

## CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO Y ÓXIDO NITROSO EN EL CULTIVO DE ARROZ

Guillermina Cantou<sup>1/</sup>, Alvaro Roel<sup>1/</sup>, Pilar Irisarri<sup>2/</sup>, Silvana Tarlera<sup>3/</sup>, Ana Fernández<sup>3/</sup>

El cultivo de arroz bajo riego es considerado una de las principales fuentes mundiales de emisión de metano (CH<sub>4</sub>) derivadas de la actividad humana y una importante fuente de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); ambos gases contribuyentes al efecto invernadero y responsables de un 25% del aumento del calentamiento global (Jacobson, 2005; Mosier, 1998, citados por Pereyra, 2009). Los gases de efecto invernadero (GEI) tienen diferente capacidad de calentamiento, basado en su impacto radiactivo y su duración en la atmósfera y el gas de referencia tomado como unidad es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O tiene un potencial de calentamiento 25 y 298 veces mayor que el CO<sub>2</sub> respectivamente, para una escala de tiempo de 100 años (IPCC, 2007).

En Uruguay se estima que el 90% del total de CH<sub>4</sub> emitido proviene del sector agropecuario, del cual el 84% proviene de la fermentación ruminal del ganado, un 2% al manejo del estiércol y un 4% corresponde al generado por cultivos como el arroz (DINAMA, 2006).

El CH<sub>4</sub> se produce en ambientes anóxicos (carentes de oxígeno), como humedales y arrozales, por organismos metanogénicos (archaea) durante la degradación anaeróbica de la materia orgánica (Itoh et al., 2011). Su emisión es el resultado de una serie de procesos complejos, que involucra la interacción plantas-microorganismos y su liberación hacia la atmósfera está determinada por las tasas de metanogénesis y de oxidación de metano (Mishra et al., 1997). Por otro lado, la agricultura es la principal fuente de la mayoría de las emisiones de N<sub>2</sub>O. Este es producido a partir de procesos que se dan en el suelo, como producto intermedio de la nitrificación y desnitrificación microbiana (Vibol and Towprayoom, 2010).

Existe poca información nacional acerca de los niveles de emisión de GEI en el cultivo de arroz. Las primeras determinaciones fueron realizadas en el marco del Proyecto "Emisiones de metano y óxido nitroso en la rotación arroz-pastura en el este uruguayo", financiado por el Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria de INIA (FPTA N° 238, 2007-2010) y ejecutado por Facultad de Química, como una primera aproximación al impacto de algunas prácticas de manejo del cultivo (fertilización nitrogenada y coberturas invernales), sobre la emisión de estos gases en la rotación arroz-pasturas. En este trabajo se estimó una emisión total del cultivo de arroz de entre 65 y 240 kg de CH<sub>4</sub>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y se constató que el manejo del agua determinó, en gran medida, la dinámica de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.

Por otro lado, la fertilización nitrogenada y la presencia de la cobertura invernal (raigrás) influyó positivamente en la emisión de dichos gases (Pereyra, 2009).

A nivel internacional, varios autores afirman que el manejo del agua es una de las principales actividades agrícolas que afecta directamente las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en el cultivo de arroz. Estos sugieren modificar las técnicas de gestión del agua como una opción viable para mitigar las emisiones de CH<sub>4</sub>, previniendo el desarrollo de condiciones de reducción en el cultivo. Se ha demostrado que las emisiones de CH<sub>4</sub> son mayores en cultivos con inundación continua respecto a un cultivo manejado con riego intermitente, promoviendo a este último sistema como una estrategia potencialmente eficaz para mitigar las emisiones (Sass et al., 1992; Chen et al., 1993; Cai et al., 1994 citados por Itoh et al., 2011; Yagi et al., 1996; Minamikaway Sakai, 2006; Shiratori et al., 2007, Towprayoon et al., 2005). Por el contrario, las emisiones de N<sub>2</sub>O son despreciables en cultivos de arroz bajo inundación continua (Denmead et al., 1979; Freney et al., 1981; Smith et al., 1982; Zou et al., 2005 citados por Liu et al., 2009).

La cuantificación de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O bajo condiciones estándares es fundamental a la hora de computar la Huella de Carbono (H de C) del sector arrocero. Esta consiste en calcular y adicionar las emisiones de GEI a lo largo de toda la cadena arrocera (transporte de insumos - producción de insumos - fase primaria - fase industrial-transporte a destino, etc). Estos valores son reportados generalmente en términos de CO<sub>2</sub> equivalente/kg arroz elaborado.

La bibliografía internacional indica que dentro de los componentes de mayor peso en la H de C del arroz está el CH<sub>4</sub> producido en la fase productiva (Yoshikawa 2010). Por lo tanto es muy importante poder generar datos de emisiones locales a los efectos de los cálculos de la H de C.

El arroz producido en Uruguay es mayoritariamente exportado lo que determina la necesidad de poder contar con este tipo de cálculos. Estos valores podrían comenzar a ser requisitos en los mercados extranjeros. A su vez dependiendo de los valores alcanzados, podrían ser atributos de diferenciación. En este sentido, en junio de 2010 se procedió a implementar el grupo de trabajo de la H de C Arroz en el MGAP, que tiene por objetivo generar la primer versión de la H de C del sector.

El presente experimento tiene dos objetivos principales: 1) cuantificar las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para la variedad El Paso 144, bajo prácticas de manejo estándares para el cultivo de arroz en Uruguay y 2) evaluar la interacción entre dichas emisiones y el manejo del agua, comparando dos sistemas de riego contrastantes. Para este último, la hipótesis de trabajo es que el cultivo de arroz bajo un sistema de riego con

1/ INIA Treinta y Tres.

2/ Departamento de Biología Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDELAR).

3/ Cátedra de Microbiología, Departamento de Biociencias, Facultad de Química, UDELAR.

déficit controlado implementado en la fase vegetativa, permitiría disminuir las emisiones de CH<sub>4</sub> aunque aumentaría las de N<sub>2</sub>O respecto a un sistema de inundación continua, por lo que sería una herramienta eficaz para mitigar las emisiones de GEI (expresada en CO<sub>2</sub> equivalente).

sobre un Brunosol Subéutrico Lúvico, con las siguientes características: pH (H<sub>2</sub>O) = 6, MO = 2.2 %, P Bray I = 5 ppm, P Ac. Cítrico = 4 ppm, K int. = 0,12 meq/100g, N = 0.11%, PMN = 78 mg/kg N-NH<sub>4</sub>, Textura = franca (25% arena, 48% limo y 27% arcilla).

**MATERIALES Y MÉTODOS**

En la zafra agrícola 2010/2011, se instaló un ensayo en la Unidad Experimental Paso de la Laguna (UEPL/INIA),

Se evaluaron dos sistemas de riego: inundación continua (IC<sub>30</sub>) vs. riego con déficit controlado (RR). Se utilizaron parcelas de 66 m<sup>2</sup>. El manejo del cultivo se detalla en el cuadro 1.

Cuadro 1. Manejo del cultivo.

Actividad	Fecha	Detalle
Siembra y fertilización basal	08/10/10	Variedad El Paso 144 - 154 kg/ha de semilla. Fertilización: 182 kg/ha de 9-36-10 (N <sub>16</sub> P <sub>66</sub> K <sub>18</sub> )
Emergencia	10/11/10	
Aplicación de herbicida	19/11/10	Facet 1.5 l/ha + Propanil 3 l/ha + Command 0.85 l/ha + Cypex 200 g/ha
Fertilización	13/12/10	Macollaje: 60 kg/ha de urea*
	Variable según tratamiento	Primordio: 50 kg/ha de urea** : 03/01/11 para IC <sub>30</sub> y 13/01/11 para RR
Inundación permanente	13/12/10	Tratamiento IC <sub>30</sub>
	13/01/11	Tratamiento RR

IC<sub>30</sub>: tratamiento de inundación continua; RR: riego con déficit controlado.  
\*previo a la inundación de IC<sub>30</sub> y previo al primer riego de RR (en seco).  
\*\*previo a la inundación (en seco) para el tratamiento de riego con déficit controlado.

Para el tratamiento IC<sub>30</sub>, la inundación permanente se estableció a los 33 días después de la emergencia (DDE). En el caso de RR, el tratamiento se inició en ese mismo momento y se llevó a cabo hasta el inicio de la fase reproductiva (diferenciación del primordio floral), momento a partir del cual se estableció la inundación continua (Figura 1). El criterio de suministro de agua durante la fase vegetativa para este último tratamiento

fue el siguiente: se inicia en condiciones de suelo saturado y cuando se consume (evapotranspira) el 50% del agua disponible en el suelo (25 mm para un perfil de 30 cm de este suelo), se suministra agua de manera que este quede nuevamente saturado. Por lo tanto, durante este período (33 a 63 DDE) se alternan períodos de suelo húmedo y seco.

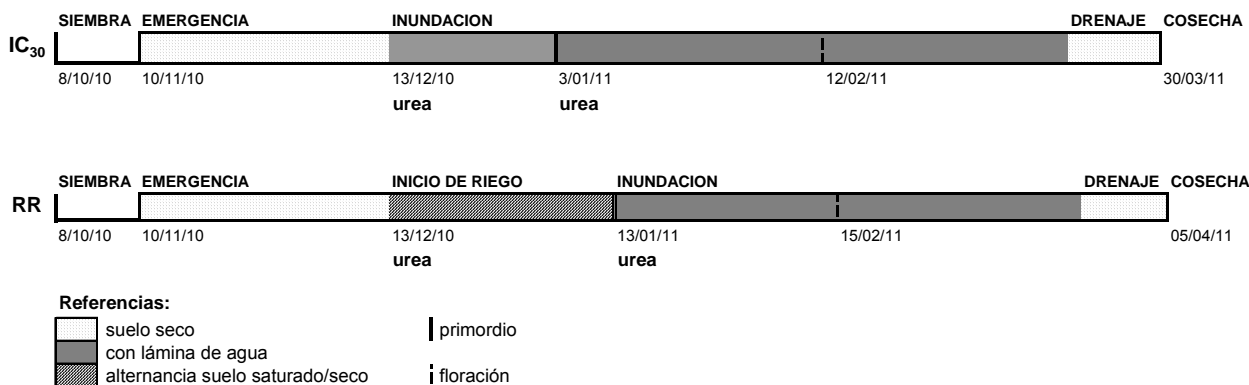


Figura 1. Representación del ciclo del cultivo para los tratamientos de inundación continua (IC<sub>30</sub>) y riego con déficit controlado (RR).

Una vez establecida la inundación permanente, el criterio de riego utilizado fue el mismo para ambos tratamientos y consistió en mantener una lámina de agua continua de 10 cm de profundidad. Se dejó de suministrar agua a los 15 días después del haber alcanzado el 50% de floración.

de acrílico transparentes (de 60 cm de altura), diseñados en el marco del FPTA N° 238, que permiten incluir la planta de arroz hasta su máximo desarrollo, considerando que el transporte de CH<sub>4</sub> hacia la atmósfera se da mayoritariamente a través de la planta, a pesar de producirse en el suelo (Nouchi y col., 1990; Irisarri et al., 2010). Al momento de tomar las muestras de aire, dichas cámaras eran colocadas sobre una base de acero inoxidable de 20 cm de alto, la cual permaneció enterrada en el suelo durante todo el

transcurso del experimento. La unión de ambas partes se aseguró mediante un cierre de agua para evitar el escape de los gases. Las cámaras contaron además con un ventilador a batería para asegurar la homogeneidad de la atmósfera interior y un "tubo de ventilación" que atraviesa su sección superior, sumergido en su extremo externo en un vial con agua, con el fin de mantener el equilibrio entre las presiones

externa e interna de la cámara. Algunas cámaras contaban también con un termómetro interno para la detección y el seguimiento de la temperatura dentro de la misma.

Para las mediciones se tomaron los siguientes criterios (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Criterios para la toma de muestras de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.**

	<b>Momento de muestreo</b>	<b>Intervalos de medición por muestreo*</b>
N <sub>2</sub> O	- Desde siembra hasta una semana después de establecida la inundación permanente (una vez por semana y/o luego de un evento de lluvia). - 15 días posteriores al drenaje de la parcela.	3 medidas a intervalos de 15 minutos (tiempos 0-15'-30').
CH <sub>4</sub>	A partir de la inundación hasta una semana después de realizado el drenaje de la parcela (una vez por semana).	3 medidas a intervalos de 30 minutos (tiempos 0-30'-60').

\*En el momento del muestreo se tomaron 3 muestras de aire en tubos al vacío en dichos intervalos. A su vez, cada muestra contaba con su duplicado, el cual se utilizaba como control de calidad.

Los flujos de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en los arrozales presentan patrones diurnos distintivos: las tasas de emisión suelen aumentar rápidamente después del amanecer, se da un pico de emisión temprano en la tarde y luego cae rápidamente, estabilizándose por la noche (Schutz et al., 1989; Yagi y Minami, 1993, citados por Neue, 1997). En este experimento todos los muestreos se iniciaron aproximadamente a las 12 pm, por lo que, considerando que la temperatura máxima diaria de la atmósfera ocurre luego del mediodía y teniendo en cuenta la correlación positiva entre la temperatura atmosférica y las emisiones de GEI (Yamane y Sato, 1967; Yang y Chang, 1998; Devezre y Horwath, 2000, citados por Minamikawa et al., 2006), resulta importante aclarar que los valores determinados en dichos muestreos para ambos gases corresponderían a las emisiones máximas diarias.

Los cromatogramas de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> obtenidos fueron analizados mediante el Software GC Solution y el Software PeakSimple, respectivamente. La tasa de emisión de ambos gases se calculó según Watanabe et al. (2000):

$$F = \rho \cdot h \cdot (dC/dt)$$

donde *F* corresponde a la tasa de emisión de N-N<sub>2</sub>O o C-CH<sub>4</sub> en g.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>;  $\rho$  es la densidad de N-N<sub>2</sub>O o C-CH<sub>4</sub> corregida por la temperatura existente en el interior de la cámara de muestreo; *h* es la altura de la cámara desde el suelo o el nivel de agua y *dC/dt* es el incremento de la concentración de N<sub>2</sub>O o CH<sub>4</sub> dentro de la campana con el tiempo. La tasa de emisión obtenida para las réplicas de cada tratamiento fue promediada para determinar el valor final de emisión por tratamiento.

El análisis de las concentraciones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en las muestras de aire se realizó mediante cromatografía gaseosa en los Laboratorios de Microbiología de las Facultades de Química y Agronomía. Para la determinación de la concentración de N<sub>2</sub>O se utilizó un cromatógrafo de gases Shimadzu ECD-2014 (temperaturas de columna, inyector y detector: 40°C, 90°C y 250°C respectivamente, volumen de inyección: 2 ml, gas carrier: N<sub>2</sub>), equipado con un lector de captura electrónica <sup>63</sup>Ni. El análisis de la concentración de CH<sub>4</sub> se realizó mediante un cromatógrafo de gases Chrompack CP-9001 2014 (temperaturas de columna, inyector y detector: 55°C, 105°C y 140°C respectivamente, volumen de inyección: 0.5 ml, gas carrier: N<sub>2</sub>), equipado con un detector de ionización de llama. Sólo una de las muestras duplicadas de CH<sub>4</sub> fue analizada y su duplicado se utilizó ocasionalmente como control de calidad, en cambio para el N<sub>2</sub>O, se analizaron ambos duplicados.

El diseño experimental utilizado fue el de parcelas divididas en bloques al azar, con seis repeticiones (tres bloques y dos campanas por parcela).

## RESULTADOS

En ambos manejos del agua se observó que la tasa de emisión de CH<sub>4</sub> tuvo un incremento progresivo a partir del día en que se inundó el cultivo hasta llegar a un valor máximo y luego descendió con el tiempo (Figura 2), aunque en el tratamiento IC<sub>30</sub> posteriormente a ese máximo se registró un segundo pico de emisión. El nivel máximo alcanzado en IC<sub>30</sub> fue 44% mayor al detectado en el tratamiento RR (9,5 vs. 6,6 kg CH<sub>4</sub>.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente), valores que fueron registrados a los 43 días luego de haberse establecido la inundación (DDI) para ambos tratamientos. Cabe resaltar que en ambos se detectaron emisiones de CH<sub>4</sub> desde las primeras muestras de aire recolectadas (3 y 14 DDI para IC<sub>30</sub> y RR, respectivamente).

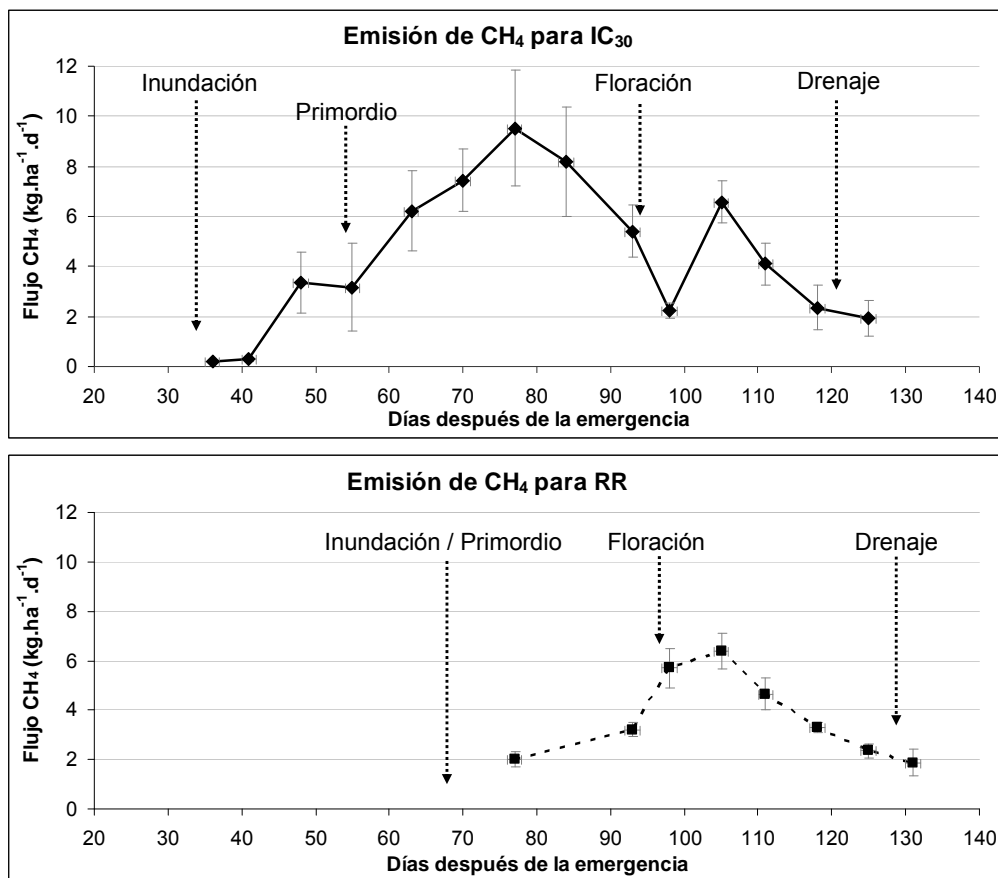


Figura 2. Emisiones de metano por tratamiento de riego ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ), desde la inundación hasta el drenaje del cultivo.

La baja tasa de emisión de  $\text{CH}_4$  observada durante la etapa vegetativa en el tratamiento  $\text{IC}_{30}$  puede ser resultado de la baja capacidad de transporte (desde el suelo a la atmósfera) que posee la planta debido al poco desarrollo que presentan las raíces y los macollos en dicho momento. Existe una alta correlación entre la biomasa de la planta (tanto de la parte aérea como de la subterránea), con el flujo de emisión del  $\text{CH}_4$ . Una mayor biomasa radical proporcionaría una mayor superficie para la difusión del  $\text{CH}_4$  desde el suelo reducido a las raíces, mientras que una mayor biomasa aérea facilitarían el transporte del gas a través de la planta (Baruah et al., 2010).

Algunos estudios reportan que la población y la estructura de la comunidad metanogénica se mantiene constante en los diferentes períodos de crecimiento del cultivo de arroz, aún en condiciones de drenaje (Asakawa and Hayano, 1995; Watanabe et al., 2004, 2006, citados por Li et al., 2011), aunque su actividad comienza a aumentar poco después de la inundación y la magnitud con la que lo hace (la presencia de un pico de emisión temprano en la etapa vegetativa) dependería de la fermentación de la materia orgánica fácilmente degradable y de las condiciones de reducción del suelo por inundación (Li et al., 2011).

En el tratamiento  $\text{IC}_{30}$ , el primer pico se generó en la etapa reproductiva del arroz (17 días antes de que el cultivo alcance el 50% de floración) y el segundo a

inicios de la etapa de llenado de granos (11 días después del 50% de floración). En RR, el pico se manifestó iniciando la etapa de llenado de granos (8 días después de alcanzado el 50% de floración) y ocurrió en la misma fecha (23 de febrero de 2011) y con un valor similar al obtenido por el segundo pico de  $\text{IC}_{30}$  ( $6,6$  vs  $6,4 \text{ kg CH}_4\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , respectivamente). Estas altas emisiones generadas en dichas etapas fueron producto de las condiciones favorables para la actividad metanogénica, como las fuertes condiciones de anaerobiosis en suelos inundados y la presencia de abundantes nutrientes para la actividad metanogénica resultantes de la descomposición de residuos del cultivo (ej. hojas muertas) y de la secreción de exudados desde las raíces de las plantas hacia la rizósfera que actúan como una importante fuente de carbono, suministrando energía para la actividad microbiana (Aulakh et al., 2001, citado por Baruah et al., 2010).

En RR, la aplicación de riegos intermitentes durante el período vegetativo (desde 33 a 63 DDE) afectó el patrón de emisión de  $\text{CH}_4$ , así como los valores diarios obtenidos luego de establecida la inundación. Si bien no se hicieron muestreos, se esperaba que durante dicho período (33 a 63 DDE) no haya emisiones de  $\text{CH}_4$  dado que la humedad del suelo (el potencial redox del mismo) no es lo suficientemente apropiada para la producción de este gas. A partir de 105 DDE (23 de febrero), el patrón de emisión fue similar en ambos tratamientos.

Cuando el cultivo de arroz se drena para la cosecha, las emisiones de CH<sub>4</sub> aumentan durante la fase inicial de secado. A medida que los macroporos se van aireando, se va liberando la mayor parte del CH<sub>4</sub> que estaba "atrapado" por el suelo. Este proceso culmina una vez que el suelo se airea totalmente (Neue et al., 1994, citado por Neue, 1997) y las emisiones de CH<sub>4</sub> disminuyen a valores de cero (Peng et al., 2011). Las condiciones de aerobiosis que se dan luego del drenaje también promueven la oxidación del CH<sub>4</sub> producido durante la inundación. En el presente experimento se detectaron flujos de CH<sub>4</sub> siete días después de efectuar el retiro de agua de las parcelas de arroz, registrando 1,9 kg CH<sub>4</sub>.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> en ambos tratamientos.

En la figura 3 se presenta la temperatura media atmosférica y las precipitaciones ocurridas en el período en que se realizaron los muestreos. La temperatura tiene efectos sobre la emisión de GEI, no solo porque afecta a los microorganismos responsables de llevar a cabo los procesos de producción y consumo de CH<sub>4</sub> presentes en el suelo (35 a 40°C es la temperatura óptima para la producción de CH<sub>4</sub> por metanogénesis),

sino que también afecta la conductancia a través de la planta de arroz para el transporte del CH<sub>4</sub> producido en el suelo y el sustrato suministrado por los tejidos de la planta (Nouchi et al., 1994; Minoda y Kimura, 1994; Yang y Chang, 1998 citados por Minamikawa et al., 2006). Por lo tanto, las variaciones mensuales de temperatura favorecerían a una mayor emisión de este gas en el mes de enero y parte de febrero, particularmente en esta zafra, donde se observa una tendencia a que las temperaturas medias estén por encima de la serie histórica desde el 11 de diciembre al 5 de marzo de 2011.

En el presente trabajo se determinó una emisión total de CH<sub>4</sub> de 215 y 102 kg.ha<sup>-1</sup>, para IC<sub>30</sub> y RR, respectivamente. Es importante resaltar, que para dicho cálculo se corrigieron los valores de emisiones considerando las temperaturas medias del día para tener el dato de emisión media diaria de los gases (como ya se mencionó anteriormente, los muestreos se realizaron en horas donde se dan las temperaturas máximas diarias de la atmósfera).

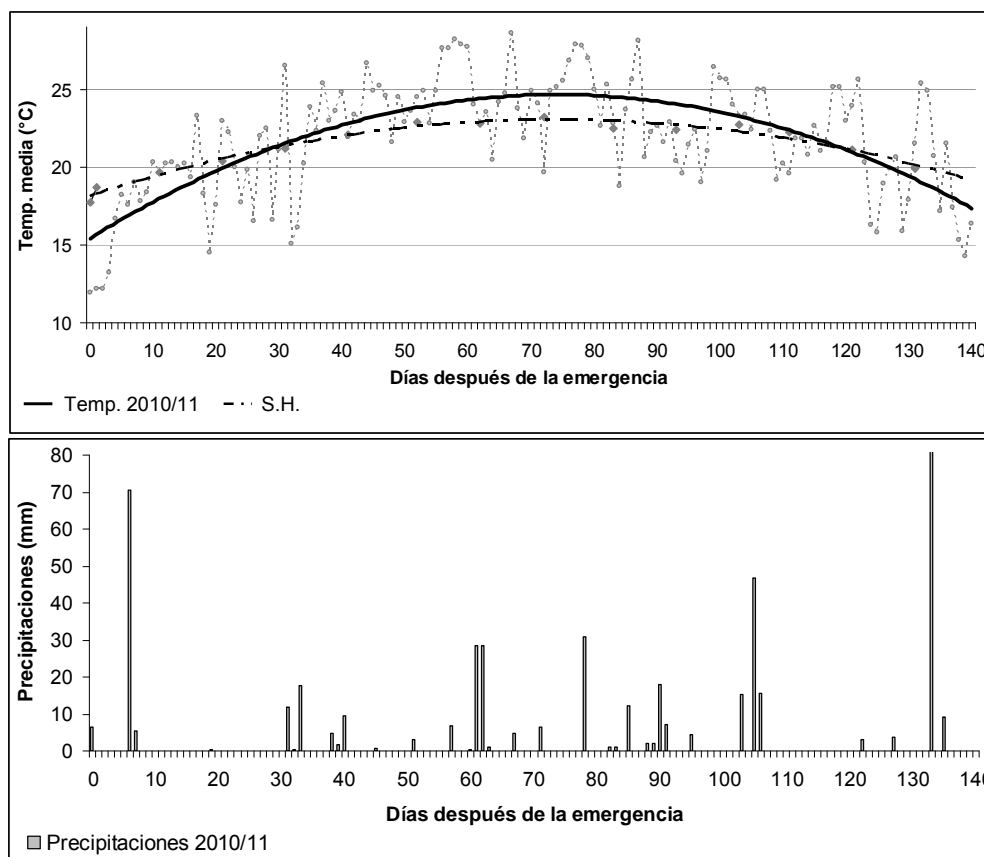


Figura 3. Temperatura media (°C) y precipitaciones para zafra 2010/2011 desde el 10 de noviembre 2010 al 30 de marzo 2011. Datos de la Estación Meteorológica de la UEPL/INIA, Treinta y Tres, Uruguay. S.H: Serie Histórica (1973-2011).

Los patrones de emisión de N<sub>2</sub>O fueron parecidos entre los tratamientos (Figura 4). La fertilización con urea no indujo a grandes picos de emisión de este gas sino que dichas emisiones estuvieron más asociadas al régimen de agua (a la alternancia de episodios de anaerobiosis/aerobiosis generados por riegos o lluvias).

La emisión de N<sub>2</sub>O en el cultivo de arroz es causada por nitrificación en suelos oxidados y desnitrificación en suelos semi-reducidos, por lo que luego de una lluvia o de un riego es esperable que los flujos de este gas se incrementen.

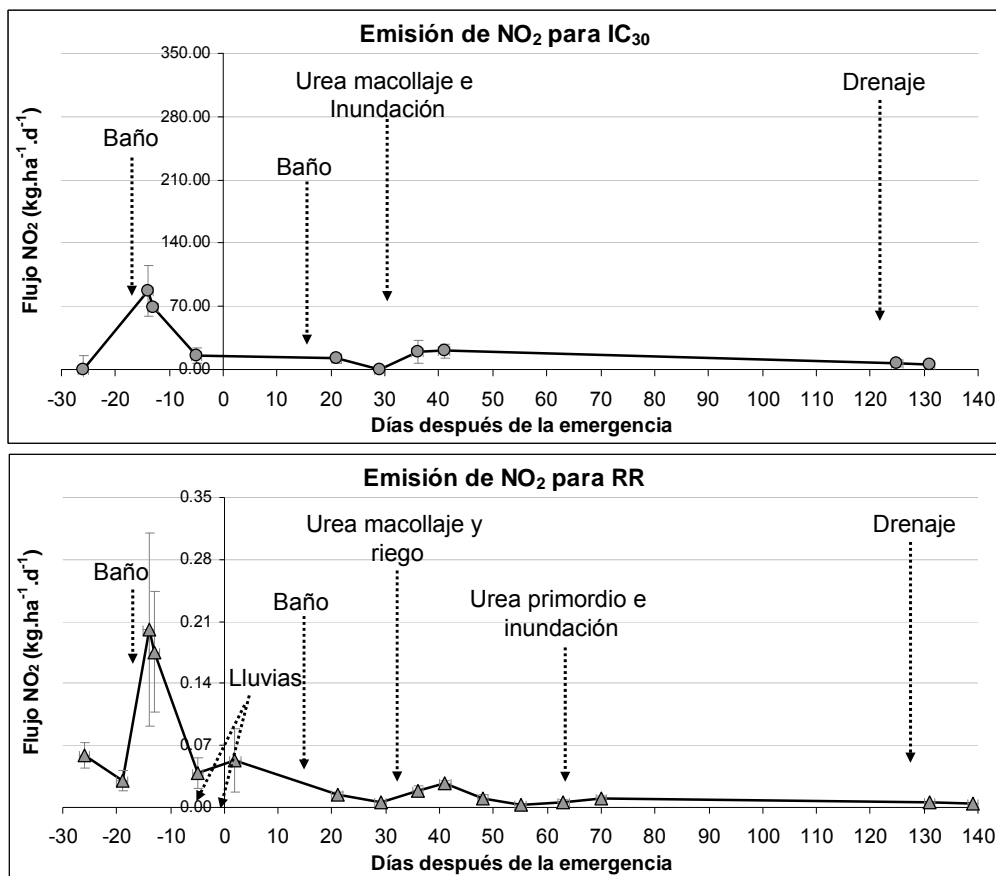


Figura 4. Emisiones de óxido nítrico por tratamiento de riego ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ), desde la siembra del cultivo hasta 15 días después del drenaje del mismo.

En ambos sistemas de riego, los máximos de emisión detectados ocurrieron luego del primer baño (posteriormente a la fertilización basal), el cual fue efectuado con el objetivo de favorecer la emergencia del cultivo. Este fue realizado 17 días luego de la siembra (16 días antes de la emergencia). Los máximos alcanzaron valores de 201 y  $87 \text{ g N}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  para IC<sub>30</sub> y RR, respectivamente. En RR, siempre se detectaron

valores de emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  durante el período de muestreo de 33 a 63 DDE, debido a que en este se aplicaron riegos intermitentes (6 en total), que determinaron una alternancia de períodos de suelo húmedo y seco y generaron una adecuada disponibilidad de  $\text{O}_2$  en el suelo para la producción de  $\text{N}_2\text{O}$  como producto intermedio ya sea de la nitrificación como de la desnitrificación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fechas de riego y volumen aplicado a los tratamientos.

Trat.	Baños		Riegos intermitentes	
	Fecha	Volumen (mm)	Fecha	Volumen (mm)
IC <sub>30</sub>	25 Oct (-16 DDE)	54	---	---
	8 Nov (-2 DDE)	65		
	26 Nov (16 DDE)	68		
RR	25 Oct (-16 DDE)	69	13 Dic (33 DDE)	29
	8 Nov (-2 DDE)	72	21 Dic (41 DDE)	44
	26 Nov (16 DDE)	68	27 Dic (47 DDE)	32
			3 Ener (54 DDE)	39
			7 Ener (58 DDE)	36
			10 Ener (61 DDE)	79

IC<sub>30</sub>: tratamiento de inundación continua; RR: riego con déficit controlado.  
Baños efectuados previo al establecimiento de la inundación permanente.

Si bien no se continuaron los muestreos de  $\text{N}_2\text{O}$  posteriormente al establecimiento de la inundación permanente, en base a información bibliográfica se asume que no habría emisiones ya que ante

condiciones anaeróbicas estrictas, se restringe la formación de este gas y su emisión (Towprayoon et al., 2005). Una vez inundado el cultivo y en condiciones



favorables para la desnitrificación, posiblemente esta continúe hasta la formación de  $N_2$ .

Luego del retiro de agua (previo a la cosecha), se detectaron valores bajos de  $N_2O$  en ambos tratamientos.

En el presente trabajo se determinó una emisión total de  $N_2O$  de 800 y 1800  $g \cdot ha^{-1}$ , para  $IC_{30}$  y RR, respectivamente (para estos cálculos se hizo la misma asunción que la descripta para  $CH_4$ ).

Para el cálculo de las emisiones de GEI, es necesario que todos los gases se conviertan en una métrica común, la cual suele expresarse en términos de equivalente de carbono o  $CO_2$  equivalente.

El Potencial de Calentamiento Global (GWP - *Global Warming Potential*) se utiliza para comparar las capacidades de diferentes GEI en atrapar el calor en la atmósfera. El GWP es la relación entre el calentamiento global (o forzamiento radiativo) de 1 kg de GEI con 1 kg de  $CO_2$ , en un período de tiempo determinado (el IPCC proporciona valores de GWP a 20, 100 y 500 años para cada uno de los principales GEI). Por lo tanto, el GWP es una métrica estándar para la conversión de las emisiones de varios gases en una medida común (IPCC, 2007). En la figura 5 se presentan los resultados obtenidos para ambos tratamientos en términos de GWP (GWP = emisiones  $CH_4 \times 25$  + emisiones de  $N_2O \times 298$ ).

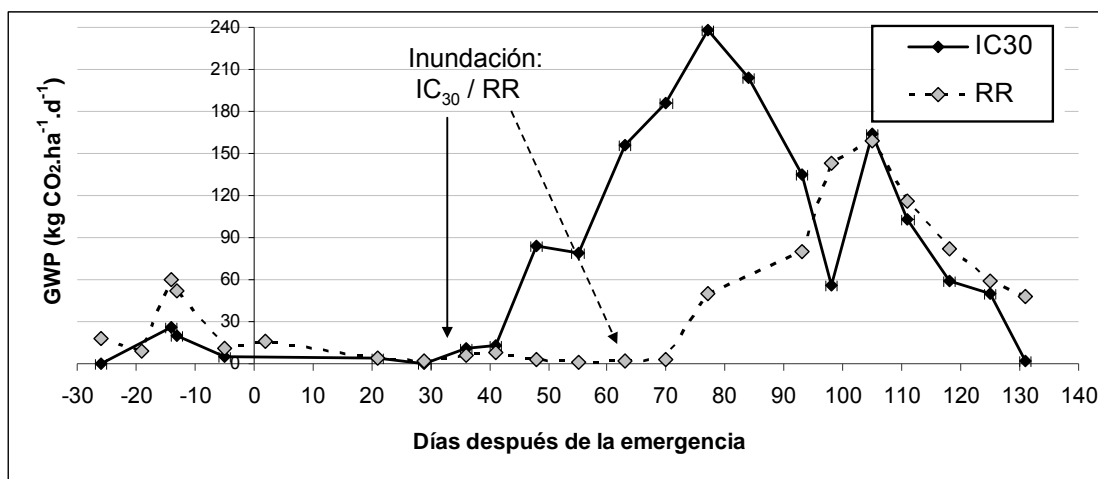


Figura 5. Potencial de Calentamiento Global (GWP) por tratamiento de riego ( $kg \ CO_2 \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}$ ), desde la siembra del cultivo hasta 15 días después del drenaje del mismo.

Para la presente zafra,  $IC_{30}$  registró durante todo el ciclo del cultivo de arroz un GWP 76 % mayor al cuantificado por RR (5636 vs 3207  $kg \ CO_2 \cdot ha^{-1}$ , respectivamente). Estos valores coinciden con los encontrados por Towprayoon et al. (2005), quienes mencionan valores de 5231 y 3412  $kg \ CO_2$  equivalente para un cultivo con inundación continua y otro con drenajes múltiples (dos períodos de drenajes intermitentes de tres días de duración realizados a los 30 y 73 días después del transplante), respectivamente. Es importante resaltar, que dichos datos de emisiones totales se calcularon considerando las emisiones medias diarias de los gases, a diferencia de lo presentado en la figura 5, donde se graficaron los valores de GWP según las emisiones máximas diarias obtenidas (debido a que, como ya se mencionó anteriormente, los muestreos se realizaron en las horas donde se dan las temperaturas máximas diarias de la atmósfera).

A partir de los resultados obtenidos en este año de evaluación se puede afirmar que la aplicación de un sistema de riego con déficit controlado (RR) permitiría reducir el potencial de calentamiento global en aproximadamente un 43% respecto a un sistema de inundación continua ( $IC_{30}$ ), por lo que sería una buena opción para mitigar las emisiones de GEI.

Como se puede observar en el cuadro 4, el GWP de las emisiones de  $N_2O$  es considerablemente pequeño respecto de las de  $CH_4$  en ambos manejos del agua. La bibliografía internacional también reporta bajas contribuciones del gas  $N_2O$  al GWP, por ejemplo, Itoh et al. (2011) determinaron que las emisiones de  $N_2O$  contribuyen en un 3,6% y 1,5% al GWP para distintas estrategias de manejo del agua.

Cuadro 4. Contribución por gas al GWP de la zafra (kg CO<sub>2</sub> equivalente.ha<sup>-1</sup>).

Gas	IC <sub>30</sub>		RR	
	Kg CO <sub>2</sub> .ha <sup>-1</sup>	%	Kg CO <sub>2</sub> .ha <sup>-1</sup>	%
CH <sub>4</sub>	5354	95	2630	82
N <sub>2</sub> O	282	5	577	18
<b>Total</b>	<b>5636</b>		<b>3207</b>	

 IC<sub>30</sub>: tratamiento de inundación continua; RR: riego con déficit controlado.

El rendimiento de grano del ensayo no fue afectado por el manejo del riego (Capítulo 2, Manejo del riego: productividad del agua). Si analizamos los resultados en términos de emisión de los gases por kg de arroz producido (expresado en CO<sub>2</sub> equivalente), vemos que el tratamiento RR emite 36% menos de CH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub>O por unidad de producto respecto al IC<sub>30</sub> (Cuadro 5). Se resalta el hecho de que ambos tratamientos obtienen una muy buena eficiencia, si los comparamos con los que aparecen en la bibliografía: 1,42 kg CO<sub>2</sub> eq/kg de arroz cáscara en China.

El promedio de emisión de CH<sub>4</sub> por kg de arroz cáscara para el cultivo de arroz en USA y Tailandia (países que presentan una gran variabilidad en cuanto a fuentes de agua, sistemas de riego, rendimiento final, etc., y que por lo tanto son representativos de diversas condiciones) es de 0,50 y 0,55 kg CO<sub>2</sub> eq/kg respectivamente (Carlsson-Kanyama, 2007); 0,64 kg CO<sub>2</sub> eq/kg en India (Garg et al., 2006 citado por Carlsson-Kanyama, 2007); 0,59 Kg CO<sub>2</sub> eq/Kg en Japón (Breiling et al., 2005, citado por Carlsson-Kanyama, 2007), datos que posicionan bien al cultivo de arroz en Uruguay en el ámbito internacional (0,48 kg CO<sub>2</sub> eq/kg para un cultivo bajo prácticas de manejo estándares).

Cuadro 5. Rendimiento y emisión de GEI por unidad de producto.

Trat.	Rendimiento (kg/ha)	Emisión CH <sub>4</sub> + N <sub>2</sub> O (kg C <sub>2</sub> O eq/kg arroz)	Emisión CH <sub>4</sub> (kg C <sub>2</sub> O eq/kg arroz)
IC <sub>30</sub>	11171	0.50	0.48
RR	10170	0.32	0.26
Media	10671	0.41	0.37

 IC<sub>30</sub>: tratamiento de inundación continua; RR: riego con déficit controlado.

## CONCLUSIONES

- El presente experimento permitió aumentar el conocimiento y contar con las primeras estimaciones relativas a las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para el cultivo de arroz. Para la variedad El Paso 144 -bajo prácticas de manejo estándares para el cultivo en Uruguay- las emisiones fueron de 215 kg CH<sub>4</sub>.ha<sup>-1</sup> y 800 g N<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> (cuantificado desde la siembra hasta 15 días después de efectuado el drenaje). Cabe resaltar que el factor de emisión de CH<sub>4</sub> determinado es similar al reportado por otros países y superior al tomado como referencia por el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (190 kg CH<sub>4</sub>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, MVOTMA, 2004). Por lo tanto, resulta importante continuar evaluando los procesos que controlan los flujos de emisión en los campos arroceros, aplicando tecnologías que mantengan la productividad del arroz, en pos del desarrollo sustentable, para identificar las prácticas de manejo más adecuadas para reducir dichas emisiones.

- Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O mostraron un comportamiento opuesto durante el transcurso del ciclo de cultivo: la emisión de N<sub>2</sub>O fue máxima previo a la emergencia del cultivo, mientras que la mayor concentración de CH<sub>4</sub> se alcanzó en la etapa reproductiva.

- La emisión de N<sub>2</sub>O durante el ciclo del cultivo fue baja y por lo tanto el principal GEI emitido por el arroz fue el CH<sub>4</sub>. Su contribución al GWP fue de tan solo 5% en el cultivo manejado bajo condiciones estándares (IC<sub>30</sub>).

- Si bien son datos preliminares (un año de evaluación), el presente estudio permite ir generando información acerca de cómo las prácticas de manejo del agua interaccionan con los niveles de emisión de los GEI y constituye el pilar inicial para delinear buenas prácticas de manejo que permitan alcanzar buenos niveles productivos, preservando a su vez el medio ambiente.

- El manejo del agua afectó las tasas de emisiones de los gases evaluados. La aplicación del sistema de riego con déficit controlado implementado en la fase vegetativa (tratamiento RR), introdujo fluctuaciones en la humedad del suelo (alternancia de periodos de suelo húmedo-seco / anaerobiosis-aerobiosis) que influyó en las emisiones de ambos gases aunque no afectó el rendimiento en grano.

- Bajo las condiciones en las cuales se realizó el estudio, el tratamiento RR disminuyó a la mitad las emisiones de CH<sub>4</sub> producidas durante el ciclo del cultivo de arroz respecto a IC<sub>30</sub>, mientras que aumentó en 2,3 veces las emisiones de N<sub>2</sub>O. El GWP (CH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub>O) fue reducido en un 43% en RR respecto a IC<sub>30</sub>.

## AGRADECIMIENTOS

A los funcionarios de la Sección: Matías Oxley, Adán Rodríguez, José Correa e Irma Furtado. A Sabrina La Torre y Adalgisa Martínez, por analizar las concentraciones de los gases mediante cromatografía gaseosa en los Laboratorios de Microbiología de las Facultades de Agronomía y Química, respectivamente.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baruah, K.K., Gogoi, B., Gogoi, P. 2010. Plant physiological and soil characteristics associated with methane and nitrous oxide emission from rice paddy. [Physiology and Molecular Biology of Plants](#), v. 16, N° 1, p. 79-91.

Carlsson-Kanyama, A., González, A.D. 2007. Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emissions associated with food production: methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). Disponible en: [http://www.ima.kth.se/eng/respublic/emissions\\_report\\_17\\_set\\_ACK.pdf](http://www.ima.kth.se/eng/respublic/emissions_report_17_set_ACK.pdf)> Acceso en: 17 de agosto, 2011

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1992. Methane and nitrous oxide flux measurements from soil and plant systems. In Manual of measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture. IAEA-TECDOC-674. Internacional Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. Vienna, Austria, p. 45-89.

Irisarri, P.; Tarlera, S.; Fernández, A.; Pereira, V.; Urraburu, M.; Terra, J. 2010. Arroz y gases de efecto invernadero. Revista Arroz N° 62. Disponible en: <http://www.aca.com.uy/oldsite/revista/>> Acceso en: 27 de julio, 2011.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.

Itoh, M; Sudo, S.; Mori, S.; Saito, H.; Yoshida, T; Shiratori, Y.; Suga, S.; Yoshikawa, N.; Suzue, Y.; Mizukami, H.; Mochida, T.; Yagi, K. 2011. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. [Agriculture, Ecosystems and Environment](#), v. 141, p. 359-372.

Li, D., Liu, M., Cheng, Y., Wang, D., Qin, J., Jiao, J., Li, H., Hua, F. 2011. Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China. *Soil & Tillage Research*, v. 113, p. 77-81.

Minamikawa, K., Sakai, N., 2006. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emissions from a paddy field in Japan. In [Agriculture, Ecosystems & Environment](#), v. 116, p. 181-188.

Mishra, S; Rath, A.K.; Adhya, T.K.; Rao, V.R.; Sethunathan, N. 1997. Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, v. 24, N° 4, p. 399-405.

Neue, H.U. 1997. Fluxes of methane from rice fields and potential for mitigation. *Soil Use and Management*, v. 13, p. 258-267.

Nouchi, I.; Mariko, S.; Auki, K. 1990. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to atmosphere through rice plants. In *Plant Physiology*, v. 94 (1), p. 59-66.

Peng, S.Z., Yang, S.H., Xu, J.Z., Gao, H.Z. 2011. Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management. [Science China Technological Sciences](#), v. 54, N°6, p. 1581-1587.

Pereyra; V. 2009. Emisiones de metano y óxido nítrico en arrozales de la zona este del Uruguay: el manejo de cultivo como factor determinante. Pasantía de grado de la Licenciatura en Ciencias Biológicas. Profundización en Biotecnología. Facultad de Química-Facultad de Ciencias. UDELAR. 40 p.

Liu, S., Qin, Y., Zou J, Liu Q. 2009. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. In *Science of the Total Environment*, v. 408 (4), p. 906-913.

Shiratori, Y., Watanabe, H., Furukawa, Y., Tsuruta, H., Inubushi, K. 2007. Effectiveness of a subsurface drainage system in poorly drained paddy fields on reduction of methane emissions. In *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 53, N° 4, p. 387-400.

Towprayoon, S., Smakgahn, K., Poonkaew, S. 2005. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. In *Chemosphere*, v. 59, p. 1547-1556.

Vibol, S. and Towprayoom, S. 2010. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from rice field with rice straw management in Cambodia. In *Environmental monitoring and assessment*, v. 161, p. 301-313.

Yagi, K., Tsuruta, H., Kanda, K., Minami, K., 1996. Effect of water management on methane emission from a Japanese paddy field: automated methane monitoring. In *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, N° 2, p. 255-267.