

Emisiones provinciales de gases con efecto invernadero del sistema suelo-caña de azúcar de Tucumán

CHALCO VERA, J.¹; ACRECHE, M.M.²

RESUMEN

Las estimaciones de emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) de suelos agrícolas informadas en el último Reporte Bienal de Actualización de Argentina en 2017 presentan gran incertidumbre debido a que se basan en el uso de factores de emisión del IPCC y no en mediciones directas a campo, lo cual limita la capacidad de planificar un desarrollo sostenible de bajas emisiones de GEI. El objetivo de este trabajo fue calcular las emisiones medidas de GEI de la caña de azúcar para la provincia de Tucumán y compararlas con las emisiones determinadas siguiendo el protocolo del IPCC. El cálculo y análisis de las emisiones de GEI se realizó por extrapolación e interpolación de flujos medios medidos a campo durante los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015. Las emisiones totales de GEI ($\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$) de la caña de azúcar en Tucumán fueron 343,6 Gg CO_2 eq. para el ciclo agrícola 2013-2014 (normal a seco) y 404,9 Gg CO_2 eq. para el ciclo agrícola 2014-2015 (húmedo). En un ciclo de precipitaciones modales se demostró que: i) el IPCC sobrestimó las emisiones provinciales en un 18,4%; y ii) una disminución de la superficie quemada se traduciría en un mayor porcentaje de sobrestimación por parte del IPCC. La brecha más importante con el IPCC está dada por el manejo de rastrojo y las emisiones durante el ciclo agrícola del cultivo. La prevención de la quema del rastrojo de la caña de azúcar conduce efectivamente a disminuir las emisiones totales de GEI de Tucumán, lo que puede revertir el efecto adverso sobre el incremento de las emisiones totales de GEI de los eventos extremos de alta precipitación.

Palabras clave: bioetanol, cambio climático, metano, mitigación, óxido nitroso.

ABSTRACT

Estimations of greenhouse gases (GHG) emissions from agricultural soils reported in the latest Biennial Update Report of Argentina of 2017 present great uncertainty because they are based on IPCC emission factors and not on direct field measurements. This limits the ability for planning a sustainable development of low GHG emissions. The objective of this work was to quantify the GHG emissions of sugarcane measured for the province of Tucumán and compare them with the emissions determined following the IPCC protocol. The quantification and analysis of GHG emissions was carried out by extrapolation and interpolation of mean flows measured in the field during the 2013-2014 and 2014-2015. The total emissions of GHG ($\text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O}$) from sugarcane in Tucumán were 343.6 and 404.9 Gg CO_2 eq. for the 2013-2014 (normal to dry) and 2014-2015 (wet) growing seasons, respectively. It was shown that, in a growing season of modal rainfall: i) the IPCC overestimated provincial emissions by 18.4%; and ii) a decrease in the burned area increased the overestimation by the IPCC. The most important gap with the IPCC was given by straw management and the emissions during the growing season. The prevention of straw burning effectively leads to a reduction in total GHG emissions

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental (EEA) Famaillá-CONICET, Ruta Provincial 301, km 32, 4132 Famaillá, Tucumán, Argentina. Correo electrónico: chalcovera.jorge@inta.gob.ar

²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental (EEA)Salta-CONICET. Ruta Nacional 68, km 172, 4403 Salta, Argentina.

from the sugarcane-soil system of Tucumán, which can reverse the adverse effect on the increase of total GHG emissions from extreme events of high rainfall.

Keywords: bioethanol, climate change, methane, mitigation, nitrous oxide.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de caña de azúcar se promociona a nivel mundial como una alternativa para disminuir la utilización de combustibles fósiles, los cuales son recursos naturales finitos no renovables cuya utilización genera gran contaminación ambiental (IPCC, 2014). En este sentido, la obtención de bioetanol a partir de caña de azúcar resulta una alternativa viable para disminuir la contaminación ambiental y dependencia económica en el uso de combustible fósil. Sin embargo, la subsistencia de la quema de la caña en pie previa a la cosecha (en menor medida) o la quema del rastrojo de la caña posterior a la cosecha limitan la sostenibilidad social y ambiental del sistema debido a los efectos adversos de la quema como la pérdida de carbono (C) orgánico y la emisión de gases con efecto invernadero (GEI). Estos efectos adversos son poco apreciados en el sector, por lo que las oportunidades para que los productores adquieran capacidad para contribuir en los compromisos y negociaciones climáticas capitalizando los mercados de C son muy limitados (Rufino *et al.*, 2016). Específicamente, la falta de mediciones de flujos de GEI en este sector restringe la capacidad de planificar un desarrollo sostenible de bajo C y bajas emisiones de GEI, más aún si se espera que los sistemas se intensifiquen mejorando su tecnología de producción.

En este sentido, las decisiones sobre el uso de la tierra de los sistemas productivos de pequeña escala (como los de Tucumán, la principal provincia argentina productora de caña de azúcar) pueden representar un mayor impacto relativo en las emisiones de GEI (Rosenstock *et al.*, 2013). Sin embargo, las estimaciones de emisiones de GEI de este sistema informadas en el último Inventario Nacional de GEI presentan gran incertidumbre respecto de las emisiones reales debido a que i) se toma como línea de base un promedio poco representativo y fijo de cantidad de rastrojo seco y se considera el área quemada promedio de dos ciclos agrícolas (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015); y ii) las emisiones generadas durante el ciclo agrícola por el uso de la tierra y la práctica de la fertilización nitrogenada (común en los sistemas productivos) se obtienen considerando la metodología y factores de emisión propuestos por defecto por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

Con el fin de soslayar las incertidumbres de las estimaciones de emisiones de GEI para la caña de azúcar de Tucumán, se plantea como objetivo de este trabajo cuantificar las emisiones totales de GEI de la caña de azúcar para la

provincia de Tucumán, realizando interpolación y extrapolación de las emisiones de GEI medidas a campo durante dos ciclos agrícolas consecutivos. Asimismo, se realiza un análisis que considera escenarios de posibles condiciones climáticas anuales y superficie de rastrojo quemada, contrastándose con las emisiones estimadas siguiendo el protocolo del IPCC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cálculo de las emisiones provinciales de gases efecto invernadero

Las emisiones de GEI de la provincia de Tucumán debidas a la producción agrícola de caña de azúcar contemplan las emisiones por el quemado de rastrojo (IPCC, 2006) más las emisiones acumuladas anuales del sistema suelo-caña durante el ciclo agronómico del cultivo para las áreas con y sin quema de rastrojo. Las emisiones acumuladas durante el ciclo agrícola fueron obtenidas a través de integración e interpolación (Rosenstock *et al.*, 2016) de mediciones de flujos informados en publicaciones previas (Chalco Vera *et al.*, 2017; Chalco Vera y Acreche, 2018). Las emisiones de GEI fueron expresadas en giga-gramos de dióxido de carbono (CO₂) equivalente por año (Gg CO₂ eq. año⁻¹; 1 Gg= 1000 MG), multiplicando la cantidad de emisión de cada gas por su potencial de calentamiento global (21 y 310 para metano, CH₄ y óxido nitroso, N₂O, respectivamente). La cuantificación provincial de las emisiones de GEI se realizó para los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015 debido a que solo para estos ciclos existe un relevamiento oficial de la superficie cañera quemada (Carreras Baldrés *et al.*, 2016) y a que en estos fueron llevadas a cabo las mediciones de emisiones de GEI a campo.

La condición de precipitación de cada ciclo agrícola puede observarse en la figura 1. Un análisis exhaustivo de estas fueron descritas en Chalco Vera *et al.* (2017).

Emisiones provinciales de gases efecto invernadero debido al quemado de rastrojo de la caña de azúcar

Las emisiones debidas al quemado de rastrojo se calcularon según los factores de emisión del IPCC (Andreae y Merlet, 2001; IPCC, 2006). Los ciclos agrícolas con relevamiento del área cañera quemada en Tucumán fueron determinados por Carreras Baldrés *et al.* (2016) mediante el análisis de imágenes satelitales. El área total cultivada con caña de azúcar de los ciclos agrícolas mencionados se obtuvo de la Dirección de Estadística

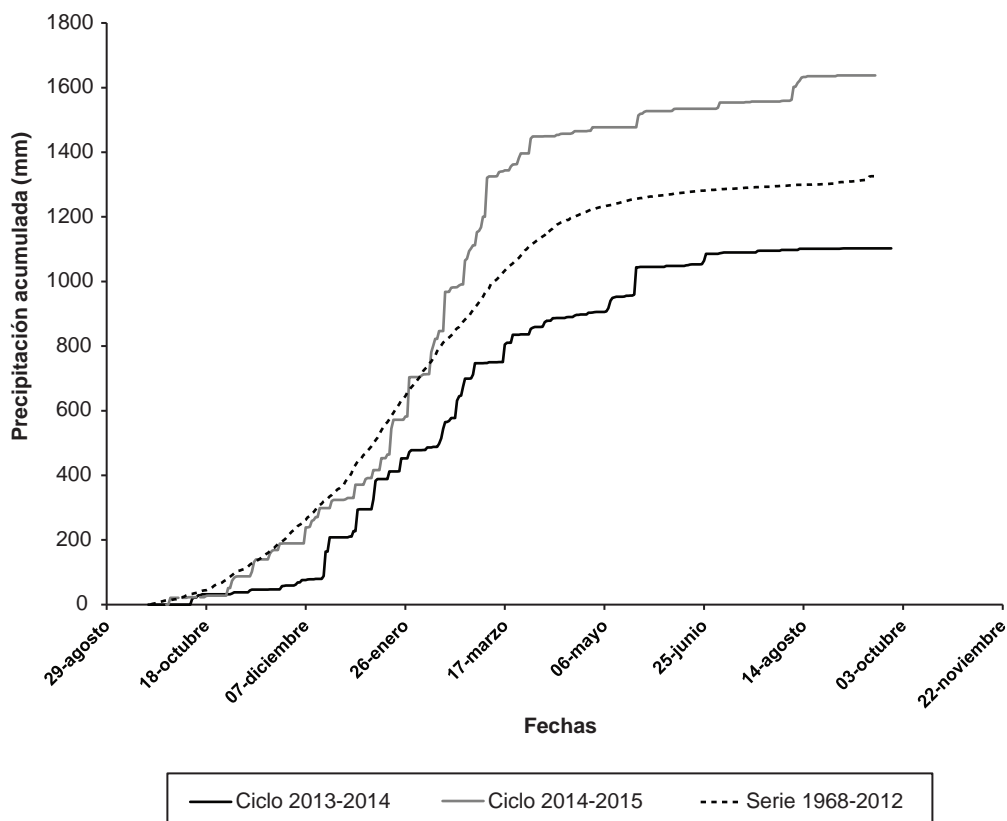


Figura 1. Dinámica de la precipitación acumulada de los agrícolas 2013-2014 (línea continua negra) y 2014-2015 (línea continua gris) en el área cañera de Tucumán. En línea discontinua se encuentra la dinámica de precipitaciones media de la serie histórica 1968-2012.

de Tucumán (Dirección de Estadística de la Provincia de Tucumán, 2017).

Dado que no existe información precisa sobre la cantidad de rastrojo total producido por la caña de azúcar en Tucumán, se estimó el rastrojo provincial a partir de los pro-

medios informados en la provincia para diferentes sitios y condiciones de producción (11 MG MS ha⁻¹; tabla 1). Este valor incluye el promedio medido para la condición experimental de este trabajo (12,2 MG ha⁻¹; n= 6).

Para calcular las emisiones por quema de biomasa se tuvo en cuenta las directrices del IPCC para este tipo de reportes: i) la eficiencia de combustión del rastrojo utilizada fue del 80%; ii) las emisiones de CO₂ debido al quemado de rastrojo no se contabilizaron como tales ya que se entiende que el CO₂ liberado durante el quemado vuelve a ser fijado a través del crecimiento del cultivo en el siguiente ciclo agrícola (IPCC, 2006); y iii) solo se consideraron la emisión de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) ya que son los gases que tienen efecto invernadero directo (Crutzen y Andreae, 1990).

Emisiones provinciales de gases efecto invernadero del sistema suelo-caña de azúcar durante el ciclo de crecimiento del cultivo

Las emisiones provinciales de GEI del sistema suelo-caña de azúcar debido al uso de suelo durante el ciclo de crecimiento del cultivo se determinaron utilizando las emisiones acumuladas anuales de CH₄ y N₂O de los tra-

Rastrojo de cosecha (MG MS ha ⁻¹)		
Referencias	Rango	Promedio
Sopena <i>et al.</i> 2006	5 - 8	6,5
Romero <i>et al.</i> 2007	7 - 16	11,5
Digonzelli <i>et al.</i> 2011	12 - 16	14,0
Sáez <i>et al.</i> 2012*	-	11,0
Datos propios	10,5 -14,9	12,23

Tabla 1. Información de cantidades de rastrojo (MG MS ha⁻¹) generados por la cosecha de caña de azúcar en Tucumán. Fuente: Digonzelli *et al.*, 2011; Romero *et al.*, 2007; Sopena *et al.*, 2006; Sáez, J.V., 2012 (com. pers.).

*Trabajo no publicado (comunicación personal).

tamientos de caña de azúcar fertilizados con quemado y sin quemado de rastrojo para representar las condiciones y prácticas más habituales de la producción en la provincia (cultivos con y sin quemado de rastrojo, y siempre fertilizados con urea sólida incorporada a 10 cm de profundidad en la banda de los surcos, con una dosis de 110 kg N ha⁻¹). Las emisiones se midieron mensualmente mediante cámaras estáticas de muestreo de GEI (Parkin y Venterea, 2010). Cada cámara consistió en una cabeza rectangular de PVC no reactivo con una superficie de 715 cm² y una altura de 15 cm, y un marco/base de hierro insertado a una profundidad de 8 cm. Las concentraciones de GEI se determinaron mediante cromatografía de gases (GC 7890 A con inyector automático 7697 A, Agilent Technologies, EE. UU.). El procedimiento de campo completo se puede encontrar en Chalco Vera y Acreche (2018).

Las emisiones acumuladas de CO₂ durante el ciclo del cultivo no se incluyeron debido a que el balance de este gas se considera neutro. Esto se debe a que si no se consideran cambios en balance de C del suelo, se asume que todas las emisiones generadas por el sistema suelo-planta se vuelven a fijar por fotosíntesis, generando nuevamente la materia orgánica del cultivo en el siguiente ciclo agrícola (IPCC, 2006). Este tipo de balances se abordan dentro de un balance de entradas y salidas de C hacia y desde el suelo (Chalco Vera y Acreche, 2018).

Debido a que los ciclos agrícolas del experimento presentaron diferentes condiciones de temperatura y precipitación, se utilizaron las emisiones acumuladas de cada ciclo agrícola experimentado. A su vez, las emisiones se calcularon para las superficies con caña de azúcar con y sin quema (según corresponda).

Escenarios de las emisiones provinciales de gases efecto invernadero

El análisis se realizó calculando las emisiones totales de GEI para la provincia de Tucumán expresadas en Gg CO₂ eq. año⁻¹, bajo simulación de 10 escenarios compuestos por proporciones de superficie provincial con rastrojo de caña de azúcar quemado (0, 25, 50, 75 y 100%) y dos condiciones ambientales basadas en el régimen de precipitación (ciclo agrícola normal a seco y húmedo, correspondientes a los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015, respectivamente).

Con el propósito de comparar ambos regímenes de precipitación, se considera que la superficie cultivada con caña de azúcar de cada ciclo agrícola fue el promedio de dichos ciclos agrícolas. Las emisiones totales provinciales de GEI incluyeron las emisiones de CH₄ y N₂O debidas al quemado de rastrojo más las emisiones acumuladas durante el ciclo de cultivo de CH₄ y N₂O, tanto de la superficie con quema como de la superficie sin quema de rastrojo.

RESULTADOS

Emisiones provinciales de gases efecto invernadero debido al quemado de rastrojo de la caña de azúcar

Las emisiones de GEI debido al quemado de rastrojo claramente variaron de acuerdo a la superficie con rastrojo quemado en cada ciclo agrícola. Se destaca que cuando el año fue más húmedo (2014-2015), a pesar de que el cultivo generó mayor biomasa, las emisiones de GEI debido a la quema del rastrojo fueron menores por existir menor cantidad de superficie quemada (tabla 2). Las emisiones en forma de CH₄ (Gg CO₂ eq.) representaron el 72,32% de las emisiones totales de GEI debido al quemado de rastrojo (tabla 2), por lo cual la influencia de dicha práctica en el calentamiento global es mayormente causada por la emisión de este gas.

Emisiones provinciales de gases efecto invernadero del sistema suelo-caña durante el ciclo de cultivo

Las emisiones de GEI (N₂O + CH₄, expresadas en CO₂ eq.) acumuladas durante el ciclo de cultivo del sistema suelo-caña de azúcar de Tucumán fueron 259,8 Gg CO₂ eq. para el ciclo agrícola 2013-2014 y 376,9 Gg CO₂ eq. para el ciclo 2014-2015 (figura 2). La contribución de cada GEI al total de las emisiones provinciales, según la superficie total con y sin quema de rastrojo indicó que en la superficie sin quemado de rastrojo no existieron variaciones proporcionales de emisiones de GEI. Estas fueron de 97,3 a 97,7% para N₂O y de 2,2 a 2,7% para CH₄ de un ciclo normal a seco (2013-2014) a uno húmedo (2014-2015), respectivamente (figura 2). Sin embargo, en la superficie con quemado de rastrojo, el 100% de las emisiones correspondieron al N₂O, ya que en esta área no hubo emisiones acumuladas de CH₄ en todos los ciclos agrícolas, contabilizándose solo absorciones (figura 2).

Ciclo agrícola	Superficie total con caña de azúcar (ha)	Superficie con quema de rastrojo (ha)	CH ₄ * (Gg CO ₂ eq.)	N ₂ O * (Gg CO ₂ eq.)	Total GEI (Gg CO ₂ eq.)
2013-2014	265250	121440	60,59	23,19	83,78
2014-2015	271370	40680	20,30	7,77	28,07

Tabla 2. Emisiones de gases efecto invernadero (Gg CO₂ eq.) por quema de rastrojo para los dos ciclos agrícolas analizados en Tucumán. Considera las emisiones del óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄).

*Factores de emisión: 2,7 y 0,07 g de CH₄ y N₂O, respectivamente, por kg de MS quemada (Andreae y Merlet, 2001).

En general, el aporte a las emisiones de GEI provinciales del sistema suelo-planta de la superficie con rastrojo no quemado se incrementó a medida que el año presentó mayores precipitaciones, mientras que el aporte de la superficie con rastrojo quemado a las emisiones de GEI provinciales tendió a disminuir con mayor precipitación del ciclo del cultivo (figura 2).

Emisiones totales de gases efecto invernadero por la actividad agrícola de la caña de azúcar para la provincia de Tucumán

Las emisiones totales de GEI (N₂O y CH₄) generadas por el cultivo de la caña de azúcar en Tucumán, que incluyeron las emisiones por el quemado de rastrojo (tabla 2) más las emisiones acumuladas anuales de las superficies con y sin quema de rastrojo en cada ciclo agrícola (figura 2), fueron igual a 343,61 Gg CO₂ eq. para el ciclo agrícola 2013-2014 y 404,96 Gg CO₂ eq. para el ciclo 2014-2015. Se debe destacar que, en el caso de la superficie con quema del rastrojo, las capturas de CH₄ se restaron de las emisiones de N₂O.

Las emisiones totales de GEI en el cultivo de caña de azúcar en Tucumán no presentaron ninguna relación directa con la cantidad de superficie cultivada total, ni con la cantidad de superficie con rastrojo quemado o no quemado.

Análisis de los escenarios de emisión de gases efecto invernadero debida a la actividad agrícola de la caña de azúcar en Tucumán

El análisis de los escenarios de emisión reveló que las emisiones totales de GEI provenientes del cultivo de la caña de azúcar en Tucumán son mayores en ciclos agrícolas muy húmedos, independientemente de la cantidad de superficie con rastrojo quemado. Se destaca que si bien las condiciones climáticas del ciclo agrícola son determinantes, las emisiones totales de GEI se maximizan cuando aumenta el porcentaje de área quemada (tabla 3). En el ciclo húmedo, las emisiones totales de GEI aumentaron 30,5; 41,7; 50,0; 56,4 y 61,5% en relación con las emisiones totales de GEI del ciclo normal a seco con 0, 25, 50, 75 y 100% de la superficie quemada, respectivamente. En el ciclo agrícola normal a seco las emisiones de GEI aumentaron 17,5; 34,9; 52,5 y 69,7% con el aumento de la superficie quemada de 0 a 25, 50, 75 y 100%, respectivamente. En el ciclo húmedo las emisiones de GEI aumentaron 27,6; 55,2; 82,7 y 110,3% con el aumento de la superficie quemada de 0 a 25, 50, 75 y 100%, respectivamente. Estos incrementos significaron que, por cada hectárea quemada, la emisión total de GEI aumentó 687 kg CO₂ eq. para el ciclo normal a seco (2013-2014) y 1413 kg CO₂ eq. para el ciclo húmedo (2014-2015).

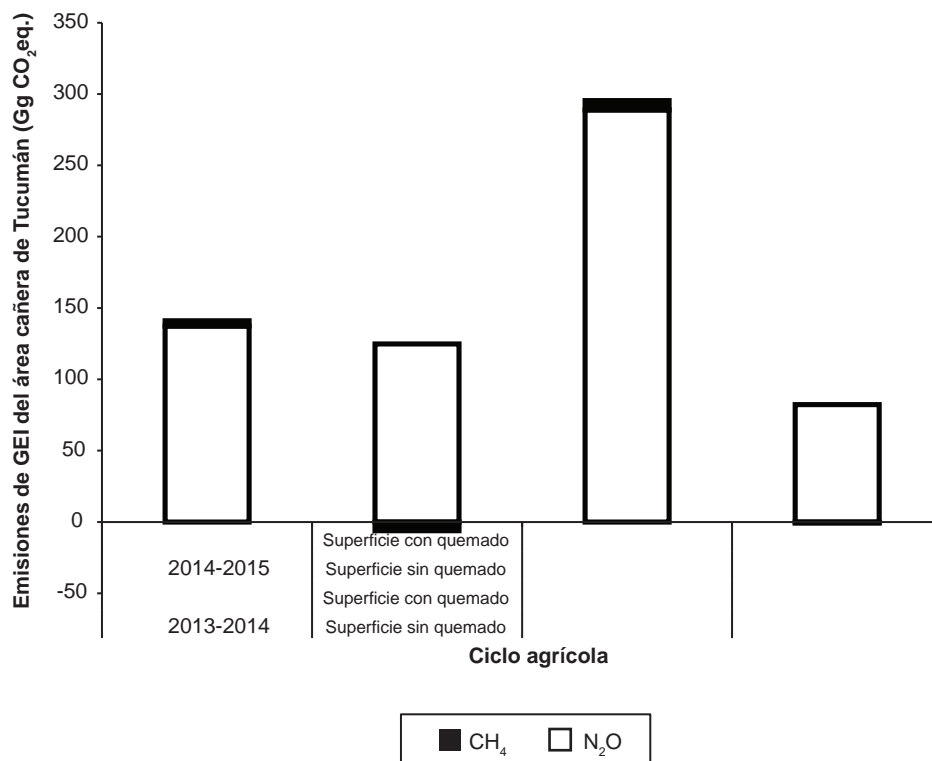


Figura 2. Emisiones de gases efecto invernadero (óxido nitroso: N₂O y metano: CH₄) del sistema suelo-caña de azúcar durante los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015 calculados a nivel de la provincia de Tucumán (Gg CO₂ eq.) considerando las superficie con y sin quema de rastrojo.

Superficie total con caña de azúcar (ha)	Superficie quemada (%)	Emisiones totales de GEI por ciclo (Gg CO ₂ eq.)		
		2013-2014 (normal a seco)	2014-2015 (húmedo)	Metodología IPCC
268310	0	263,24	343,58	331,99
	25	309,30	438,33	361,62
	50	355,35	533,08	391,25
	75	401,40	627,83	420,87
	100	447,45	722,58	456,93

Tabla 3. Emisiones de gases efecto invernadero (GEI) totales debido al cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán (Gg CO₂ eq.) para distintos escenarios que consideran proporciones variables de la superficie con rastrojo quemado y las condiciones de precipitación del ciclo agrícola.

A diferencia de lo observado en el análisis de las emisiones reales totales de GEI de la caña de azúcar en Tucumán (tabla 2 y figura 2), el análisis de escenarios reveló que la quema del rastrojo es el principal factor asociado al incremento de las emisiones totales de GEI cuando ocurre un ciclo agrícola donde las condiciones ambientales (principalmente las precipitaciones) son normales a secas, y que si el ciclo agrícola es húmedo, tanto la quema del rastrojo como la precipitación son factores asociados al incremento de las emisiones totales de GEI (tabla 3).

Según este análisis, si se evita el quemado de rastrojo a nivel provincial en un ciclo normal a seco (2013-2014, tomado como modal), la mitigación de emisiones de GEI (N₂O y CH₄) sería de 46,1; 92,1; 138,2 y 184,2 Gg CO₂ eq. con relación a cuando se quema 25, 50, 75 y 100% del área cañera, respectivamente.

Brechas con el IPCC

Según la metodología y los factores de emisión propuestos por el IPCC (IPCC, 2006), se determinó que las emisiones totales provinciales de GEI fueron de 406,7 y 357,3 Gg CO₂ eq. para los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015, respectivamente. Estas incluyeron las emisiones estimadas de N₂O por el residuo de cosecha, la fertilización nitrogenada, la mineralización del N de la materia orgánica del suelo y las emisiones de N₂O y CH₄ por la quema de rastrojo (IPCC, 2006). Si se comparan estos valores con los calculados a partir de mediciones de este trabajo (343,61 y 404,96 Gg CO₂ eq. para los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015), se demuestra que en años normales a secos el IPCC sobrestima las emisiones provinciales en un 18,4%; mientras que en el ciclo húmedo las emisiones son subestimadas por el IPCC en un 11,8%. El análisis de escenarios mostró que la sobrestimación de las emisiones de GEI del IPCC, en un ciclo normal a seco, aumentó con la disminución de la superficie quemada (tabla 3); mientras que, en un año

húmedo, la subestimación se incrementó con el aumento de la superficie quemada (tabla 3). Debido a que la diferencia de las emisiones totales entre las calculadas según el IPCC y las de este trabajo no está dada por las emisiones del quemado de rastrojo (ya que son las mismas), en el ciclo agrícola normal a seco la menor diferencia se observó en el escenario con 100% del área quemada; mientras que en el ciclo húmedo la menor diferencia se observó en el escenario con 0% del área con rastrojo quemado (completamente sin quema). Esto se debe a que, el incremento de emisiones de GEI durante el ciclo del cultivo por un aumento de humedad del ciclo es mayor cuando el área esta quemada.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Nuestros resultados demuestran que en el ciclo húmedo hubo menor superficie quemada; sin embargo, no existe evidencia suficiente para establecer alguna asociación. De hecho, en los ciclos húmedos la mayor generación de rastrojo a cosecha causa una reducción de la temperatura del suelo que retrasa la siguiente brotación, aumenta los costos de manejo del cañaveral (Fernández de Ullivarri *et al.*, 2011) e incluso aumenta la probabilidad de daños a la caña en brotación por quemas accidentales o intencionadas posteriores a esta (Malizia *et al.*, 2014), promoviendo la quema temprana e ilegal del rastrojo.

El principal factor detrás de las emisiones totales de GEI fueron las precipitaciones durante el ciclo agrícola. Sin embargo, la gran contribución de emisiones del área con rastrojo quemado demostró la relevancia del manejo del rastrojo en las emisiones totales anuales de GEI de este sistema. Esto indica que una de las opciones de minimizar/mitigar las emisiones totales de GEI es evitar el quemado de rastrojo. De hecho, el análisis de escenarios reveló que la quema del rastrojo es el principal factor de manejo asociado con incrementos de las emisiones totales de GEI

cuando ocurre un ciclo agrícola donde las condiciones ambientales (principalmente las precipitaciones) son normales a secas; mientras que, en ciclos agrícolas húmedos tanto la quema del rastrojo como la precipitación son factores asociados al incremento de las emisiones totales de GEI.

Debido a que los eventos climáticos extremos son cada vez más frecuentes, es posible encontrar a futuro escenarios de elevada precipitación anual (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015), lo que generaría importantes emisiones totales de GEI debido al cultivo de la caña de azúcar en Tucumán. Ante esto resulta clave la prevención de la quema del rastrojo, como medida efectiva para disminuir las emisiones totales de GEI de Tucumán. De hecho, si se tiene en cuenta el balance potencial de C en el suelo cuando se evita el quemado de rastrojo (Chalco Vera y Acreche, 2018), es altamente probable que la mitigación de emisiones de GEI sea más importante.

Las diferencias en las emisiones provinciales de GEI entre los valores calculados basados en mediciones a campo y los valores calculados siguiendo la metodología del IPCC son exclusivamente relativas a las emisiones durante el ciclo del cultivo, ya que las emisiones por quemado de rastrojo (para ambos casos) fueron calculadas de la misma manera y utilizando los mismos datos. En este sentido, nuestros resultados demostraron que para determinar las emisiones de la caña de azúcar, las directrices del IPCC son muy limitadas ya que no reflejan la influencia de las prácticas de manejo ni del ciclo agrícola en los flujos de GEI. De hecho, se ha demostrado en inventarios nacionales de GEI previos al 2015, que los factores de emisión del IPCC sobrestimaron en un 52% las emisiones de N_2O debido a la aplicación de fertilizante nitrogenado en la caña de azúcar en años modales (Chalco Vera *et al.*, 2017). Sin embargo, es importante notar que las emisiones totales de GEI de la caña de azúcar en Tucumán calculadas en este trabajo tienen componentes de incertidumbre difíciles de pronosticar. En primer lugar, se asume una disponibilidad de rastrojo igual en toda el área cultivada con caña de azúcar y constante en el tiempo (en cada ciclo agrícola). Este balance puede enmascarar mayores o menores emisiones considerando no solo la variabilidad de los ciclos agrícolas y las prácticas de manejo agrícola, sino también el efecto de los sitios (suelos), variedades cultivadas, plagas o enfermedades o edad del cañaveral. La cantidad de rastrojo actúa afectando tanto las emisiones de GEI por el quemado de rastrojo como también las emisiones de GEI acumuladas durante el ciclo de cultivo. Aunque la presencia de rastrojo puede propiciar condiciones de humedad para la desnitrificación y el aumento de emisiones de N_2O (Denmead *et al.*, 2010; Eustice *et al.*, 2011; Fracetto *et al.*, 2017), se ha demostrado que factores como la reducción de la temperatura del suelo y el nitrógeno asimilado poco disponible pueden limitar estas emisiones (Chalco Vera *et al.*, 2017; Gentile *et al.*, 2008; Pitombo *et al.*, 2017) respecto a las áreas con quemado de rastrojo. Sin embargo, los resultados de este trabajo demostraron que la variación porcentual de las emisiones totales de GEI debida a la proporción del área quemada es menor que la variación

debida a la condición de humedad del ciclo agrícola, y que parte de las emisiones de GEI debido al quemado del rastrojo son contrarrestadas por las mayores emisiones de las áreas sin quema durante el ciclo del cultivo, por lo cual pueden considerarse una aproximación muy útil como patrones o modelos precedentes para futuros escenarios de producción. Por un lado, este primer componente de incertidumbre también se relaciona con la eficiencia de combustión asumida (80%), ya que esta puede variar por el sitio de producción y por la misma condición hídrica del ciclo agrícola, ya sea aumentando la disponibilidad de rastrojo como modificando su condición de humedad.

Por otro lado, el segundo componente de incertidumbre para tener en cuenta es el efecto acumulado (con los años) de la práctica del quemado de rastrojo (o la retención de este) en las emisiones totales de GEI durante el ciclo del cultivo. Es esperable que a largo plazo la condición del suelo cambie con la sucesiva quema o retención del rastrojo. Aunque este componente agudiza las incertidumbres hacia el futuro (considerando sobre todo el contexto de un ambiente cambiante), los pronósticos de emisiones potenciales pueden inferirse con base en un porcentaje fijo de área quemada. No obstante, estos componentes de incertidumbres exigen desde ya el planteamiento de nuevas propuestas de investigación que consideren mediciones *in situ* de emisiones de GEI.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por presupuestos del INTA (PNIND 2013-2019 N° 1108064) y el ex Ministerio de Ciencia y Tecnología de Argentina (PICT 2008, N° 307).

BIBLIOGRAFÍA

- ACRECHE, M.M. 2017. Nitrogen-, water- and radiation-use efficiencies affected by sugarcane breeding in Argentina. *Plant Breeding* (136), 174-181.
- ANDREAE, M.O.; MERLET, P. 2001. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* (15), 955-966.
- CARRERAS BALDRÉS, J.I.; FANDOS, C.; SORIA, F.; SCANDALIARIS, P. 2016. Relevamiento del área cañera quemada en la provincia de Tucumán, mediante el uso de teledetección y SIG, zafras 2013, 2014 y 2015. *xx Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar Tucumán, Argentina*. 1-5 pp.
- CHALCO VERA J.; VALEIRO, A.; POSSE, G.; ACRECHE, M.M. 2017. To burn or not to burn: The question of straw burning and nitrogen fertilization effect on nitrous oxide emissions in sugarcane. *Science of The Total Environment* (587-588), 399-406.
- CHALCO VERA, J.; ACRECHE, M.M. 2018. Towards a baseline for reducing the carbon budget in sugarcane: three years of carbon dioxide and methane emissions quantification. *Agriculture, Ecosystems & Environment* (267), 156-164.
- CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M. 1990. Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles Estimates of Worldwide Biomass Burning. *Science* (250), 1669-1678.

- DENMEAD, O.T.; MACDONALD, B.C.T.; BRYANT, G.; NAYLOR, T.; WILSON, S.; GRIFFITH, D.W.T.; WANG, W.J.; SALTER, B.; WHITE, I.; MOODY, P.W. 2010. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. *Agricultural and Forest Meteorology* (150), 748-756.
- DIGONZELLI, P.A.; ROMERO, E.R.; ALONSO, L.; FERNÁNDEZ DE ULLIVARRI, J.; ROJAS QUINTEROS, H.; SCANDALIARIS, J.; FAJRE, S. 2011. Assessing a sustainable sugarcane production system in Tucumán, Argentina: Part 1: Dynamics of sugarcane harvest residue (trash) decomposition. *Rev. ind. agric. Tucumán* (88), 1-12.
- DIRECCIÓN DE ESTADÍSTICA DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN. 2017. Dirección de Estadística de Tucumán. (Disponible: <http://www.estadistica.tucuman.gov.ar/> verificado: 18 de noviembre de 2018).
- EUSTICE, T.; VAN DER LAAN, M.; VAN ANTWERPEN, R. 2011. Comparison of Greenhouse Gas Emissions From Trashed and Burnt Sugarcane Cropping Systems in South Africa. *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.* (84), 326-339.
- FERNANDEZ DE ULIVARRI, E.; VALLEJO, J.I.; VALEIRO A. 2011. Briquetas de carbón elaboradas con residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales* (1), 71-72.
- FRACETTO, F.J.C.; FRACETTO, G.G.M.; BERTINI, S.C.B.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J.; SIQUEIRA NETO, M. 2017. Effect of agricultural management on N₂O emissions in the Brazilian sugarcane yield. *Soil Biology and Biochemistry* (109), 205-213.
- GENTILE, R.; VANLAUWE, B.; CHIVENGE, P.; SIX, J. 2008. Interactive effects from combining fertilizer and organic residue inputs on nitrogen transformations. *Soil Biology and Biochemistry* (40), 2375-2384.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. En: EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 2: Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japón. 1-59 pp.
- IPCC. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). En: EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHAANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX, J.C. (Eds.). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA. 812-922 pp.
- MALIZIA, S.; GARCIA MORITÁN, M.; BROWN, A.D. 2014. La Ruta del Azúcar.
- PARKIN, T.B.; VENTEREA, R.T. 2010. Chapter 3. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. USDA-ARS GRACenet Proj. Protoc. 2010, 1-39.
- PITOMBO, L.M.; CANTARELLA, H.; PACKER, A.P.C.; RAMOS, N.P.; DO CARMO, J.B. 2017. Straw preservation reduced total N₂O emissions from a sugarcane field. *Soil Use and Management* (33), 583-594.
- ROMERO, E.R.; SCANDALIARIS, J.; DIGONZELLI, P.; ALONSO, L.; LEGGIO-NEME, F.; GIARDINA, J.; CASEN, S.; TONATTO, J.; FERNÁNDEZ DE ULLIVARRI, J. 2007. Sugarcane potential trash estimation: variety and cane yield effect. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol* (26), 421-425.
- ROSENSTOCK, T.S.; RUFINO, M.C.; CHIRINDA, N.; VAN BUSSEL, L.; REIDSMA, P.; BUTTERBACH-BAHL, K. 2016. Scaling Point and Plot Measurements of Greenhouse Gas Fluxes, Balances, and Intensities to Whole Farms and Landscapes. En: ROSENSTOCK, T.S.; RUFINO, M.C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; WOLLENBERG, L.; RICHARDS, M. (Eds.). *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*, Springer International Publishing: Cham. 175-188 pp.
- ROSENSTOCK, T.S.; RUFINO, M.C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; WOLLENBERG, E. 2013. Toward a protocol for quantifying the greenhouse gas balance and identifying mitigation options in smallholder farming systems. *Environmental Research Letters* (8), 1-5.
- RUFINO, M.C.; ATZBERGER, C.; BALDI, G.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ROSENSTOCK, T.S.; STERN, D. 2016. Targeting Landscapes to Identify Mitigation Options in Smallholder Agriculture. En: ROSENSTOCK, T.S.; RUFINO, M.C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; WOLLENBERG, E.; RICHARDS, M. (Eds.). *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*. 15-36 pp.
- SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA NACIÓN. 2015. Tercera comunicación nacional de la republica argentina a la convencion marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. (Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/sustentabilidad/cambioclimatico/comunicacionnacional/tercera> verificado: 15 de junio de 2018).
- SOPENA, R.A.; MARIOTTI, J.A.; TERÁN, C.H. 2006. Variation and evolution of potential vegetative trash during the harvest season in the main sugarcane varieties at Tucumán, Argentina. 8th ISSCT Agricultural Engineering Workshop Tucumán, Argentina.