

**Evaluación de las emisiones de GEI por fertilización del cultivo de caña de azúcar, desde un enfoque en dinámica de sistemas**

Evaluation of GHG emissions by sugarcane crop fertilization, from a focus on system dynamics

Andrés López Astudillo\*  
Lina Marcela Rodríguez\*\*  
Claudia Marcela Lubo\*\*\*  
Julieth Abadía López\*\*\*\*  
Oscar A. Orozco\*\*\*\*\*  
Juan Sebastián Sandoval\*\*\*\*\*  
Fernando Arenas\*\*\*\*\*  
*Universidad Icesi (Colombia)*

\* Ph.D. (c) en Estrategia y Organización. Administrador de Empresas, Universidad Icesi, Departamento de Ingeniería Industrial, Colombia. Director del Proyecto de Investigación. [alopez@icesi.edu.co](mailto:alopez@icesi.edu.co)

\*\* MSc. en Ingeniería Industrial, Universidad Icesi, Departamento de Ingeniería Industrial, Colombia. Asistente de Investigación. [lmrodriguez@icesi.edu.co](mailto:lmrodriguez@icesi.edu.co)

\*\*\* MSc. en Ingeniería Industrial, Universidad Icesi, Departamento de Ingeniería Industrial, Colombia. Asistente de Investigación. [cmlubo@icesi.edu.co](mailto:cmlubo@icesi.edu.co)

\*\*\*\* MSc. (c) en Administración de Empresas, Química, Universidad Icesi, Departamento de Ingeniería Industrial, Colombia. Asistente de Investigación [julieth.abadia@correo.icesi.edu.co](mailto:julieth.abadia@correo.icesi.edu.co)

\*\*\*\*\* MSc. en Informática y Telecomunicaciones, Universidad Icesi, Departamento de Ingeniería de s&t, Colombia. Joven Investigador. [oorozco@icesi.edu.co](mailto:oorozco@icesi.edu.co)

\*\*\*\*\* Ingeniero Industrial y Químico, Universidad Icesi, Colombia. Asesor Externo del Proyecto de Modelación. [juansesandoval@hotmail.com](mailto:juansesandoval@hotmail.com)

\*\*\*\*\* Ph.D. en Administración de Negocios y Estrategia. Ingeniero Químico, Universidad Icesi, Departamento de Ingeniería Industrial, Colombia. Director del Grupo de Investigación Icubo. [faarenas@icesi.edu.co](mailto:faarenas@icesi.edu.co)

**Correspondencia:** Andrés López Astudillo. Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Icesi, Calle 18 N.º 122-135, Pance, Cali, Colombia. Tel. (+57) 5552334 ext. 8382.

**Origen de subvenciones:** Colciencias (Convocatoria 669-2014).

## Resumen

El presente artículo muestra los resultados de un modelo de dinámica de sistemas que permitió evaluar el comportamiento de la huella de carbono proveniente de la aplicación de fertilizantes ureicos y nitrogenados en un cultivo de caña de azúcar ubicado en el Valle del Cauca, con una proyección de cinco años. Como metodología de investigación se utilizó tanto la dinámica del ciclo del nitrógeno como las directrices del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Los principales resultados evidenciaron que los tipos de cultivo en transición y orgánicos presentan un menor nivel de emisiones de GEI con respecto a los cultivos comerciales, con una reducción del 71 % y el 36 %, respectivamente. Por medio de los análisis de sensibilidad desarrollados, en primera instancia, al fraccionar la dosis de fertilización actual en dos tiempos, no se observó una reducción en las emisiones de GEI a mediano y largo plazo. Sin embargo, al considerar las dosis recomendadas de fertilización, según las características del suelo en estudio y el ciclo de cosecha del cultivo, se obtuvieron niveles significativos de reducción de las emisiones en los cultivos comerciales y orgánicos, correspondientes en promedio al 21 % (socas) y 32 % (plantillas). Finalmente, el artículo concluye con la importancia de adoptar estrategias de fertilización a nivel de productividad y reducción del impacto ambiental.

**Palabras clave:** cultivo de caña de azúcar, emisiones de óxido nitroso, fertilización, mitigación de gases de efecto invernadero, modelación dinámica.

## Abstract

This paper stands the results for a systems dynamics model, which allows to evaluate the carbon footprint behavior from ureic and nitrogen fertilizers applications on sugarcane crop fields located at Valle del Cauca on a 5 years simulation. As a research methodology, both dynamics Nitrogen Cycle and the IPCC Guidelines were studied in order to estimate GHG emissions. The main result presented that transition and organic sugarcane crops have a lower level of GHG emissions than a commercial sugarcane crop, with a decrease of 71% and 36% respectively. Through Sensitivity Analysis, since fractional fertilization doses into two times, it is not possible to observe GHG emissions reduction on both medium and long terms. However, considering the suggested doses due to soil characteristics under study and the sugarcane crop cycle, significant levels of emissions reductions were obtained in commercial and organic crops, corresponding on average 21% (plant crop) and 32% (second ratoon crop). Finally, we conclude on the significance of adopting strategies for fertilization in order to increase productivity and to reduce environmental impact.

**Keywords:** dynamic modeling, fertilization, GHG mitigation, nitrous oxide emissions, sugar-cane crop.

Fecha de recepción: 15 de junio de 2016  
Fecha de aceptación: 9 de marzo de 2017

## I. INTRODUCCIÓN

El  $N_2O$  es un gas radiactivamente activo de larga duración, con un potencial de calentamiento global 298 veces superior al del  $CO_2$  y un periodo de permanencia de 100 años [1]. Durante el periodo 2005-2020 se estima un incremento del 5 % de las emisiones de  $N_2O$  [2]. Una de las fuentes principales de emisión de este gas está relacionada con las actividades antropogénicas, especialmente sobre el manejo de suelos agrícolas (50 %) y abono animal (30 %) [3]. Según el IPCC, la agricultura mundial alcanza un valor de 6,1 miles de millones de toneladas de  $CO_2$ -eq, lo que representa el 12 % del total de GEI emitidos a la atmósfera. Especialmente el  $N_2O$  genera 2100 millones de toneladas de  $CO_2$ -eq [4].

Ante esto, en la actualidad se realizan prácticas agrícolas que incluyen el uso intensivo de insumos químicos y maquinaria. En el Valle del Cauca, entre 1975 y 1985 se solían aplicar 200 kg/ha de urea en socas, y 100 kg/ha de esta en plantillas. De esta forma, se alcanzaba una productividad de caña de 1,33 TC/kg de N aplicado. Hoy en día, la productividad de cada nitrógeno aplicado ha caído a 0,67 TC cuando se aplican hasta 400 kg/ha de urea para producir una cantidad igual o menor de caña [5].

En otras palabras, hace más de 30 años se aplicaba aproximadamente la mitad de la dosis actual, de lo cual se obtenían resultados productivos similares y superiores a los que se obtienen actualmente con una aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados; esto supone serios problemas ambientales. Con el fin de mejorar estas prácticas agrícolas de fertilización indiscriminada se recomienda el uso de modelos de simulación que permitan evaluar, de forma dinámica, la complejidad del ciclo del nitrógeno en los sistemas de cultivo suelo-planta, y así, por medio de análisis de sensibilidad sea posible identificar oportunidades de mejora en el sector [6].

Como antecedentes de la investigación actual se destaca el estudio de un modelo matemático de las transformaciones del N en la desembocadura del río Sena (Francia), y el impacto de la liberación de aguas residuales en la oxigenación y emisión de  $N_2O$ . Se demostró que la nitrificación favorece la oxigenación, de modo que contribuye con la reducción de estas emisiones [7]. Otro estudio a destacar es el relacionado con el diseño de un modelo de

interrelación de flujos de N en sistemas agrícolas. Se concluyó que es posible reducir las pérdidas de N hasta niveles bajos encontrados en prácticas orgánicas, y mejorar así la gestión en la práctica convencional [8].

Vale la pena mencionar que, de acuerdo con la revisión bibliográfica del presente estudio [9], no se encontraron estudios previos externos relacionados con la modelación dinámica de la huella de carbono por fertilización nitrogenada en cultivos agrícolas. Por tanto, esta investigación contribuye a reducir esta brecha mediante la modelación del comportamiento de los principales GEI que provienen de la fertilización requerida para el levante de los cultivos de caña de azúcar comerciales en transición hacia orgánicos, y los certificados como orgánicos.

Este estudio tiene como propósito la validación de las siguientes hipótesis: “La aplicación de fertilizantes sintéticos en suelo genera un mayor nivel de emisiones de GEI con respecto a la aplicación de los fertilizantes orgánicos”; y “la fertilización fraccionada y en diferentes edades de la caña permite una reducción de las emisiones de GEI en suelo.”

De esta forma, por medio de la modelación con dinámica de sistemas se trazó como objetivo la representación del sistema según el ciclo del nitrógeno, así como la validación de las hipótesis previamente mencionadas por medio del análisis de sensibilidad, sin tener una influencia directa sobre el medio. Esta herramienta facilita el desarrollo de análisis comparativos con respecto a las condiciones actuales observadas en campo mediante la generación de escenarios de simulación en términos de oportunidades de mejora, con el fin de proponer estrategias de reducción o mitigación de las emisiones de GEI en el largo plazo.

## II. METODOLOGÍA

A partir de las cinco etapas del proceso de modelación dinámica [10] se desarrolló un modelo de simulación con base en la dinámica del N (ciclo de nitrógeno) para los tres tipos de cultivo (comercial, en transición y orgánico). Esto permitió evaluar escenarios de simulación de emisiones de GEI (huella de carbono) a partir de diferentes dosis de fertilización actuales y recomendadas según las condiciones del cultivo en estudio.

## A. Descripción de la estructura del modelo (ciclo del nitrógeno)

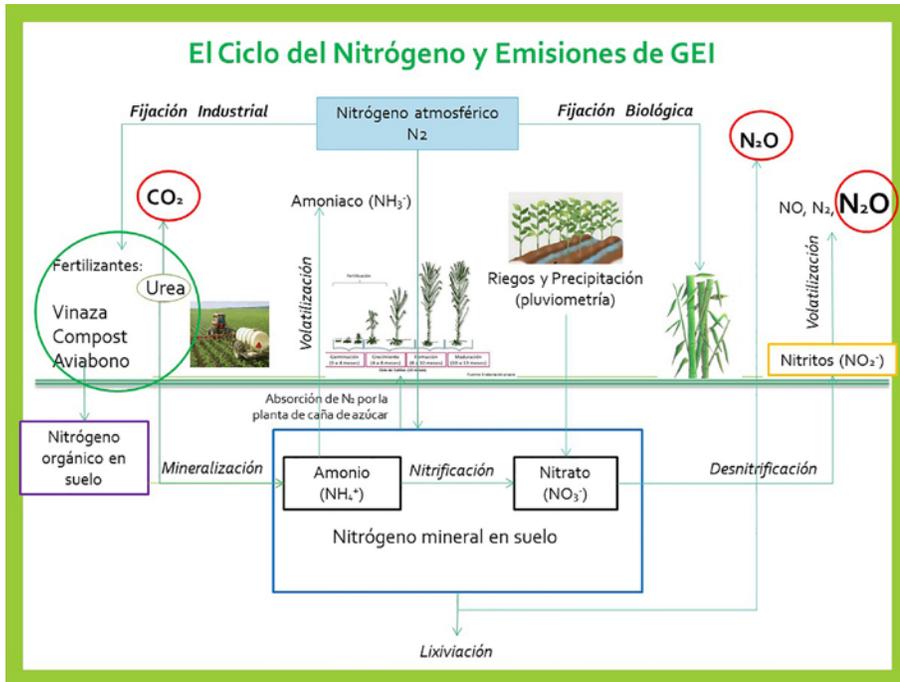
El nitrógeno, al igual que el carbono, es un nutriente esencial para el desarrollo de cualquier tipo de vegetal, y se encuentra dentro de un sistema cíclico de intercambios entre la atmósfera, los suelos y los seres vivos. La atmósfera se considera la mayor fuente de reserva para este elemento, ya que contiene un 79 % de nitrógeno sobre el total de los gases [11]. Dada su importancia, los seres humanos han incorporado este nutriente en el suelo en forma de materia orgánica, la cual se transforma en nitrógeno mineral (proceso de mineralización) a fin de que la absorban los organismos vivos, y obtener así altos rendimientos en los cultivos.

A continuación, se describe el proceso de los flujos relacionados en el ciclo del nitrógeno (sistema suelo-planta), el cual representa la base fundamental del modelo para obtener el comportamiento de las emisiones de  $\text{CO}_2$  que provienen de la descomposición de urea y las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  producto de la fertilización nitrogenada.

La amonificación es la primera etapa del proceso de mineralización del nitrógeno orgánico hacia inorgánico. En esta se genera una descomposición enzimática de aminas y se produce amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) [12]. Vale la pena mencionar que al aplicar un fertilizante amoniacal o ureico sobre el cultivo, como es el caso de la urea, se incrementan las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  en razón al aporte exclusivo de nitrato, y a su vez se da un proceso de volatilización en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Este último puede transportarse a largas distancias en la atmósfera y reaccionar con la formación de partículas (aerosoles) como sulfato amónico; de igual forma, la liberación de emisiones de  $\text{CO}_2$  producto de la descomposición de este fertilizante en el suelo [13].

Luego sigue la etapa de nitrificación, en la cual el amonio se convierte en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por medio de un proceso aerobio en el que actúan bacterias nitrificantes. Este queda sujeto a lixiviación debido a la no retención de arcillas, y se incrementa con la presencia de lluvias y las aplicaciones de riego, dado que el suelo tiene una capacidad máxima de retención de agua que al ser superada tiende a percolarse y lixivarse. Esto, además de generar emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$ , conlleva a una reducción de la eficiencia en el uso del nitrógeno y causa una serie de problemas medioambientales y de salubridad en razón a su grado de contaminación de aguas subterráneas y superficiales.

Posteriormente, mediante un proceso de desnitrificación en condiciones anaeróbicas se da la formación de nitritos. En este proceso a su vez ocurre un proceso de volatilización en el que se generan pérdidas gaseosas en términos de  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  [11]. (Véase la Figura 1).



Fuente: propia.

Figura 1. Representación del ciclo del nitrógeno y las emisiones de gei provenientes de los suelos gestionados

## B. Descripción de las condiciones del modelo

La modelación se realizó con un periodo de simulación de 60 meses, dado que la velocidad de las reacciones ocurridas en las vías internas de transferencia de nitrógeno es relativamente rápida y no permite evidenciar una dinámica en el largo plazo. Con respecto a las entradas del sistema en términos de dosis de fertilizantes amoniacales (ureicos) y nitrogenados aplicados en el mes 0 de la planta se asumió una demora despreciable en la velocidad de absorción del N en suelo proveniente de la vinaza (líquido), con relación a la de la urea, el compost y el aviabono (sólidos), así como una independencia

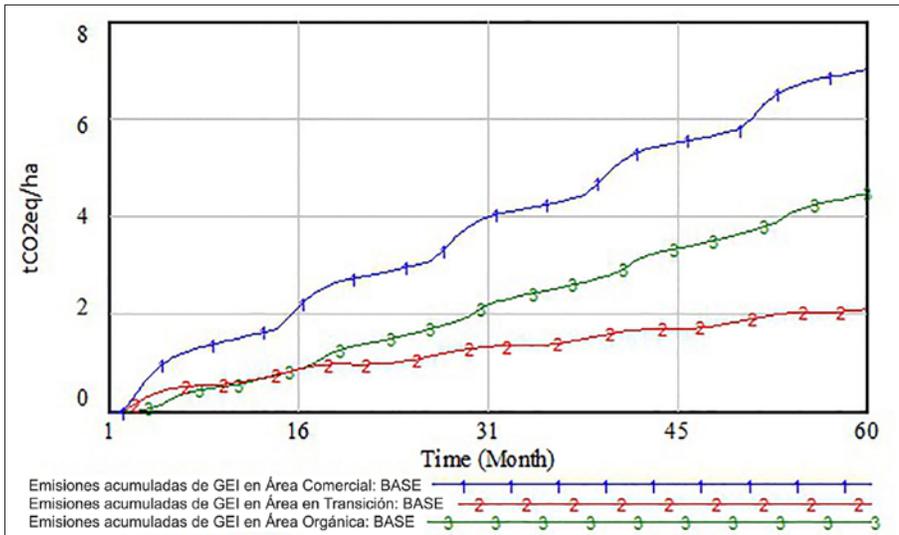
entre la tasa de absorción de N y la tasa de concentración inicial de N en suelo. Es necesario mencionar que no se consideró esta última tasa, dado que la cantidad puede variar en un rango entre 0,2 y 0,7 % para la capa arable [14], y requiere de estudios en campo a fin de determinar su valor en particular, puesto que depende de las condiciones de cada terreno y la región en la que se encuentra el cultivo. Además, al realizar simulaciones con diferentes valores iniciales de N en suelo no se afectó el comportamiento final de las emisiones de GEI, y, por tanto, se consideró un factor insignificante para esta modelación.

Por otra parte, se consideraron las características del suelo más representativo en el valle geográfico del Río Cauca, y en los tipos de cultivo del ingenio en estudio ubicado en esta región. Estas hacen referencia a un tipo de suelo franco-arcilloso, bien drenado, con contenido medio de materia orgánica (MO) y condiciones secas de humedad [15]. Con respecto a las pérdidas gaseosas de N solo se consideraron las emisiones de los gases de efecto invernadero que son las de interés primordial en la modelación de la huella de carbono, puesto que también se generan pérdidas por volatilización del amonio y generación de amoniaco, las cuales se pueden despreciar, dado que constituyen tan solo un 15 % del nitrógeno liberado a la atmósfera [16]. Finalmente, para efectos de la presente modelación se despreciaron las emisiones provenientes de los herbicidas y madurantes aplicados al cultivo para el control de malezas y la facilitación de la cosecha-concentración de jugos, respectivamente, dado que su aporte es mínimo en términos de emisiones, a pesar de ser responsables de contaminación y toxicidad, factores que el indicador de huella de carbono no tiene en cuenta [17].

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Simulación base

Se obtuvo un escenario inicial que permite observar el comportamiento de las emisiones acumuladas de GEI, es decir, de CO<sub>2</sub> proveniente de la descomposición de la urea aplicada en los cultivos comerciales, y N<sub>2</sub>O producto de la descomposición de los fertilizantes nitrogenados aplicados en los cultivos comerciales, cultivo en periodo de transición a orgánicos y cultivos certificados como orgánicos, en términos de una hectárea de área evaluada para un periodo de simulación de 60 meses, esto es, cinco años (Figura 2).



Fuente: propia.

**Figura 2.** Emisiones acumuladas de gei según el tipo de cultivo (t de co<sub>2</sub>-eq/ha)

De acuerdo con el comportamiento de las emisiones representadas en la Fig. 2 se logró evidenciar que las emisiones de N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> se generaron a partir del tercer mes de la siembra de la caña, después de la aplicación de los fertilizantes. Por otra parte, se obtuvo un menor nivel en las emisiones de gases generadas en un cultivo en transición y un cultivo orgánico (del 71 % y 36 %, respectivamente), con relación a las emisiones provenientes de un cultivo comercial. Si bien es cierto las emisiones del cultivo orgánico sobrepasan a las del cultivo que aún se encuentra en periodo de transición hacia orgánico – dado que el cultivo en transición recibe vinaza y compost, mientras que en el cultivo orgánico se reemplaza el uso de compost por aviabono –, este contiene una mayor fracción de nitrógeno y, por tanto, aporta en mayor medida a las emisiones de N<sub>2</sub>O.

Es necesario mencionar que el cultivo comercial es el único cultivo que no solo recibe fertilización nitrogenada, sino también fertilización ureica o amoniacal, lo cual incrementa las emisiones totales de GEI en un 12 %, medidas en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes, dado que en este caso no solo se produce N<sub>2</sub>O, sino a su vez CO<sub>2</sub> por la descomposición de urea en el suelo. Esto hace que a su vez se incrementen las emisiones de GEI totales por parte de este cultivo, medidas en términos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes. Según las

condiciones actuales del ingenio en estudio este posee, en promedio, 9000 hectáreas de cultivo comercial, 1000 hectáreas de cultivo en transición y 2000 hectáreas de cultivo orgánico; para un periodo de simulación de cinco años se obtuvo un nivel de emisiones de GEI correspondiente a 63038,1 t de CO<sub>2</sub>-eq, 2097,48 t de CO<sub>2</sub>-eq, y 8934,13 t de CO<sub>2</sub>-eq, respectivamente.

## B. Validación del modelo

Con el fin de determinar una reducción significativa en las emisiones de GEI por fertilización en un lapso de cinco años, se realizaron pruebas de análisis de sensibilidad, las cuales consistieron en modificar las cantidades iniciales de aplicación de fertilizantes ureicos y nitrogenados. Específicamente, se desarrollaron dos análisis de sensibilidad. El primer análisis consistió en el fraccionamiento de la dosis actual de fertilización que, por lo general, el ingenio en estudio aplica a los cero días de sembrada la planta, para ser aplicada a los 30 y 60 días de germinación de la caña de azúcar. El segundo análisis permitió evaluar las emisiones generadas por dosis recomendadas de fertilización según las características del suelo y el ciclo de cosecha del cultivo.

### *Fraccionamiento de las dosis actuales de fertilización*

Esta estrategia de fertilización fraccionada está relacionada con el ritmo de absorción de la planta, el cual es máximo durante los dos primeros meses desde la brotación [19]. Con el fin de evaluar si efectivamente se obtiene una reducción significativa en las emisiones de GEI, se dividieron las dosis actuales de aplicación de fertilizantes ureicos y nitrogenados a los 30 y 60 días después de la siembra o corte de la caña anterior, sin distinción alguna por ciclo de cosecha (Tabla 1).

**Tabla 1.** Fraccionamiento de las dosis de fertilización actual

Fertilizante (ton Fert/ha)	Cultivo comercial				Cultivo en transición				Cultivo orgánico			
	Edad de la caña (mes)				Edad de la caña (mes)				Edad de la caña (mes)			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
Urea	0,225	0,225										
Vinaza	6,12	6,12			5,74	5,74			5,74	5,74		
Compost	5	5			5	5						
Aviabono									3	3		

Fuente: propia.

Como se puede observar en la Tabla 2, este primer escenario de sensibilidad permitió concluir que fraccionar la dosis de aplicación actual no genera una solución al problema de reducción de las emisiones de GEI. Esta estrategia puede ser significativa en términos de eficiencia y productividad, dado que la planta puede asimilar mejor los nutrientes en dos tiempos de aplicación. Sin embargo, no sucede lo mismo en términos de reducción de emisiones en el mediano y largo plazo. A pesar de que en primera instancia se genere una solución positiva de reducción de GEI, después de los primeros 16 meses de simulación se disparan las emisiones de GEI de manera gradual. Específicamente, en el cultivo comercial a partir del periodo 17 se inicia con un incremento en las emisiones del 4,93 % hasta alcanzar un aumento del 33,6 % de estas, con respecto a las emisiones aportadas con las prácticas actuales en las que se realiza una sola aplicación del fertilizante en el mes 0. En el cultivo en transición, se da un incremento del 7,95 % a partir del periodo 16 y se supera el 100 % de incremento en las emisiones de GEI al final del periodo de simulación establecido. No obstante, en el cultivo orgánico se observa un aumento insignificante en el nivel de emisiones correspondiente a un 0,58 % con respecto a las condiciones iniciales de fertilización.

**Tabla 2.** Emisiones acumuladas de GEI (t de CO<sub>2</sub>-eq/ha).  
 Base vs. fraccionamiento de dosis actuales

Emisiones acumuladas (t CO <sub>2</sub> -eq/ha)	Cultivo comercial		Cultivo en transición		Cultivo orgánico	
	base	A.S. 1	base	A.S. 1	base	A.S. 1
CO <sub>2</sub>	0,76	0,76				
N <sub>2</sub> O	6,25	8,59	2,1	4,41	4,47	4,49
Total GEI	7,01	9,35	2,1	4,41	4,47	4,49

Fuente: propia.

Se han realizado varios estudios sobre el aporte del fraccionamiento de las dosis de nitrógeno (N) en los cultivos de caña en términos de eficiencia y productividad de los cultivos. Sin embargo, existen pocos estudios realizados sobre el nivel de afectación a las emisiones de GEI. Si bien es cierto no se puede tomar una decisión unánime, dado que el nivel de afectación del fraccionamiento de la dosis de N en términos productivos y ambientales depende de factores edáficos y climáticos, principalmente, un estudio realizado en el valle geográfico del río Cauca sobre suelos franco-arcilloso de texturas medianamente finas y muy finas – como corresponde a este

caso de estudio —, indica que es más conveniente aplicar todo el contenido de nitrógeno a los 30 días después de cada corte [20]. Este estudio permite dar validez a las conclusiones obtenidas por medio de este primer análisis de sensibilidad.

En resumen, dado que en primera instancia no se logró obtener una oportunidad de reducción de emisiones a partir del fraccionamiento de las dosis de fertilizantes que se aplican actualmente en el ingenio en estudio, se decidió evaluar un segundo análisis de sensibilidad a partir de las dosis de fertilizantes recomendadas para un suelo de contenido medio de materia orgánica, en ambos ciclos de cosecha (plantilla, soca), como se describe a continuación.

### *Dosis recomendadas según características del suelo y el cultivo*

La segunda estrategia de fertilización consistió en determinar las dosis adecuadas de fertilización según las características del suelo en estudio y el ciclo de cosecha del cultivo. Estas características se determinaron a partir de muestras de suelo obtenidas en los tres tipos de cultivo, las cuales se analizaron en el laboratorio de suelos y tejido foliar de Cenicaña. Los análisis permitieron identificar un tipo de textura fina del suelo franco-arcilloso, así como un contenido medio de materia orgánica (3,05 %). El presente análisis se utilizó como guía para identificar los requerimientos nutricionales y de fertilización. Por otra parte, se consideraron las aplicaciones según el ciclo de cosecha del cultivo, el cual requiere una fertilización diferente en cantidad y tiempo adecuado de aplicación (Tabla 3). Específicamente, las socas poseen una mayor dependencia de la fertilización nitrogenada, y por tanto se recomienda realizar la aplicación de la dosis a los 30 días después del corte (ddc), incorporando el fertilizante a ambos lados del surco de la caña. Mientras que en las plantillas en las que se requiere una menor cantidad de nitrógeno, se recomienda la aplicación del fertilizante a los 60 días después de la siembra (dds), que es el tiempo en el cual las raíces del cultivo inician la absorción y hay un mayor aprovechamiento del fertilizante [21].

**Tabla 3.** Aplicación de las dosis de fertilización recomendadas según el ciclo de cosecha [22]

Fertilizante (ton Fert/ha)	Ciclo de cosecha	Cultivo comercial				Cultivo en transición				Cultivo orgánico			
		Edad de la caña (mes)				Edad de la caña (mes)				Edad de la caña (mes)			
		0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
Urea	Plantilla	0,098											
	Soca	0,109											
Vinaza	Plantilla	8,64				8,64				8,64			
	Soca	11,11				11,11				11,11			
Compost	Plantilla	5,38				5,38							
	Soca	6,92				6,92							
Aviabono	Plantilla									3,41			
	Soca									4,39			

Fuente: propia.

Este segundo escenario de sensibilidad permitió identificar oportunidades de reducción de las emisiones de GEI provenientes de los cultivos comerciales y orgánicos (véase la Tabla 4). Sin embargo, no se obtuvo la misma respuesta para los cultivos en periodo de transición de comercial a orgánico, dado que se observa un aumento en el nivel de emisiones a pesar de haberse considerado una reducción en la dosis aplicada.

No obstante, para el presente escenario se puede despreciar el aporte de este tipo de cultivo según las dosis recomendadas, dado que bajo las dosis actuales de fertilización el nivel de emisiones es menor con respecto a los otros dos cultivos; además, es un cultivo en transición que solo recibe vinaza y compost (los fertilizantes que poseen un menor contenido de N), mientras que el cultivo comercial recibe adicionalmente urea, y el orgánico reemplaza el uso de compost por aviabono, el cual posee un mayor contenido de N.

Con respecto al cultivo comercial, al considerar estas dosis recomendadas en el ciclo de cosecha tipo soca se obtiene una reducción en las emisiones del 29,4 %, mientras que en el ciclo tipo plantilla este nivel de reducción alcanza un valor del 38,4 % con respecto a las emisiones obtenidas en la simulación base. En el cultivo orgánico se obtiene una reducción del 12,5 % en las socas, y de 24,8 % en las plantillas, con respecto a las dosis de fertilización actual.

**Tabla 4.** Emisiones acumuladas de gei (t de CO<sub>2</sub>-eq/ha).  
Base vs. dosis recomendadas

Emisiones acumuladas (t CO <sub>2</sub> -eq/ha)	Ciclo de cosecha	Cultivo comercial		Cultivo en transición		Cultivo orgánico	
		base	A.S. 2	base	A.S. 2	base	A.S. 2
CO <sub>2</sub>	Plantilla		0,17				
	Soca	0,76	0,18				
N <sub>2</sub> O	Plantilla		4,15		3,25		3,36
	Soca	6,25	4,77	2,1	3,77	4,47	3,91
Total GEI	Plantilla		4,32		3,25		3,36
	Soca	7,01	4,95	2,1	3,77	4,47	3,91

Fuente: propia.

Se debe tener en cuenta la aplicación de una cantidad moderada de dosis de fertilizante, pues un exceso de este conlleva a un bajo contenido de sacarosa y fibra en la planta. Además, este es un gasto innecesario para los ingenios, dado que la planta solo aprovecha entre el 20 % y el 50 % del fertilizante aplicado. Adicionalmente, este tipo de suelo posee un buen contenido de materia orgánica, drenaje y niveles freáticos profundos; por tanto, menores requerimientos de N [23], ya que la materia orgánica proporciona más de la mitad del N que requiere el cultivo, de modo que reduce la necesidad frecuente de fertilizante nitrogenado. Por otra parte, al momento de fertilizar es de vital importancia hacer una distinción por ciclo de cosecha, debido a que los requerimientos de N se incrementan con el número de cortes del cultivo, tal como se evidenció en este estudio en término de emisiones.

#### IV. CONCLUSIONES

Gracias al presente estudio de investigación se logró evidenciar cómo, a pesar de que el suelo emite por sí mismo N<sub>2</sub>O en la interacción del sistema suelo-planta como ciclo natural del nitrógeno, la aplicación de fertilizantes nitrogenados incrementa la cantidad de N disponible en suelo que pasa por procesos de mineralización, nitrificación y desnitrificación. Este aumento en la cantidad de N ocasiona un aumento en las emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O que provienen de los procesos de volatilización y lixiviación de nutrientes.

A partir de las hipótesis planteadas se logró concluir que, en un primer momento, los cultivos en proceso de transición de comercial hacia orgánico

y los cultivos orgánicos generan un menor nivel de emisiones de GEI con respecto al cultivo comercial, dado que este último no solo aporta emisiones de N<sub>2</sub>O por fertilización nitrogenada, sino a su vez emisiones de CO<sub>2</sub> por fertilización amoniacal o ureica, lo que incrementa el nivel de emisiones totales de GEI en un 12 %. Sin embargo, es conveniente anotar que los fertilizantes sintéticos como la urea no generan un aporte significativo con respecto a los fertilizantes orgánicos (como, por ejemplo, la vinaza, el compost y el aviabono), dado que estos últimos poseen un nivel elevado de fracción nitrogenada que aporta N<sub>2</sub>O. Además, a pesar de que este gas persiste en la atmósfera la mitad del tiempo de permanencia del CO<sub>2</sub>, tiene un potencial de calentamiento global 298 veces mayor, por tanto, un mayor impacto ambiental en términos de huella de carbono.

Al dar respuesta a la otra hipótesis se obtuvo que, a fin de obtener un nivel significativo de reducción de emisiones a mediano y largo plazo, en términos ambientales y económicos no es conveniente realizar una fertilización fraccionada a los 30 y 60 días de brotamiento del cultivo sin tener en cuenta previamente sus características y su ciclo de cosecha. Los tipos de suelos bien drenados y con un buen contenido de materia orgánica como los estudiados en la presente investigación requieren menores cantidades de nitrógeno y, según el ciclo de cosecha tipo plantilla o soca, el momento de aplicación corresponde a los 30 o 60 días después de la siembra o corte, respectivamente, lo cuales están sincronizados con el periodo de mayor absorción de nutrientes por parte del cultivo.

## V. RECOMENDACIONES

El modelo de simulación previamente abordado permite establecer una línea base desde la fase de fertilización en campo a partir de las directrices del IPCC. Sin embargo, para futuros proyectos de investigación, se propone desarrollar un modelo basado en el cálculo experimental de las emisiones, y considerar así variables exógenas climatológicas y meteorológicas, además de tener en cuenta la incidencia en el nivel de emisiones por parte de otros factores como las órdenes predominantes de suelo a nivel departamental, las variedades de caña más representativas, el número de cortes del cultivo (lo que afecta el requerimiento de nitrógeno en suelo), la composición de los fertilizantes y las condiciones edafoclimáticas, entre otros.

Asimismo, se deben tener en cuenta las prácticas de fertilización, puesto que un tipo de fertilización al voleo (esparcido) – especialmente si ha llovido o si ha habido riego – incrementa las pérdidas de N por volatilización [22]. Sobre todo, es necesario considerar los sistemas de riego, puesto que al generar niveles de percolación profunda y lixiviación de nutrientes se contribuye al incremento de emisiones indirectas de  $N_2O$  desde el suelo.

Además, se recomienda determinar el comportamiento del flujo de gases de estas emisiones al considerar no solo las fuentes de emisión, sino también la absorción de los gases por parte del cultivo. Otro de los factores interesantes a evaluar podría ser el efecto de los aditivos retardantes de las emisiones de GEI. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que así se genere un efecto tardío, el tiempo de permanencia de estos gases en la atmósfera es prolongado, por tanto, esta no podría ser una buena solución en términos de mitigación de emisiones de GEI, razón por la cual no se evaluó en el presente estudio.

Por otra parte, se sugiere no solo tener en cuenta el ciclo del nitrógeno para evaluar el nivel de emisiones de GEI que generan los suelos gestionados, sino también evaluar cuantitativamente el nivel de aprovechamiento del N por parte del cultivo según estrategias de fertilización previamente recomendadas. Asimismo, la contaminación ambiental que genera el proceso de lixiviación de nutrientes, la degradación del suelo y la afectación a la productividad del cultivo, en razón a una mayor compactación del suelo por el uso de labranzas convencionales y la renovación no constante, evidenciada en algunos contextos en los que los ingenios de producción netamente orgánica desean acumular un nivel de residuos en suelo que queda después de la cosecha, lo cual también es susceptible de evaluación a nivel de emisiones de GEI.

Finalmente, se propone tener en cuenta el conjunto de herramientas de agricultura específica por sitio (AEPS), las cuales permiten fertilizar el cultivo de manera diferenciada por medio de tasas variables de aplicación dentro de una hectárea de cultivo, en la cual los suelos del Valle del Cauca presentan gran variación. Esto a su vez puede reducir los costos de fertilización, dado que estos representan el 15 % de los costos totales de producción de la caña, así como aumentar la productividad de los cultivos en procura de un mayor beneficio ambiental, y con esto tener la oportunidad de participar en mercado sostenibles ambientalmente a nivel internacional.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), en el marco de su programa nacional de desarrollo tecnológico industrial y calidad, durante el periodo 2015-2016, con contrato # 588-2014. Cuenta con el apoyo de un ingenio azucarero ubicado en el departamento de Valle del Cauca y del grupo de investigación icubo, perteneciente al Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi.

## REFERENCIAS

- [1] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis. *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge y New York. 2007. Cambridge University Press.
- [2] U.S. Department of State, "Fifth Climate Action Report to the UN Framework Convention on Climate Change: Projected Greenhouse Gas Emissions", Washington D.C., USA, 2010.
- [3] A. Hirsch, A. Michalak, L. Bruhwiler, W. Peters, E. Dlugokencky, P. Tans, "Inverse modeling estimates of the global nitrous oxide surface flux from 1998–2001", *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 20, 2006. doi: 10.1029/2004GB002443
- [4] G. Vallejo, A. Ábalos, D. Téllez, Á. Guardia, "Fertilización y  $N_2O$ . Implicaciones en la huella de carbono", *Agric. Rev. Agropecu.*, vol. 697, pp. 666–672, 1990. doi: 0002-1334
- [5] C. A. L. González, "Aumento de la productividad de caña de azúcar por unidad de área cultivada", 2006.
- [6] M. J. Frissel, J. A. V. Veen, "A review of models of investigating the behavior of nitrogen in soil," *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.*, vol. 296, n.º 1082, pp. 341–349, enero 1982. doi: 10.1098/rstb.1982.0010
- [7] J. Garniere, B. Gilles, A. Cébron, "Modelling nitrogen transformations in the lower Sein and estuary (France): impact of wastewater release on oxygenation and  $N_2O$  emission," *Springer Sci. + Bus.*, vol. 588, pp. 291–302, 2007. doi: 10.1007/s10750-007-0670-1
- [8] B. Küstermann, O. Christen, K.-J. Hülsbergen, "Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site-and farm-specific nitrogen management", *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 135, no. 1-2, pp. 70-80, enero 2010.
- [9] A. López, L. M. Rodríguez, C. M. Lubo, F. A. Arenas, B. E. Sierra, "Evaluating carbon footprint behavior in the agriculture and energy sectors : a review", *Sist. Telemática*, vol. 12, pp. 35-53, 2014.

- [10] J. D. Sterman, *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston, MA: Irwin/McGr., 2000.
- [11] FAO, *Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management*. 2006.
- [12] W. Chesworth Ed., *Encyclopedia of soil science*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [13] FAO, *Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo*. Roma: FAO, 2015.
- [14] H. W. Fassbender, E. Bornemisza, "Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina," En *Colección de libros y materiales educativos N° 81*. IICA, San José, Costa Rica, 1987, p. 420.
- [15] A. Torres, C. Hohmann, C. Pray, E. C. Meng, R. Hu, X. Shi, *et al.*, "Manejo del cultivo en condiciones de caña verde", *Cenicaña*, p. 175, 2006.
- [16] M. Madigan, J. Martinko, J. Parker, *Biología de los microorganismos*. Madrid, España: Pearson Ed., 2006.
- [17] O. González, A. Guerra, "La huella de carbono del azúcar de Guatemala, Zafra 2013-2014", *Rev. Atagua*, pp. 4-10, 2015.
- [18] K. L. Weier, "Nitrogen use and losses in agriculture in subtropical Australia", *Fertil. Res.*, vol. 39, n.º 3, pp. 245-257, 1994.
- [19] R. Quintero, S. J. Yang, "Efecto del fraccionamiento y las épocas de aplicación del nitrógeno en la producción de la caña de azúcar en tres suelos del valle del río Cauca", *Cenicaña*, p. 22, 1987.
- [20] M. Melgar, A. Meneses, H. Orozco, O. Pérez, R. Espinosa. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala: Librerías Artemis Edinter S.A., 2012.
- [21] E. Romero, P. Digonzelli, J. Scandaliaris, *Manual del Cañero*. Tucumán, Argentina: EEAOC, 2009.
- [22] D.C. Cassalet, J.S. Torres, C.H. Isaacs. *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Cali, Colombia: Cenicaña, 1995.