarifa, D. F. (2011). Descomposición de hojarasca y reciclado del nitrógeno de frutales tropicales y subtropicales en terrazas de cultivo en la costa de Granada (SE España). *Comunicata Scientiae*. 2(1). 42–48.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain M. S. & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 2262–2289.
- Sastre, C. M., González-Arechavala, Y., & Santos, A. M. (2015). Global warming and energy yield evaluation of Spanish wheat straw electricity generation - A LCA that takes into account parameter uncertainty and variability. *Applied Energy*. 154:900–911.
- Tang, L., Gao, H., Yoshihiro, H. Koki, H., Tetsuya, N., Liu, T. S., Tatsuhiko, S. & Xu, Z. J. (2017). Erect panicle super rice varieties enhance yield by harvest index advantages in high nitrogen and density conditions. *Journal of Integrative Agriculture* 16(7). 1467–1473.
- UNE-EN 14918 (2011). Biocombustibles sólidos: Determinación del poder calorífico.
- Unkovich, M., Baldock, J. & Forbes, M. (2010). Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: Examples from Australian agriculture. *Advances in Agronomy*.
- USDA-NRCS. (2006). Soil Quality National Technology Development Team. Crop Residue Removal For Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations. *Soil Quality - Agronomy Technical Note*. 19.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 89. 913–933.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T. & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1). 1–27.
- Whittaker, C., Li Borrion, A., Newnes, L. & McManus, M. (2014). The renewable energy directive and cereal residues. *Applied Energy*. 122:207–215.