

Huella de carbono  
Dinámica de sistemas  
Calidad

Claudia Marcela Lubo Cetina

Aura Patricia Jiménez Escobar

Lina Marcela Rodríguez Pérez

Andrés López Astudillo



**BITÁCORAS DE LA MAESTRÍA**

**HUELLA DE CARBONO  
DINÁMICA DE SISTEMAS  
CALIDAD**



**BITÁCORAS DE LA MAESTRÍA**

**HUELLA DE CARBONO  
DINÁMICA DE SISTEMAS  
CALIDAD**

*Claudia Marcela Lubo Cetina  
Lina Marcela Rodríguez Pérez  
Aura Patricia Jiménez Escobar  
Andrés López Astudillo*

*Editorial Universidad Icesi, 2019*

## **Huella de carbono – Dinámica de sistemas – Calidad**

© Claudia Marcela Lubo Cetina, Lina Marcela Rodríguez Pérez, Aura Patricia Jiménez Escobar, Andrés López Astudillo.

1 ed. Cali, Colombia. Universidad Icesi, 2019

202 p., 19x24 cm

Incluye referencias bibliográficas

ISBN: 978-958-5590-07-6 (PDF)

<https://doi.org/10.18046/EUI/bm.2.2019>

1. Carbon emissions 2. Agriculture 3. Supply chain management I.Tit  
629 – dc22

© Universidad Icesi, 2019

Facultad de Ingeniería

Colección: Bitácoras de la maestría, vol. 2

Rector: Francisco Piedrahita Plata

Decano Facultad de Ingeniería: Gonzalo Ulloa Villegas

Coordinador editorial: Adolfo A. Abadía



Producción y diseño: Claros Editores SAS.

Editor: José Ignacio Claros V.

Impresión: Carvajal Soluciones de Comunicación.

Impreso en Colombia / *Printed in Colombia*.

La publicación de este libro se aprobó luego de superar un proceso de evaluación doble ciego por dos pares expertos. El contenido de esta obra no compromete el pensamiento institucional de la Universidad Icesi ni le genera responsabilidades legales, civiles, penales o de cualquier otra índole, frente a terceros.



Calle 18 #122-135 (Pance), Cali-Colombia  
editorial@icesi.edu.co  
[www.icesi.edu.co/editorial](http://www.icesi.edu.co/editorial)  
Teléfono: +57(2) 555 2334

La serie Bitácoras de la Maestría es una publicación de la Universidad Icesi que tiene como objetivo mejorar la difusión de los trabajos de grado meritorios de sus estudiantes, exponiéndolos a un público más amplio, no necesariamente académico, que pueda aprovecharlos en su cotidianidad. Se trata de “mover” las tesis, desde los anaqueles de las bibliotecas, hacia las manos de los actores de la vida diaria y establecer un vínculo entre autores y potenciales usuarios. En cada volumen se incluyen tres trabajos con temática diversa. Por lo heterogéneo de su contenido, el nombre de cada volumen está compuesto por el nombre de la serie y el de los tres temas que incluye.

## **Claudia Marcela Lubo Cetina**

Ingeniera Industrial y Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi, con interés en proyectos de investigación, innovación y desarrollo relacionados con la gestión de recursos naturales y el desarrollo agrícola sostenible. Su tesis de maestría, realizada como miembro del grupo de investigación Icubo, se enfocó en la medición de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el cálculo de la huella de carbono generados en la preparación de suelos en un cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Posteriormente, continuó trabajando en el cálculo de la huella de carbono de los restantes procesos de campo, incluyendo la medición del flujo de GEI para un cultivo de caña de azúcar comercial, otro orgánico y un potrero de pastoreo. marcelubo@gmail.com

## **Lina Marcela Rodríguez Pérez**

Ingeniera Industrial y Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi, Cali. Profesional bilingüe con experiencia en las áreas de investigación de proyectos medioambientales, autoevaluación de programas académicos, auditorías internas sobre la Norma ISO 9001:2015 para la certificación del Sistema de Gestión de Calidad a nivel universitario. En investigación, desarrolló su tesis de maestría sobre modelación dinámica de la huella de carbono de los cultivos de caña de azúcar, siendo Joven Investigador de Colciencias, y miembro del grupo de investigación Icubo. Actualmente trabaja como Coordinadora de Autoevaluación de Proyectos en la Fundación Universitaria Autónoma de las Américas, Medellín. lmarcela.rodriguez1190@gmail.com

## **Aura Patricia Jiménez Escobar**

Ingeniera Industrial de la Universidad Autónoma de Occidente (Cali, Colombia) y Especialista en Gerencia de Logística y Magister en Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi (Cali), donde actualmente es profesora de la Facultad de Ingeniería. Sus mayores áreas de interés son: comercio exterior, logística y cadenas de suministro. Ha estado vinculada al sector empresarial y gremial durante más de quince años. [aura.jimenez1@correo.icesi.edu.co](mailto:aura.jimenez1@correo.icesi.edu.co)

## **Andrés López Astudillo**

Profesor de tiempo completo y Director de la Especialización en Logística de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Icesi. Candidato a Doctor en Dirección de Empresas (Universitat de València, España), Magister en Sociedad de la Información y el Conocimiento (Universitat Oberta de Catalunya, España) y MBA y Especialista en Gerencia de Mercadeo y Gerencia de Producción de Icesi. Sus mayores áreas de interés en investigación –desarrolladas como parte del equipo de investigadores del grupo Icubo–, son: sostenibilidad ambiental, con énfasis en la medición de la huella de carbono en agricultura; logística y cadenas de suministro. [alopez@icesi.edu.co](mailto:alopez@icesi.edu.co)



# Tabla de contenido

Presentación .....	23
Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar .....	25
Resumen .....	27
Introducción .....	28
Marco de referencia .....	29
Huella de carbono .....	29
Caña de azúcar y medio ambiente .....	31
Marco teórico .....	34
Emisiones del suelo .....	34
Emisiones por combustión .....	35
Método .....	36
Protocolo de muestreo de GEI emitidos por los tractores .....	40
Protocolo de muestreo de GEI emitidos por el suelo .....	41
Trabajo de campo .....	44
Medición de las emisiones en el aire .....	44
Medición de las emisiones del suelo .....	54
Discusión .....	69
Fuentes de emisión .....	69

Gea identificados y su participación en la huella de carbono .....	73
Análisis comparativo: huellas de carbono medida y calculada ...	83
Oportunidades de reducción .....	86
Conclusiones y recomendaciones .....	90
Referencias .....	93
<b>Modelación dinámica de la huella de carbono generada en las labores de preparación del suelo y levante de un cultivo de caña de azúcar .....</b>	<b>95</b>
Resumen .....	97
Introducción .....	98
Antecedentes .....	101
Marco teórico .....	103
Huella de carbono .....	103
Ciclo del nitrógeno y emisiones provenientes de suelos gestionados	105
Cálculo de emisiones según las directrices del IPCC .....	107
Teoría general de sistemas .....	108
Método .....	114
Resultados .....	117
Metodología para modelación de la huella de carbono .....	117
Modelación de emisiones por combustión fósil .....	118
Modelación de emisiones por fertilización .....	119
Oportunidades de mejora en el sector azucarero .....	121
Conclusiones y recomendaciones .....	125
Referencias .....	129
<b>Integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro: estudio de caso en un proceso de comercio exterior .....</b>	<b>133</b>
Resumen .....	135
Introducción .....	136

Contexto .....	138
Marco teórico .....	140
Gestión de calidad .....	140
Gestión de la cadena de suministro .....	142
Gestión de calidad en la cadena de suministro .....	143
Colaboración, visibilidad y gestión del conocimiento .....	146
Metodología .....	148
Interesados en el proceso de SCQM .....	159
Caracterización del proceso de comercio exterior .....	164
Importaciones (abastecimiento) .....	164
Exportaciones (distribución internacional) .....	165
Caracterización de la integración en SCQM .....	167
Gestión de calidad .....	167
Gestión en la cadena de suministro .....	176
Gestión de calidad en la cadena de suministro .....	179
Evaluación de las variables internas .....	181
Evaluación de las variables contextuales .....	187
Evaluación del impacto de la integración en la SCQM .....	191
Conclusiones y recomendaciones .....	194
Referencias .....	197



# Índice de Tablas

---

## CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

---

Tabla 1. Factores de emisión .....	39
Tabla 2. Potencial de calentamiento global en un horizonte de cien años .....	39
Tabla 3. Labores de preparación del suelo aplicadas a cada suerte .....	55
Tabla 4. Datos de toma de muestreo: suerte A .....	56
Tabla 5. Gases emitidos por cámara: suerte A .....	57
Tabla 6. Datos de muestreo: suerte B .....	61
Tabla 7. Emisión de gases por cámara: suerte B .....	62
Tabla 8. Datos de muestreo: suerte C .....	65
Tabla 9. Emisión de gases por cámara: suerte C .....	66
Tabla 10. Labores por tipo de preparación del suelo .....	70
Tabla 11. Emisiones de CO <sub>2</sub> por tipo de preparación de suelos .....	71
Tabla 12. Gases emitidos por la mineralización del suelo preparado / tipo de cultivo .....	73
Tabla 13. Huella de carbono por tipo de cultivo .....	74
Tabla 14. Emisiones medidas por gas .....	76
Tabla 15. Cálculo de emisiones de suelos gestionados .....	77
Tabla 16. Emisiones de CO <sub>2</sub> eq / labor de preparación de suelos .....	77

Tabla 17. Huella de carbono calculada por tipo de cultivo .....	78
Tabla 18. Intervalos de confianza .....	82
Tabla 19. Incertidumbre combinada de la huella experimental .....	83
Tabla 20. Huella de carbono (calculada vs medida) .....	84
Tabla 21. Huellas de carbono calculada y medida con detalle por labor ...	86

---

**MODELACIÓN DINÁMICA DE LA HUELLA DE CARBONO GENERADA EN LAS LABORES DE PREPARACIÓN DEL SUELO Y LEVANTE DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

---

Tabla 1. Simbología de los componentes de un diagrama de Forrester ..	112
---	-----

---

**INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DE CALIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO: ESTUDIO DE CASO EN UN PROCESO DE COMERCIO EXTERIOR**

---

Tabla 1. Equivalencia de niveles para la gestión de la calidad en la cadena de suministro .....	150
Tabla 2. Matriz de evaluación del nivel de madurez de la calidad de la QM	151
Tabla 3. Matriz de evaluación del nivel de madurez de la calidad de la SCM	152
Tabla 4. Matriz de evaluación del nivel de madurez de la calidad para la SCQM	153
Tabla 5. Matriz de evaluación del nivel de madurez de las variables internas .....	154
Tabla 6. Matriz de evaluación del nivel de madurez de las variables contextuales .....	155
Tabla 7. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el BPO	168
Tabla 8. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el BPO	168
Tabla 9. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el agente de aduanas .....	170
Tabla 10. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el agente de aduanas .....	170
Tabla 11. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la transportadora .....	171

Tabla 12. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la transportadora .....	171
Tabla 13. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el puerto .....	172
Tabla 14. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el puerto .....	173
Tabla 15. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la aduana .....	174
Tabla 16. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la aduana .....	174
Tabla 17. Percepción consolidada del nivel de madurez de la gestión de la calidad .....	175
Tabla 18. Resultados consolidados de la matriz de evaluación de la madurez de la calidad en la cadena de suministro .....	178
Tabla 19. Resultados de la matriz de evaluación de la madurez de la gestión de la calidad en la cadena de suministro .....	181
Tabla 20. Resultados de la matriz de evaluación de la madurez de la calidad de las variables internas .....	186
Tabla 21. Resultados de la matriz de evaluación de la madurez de la calidad de las variables contextuales .....	187



# Índice de Figuras

---

## CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

---

Figura 1. Resultados de las mediciones de la labor de descepada .....	44
Figura 2. Diagrama del recorrido de la labor de descepada .....	45
Figura 3. Resultados de las mediciones de la labor de subsolada .....	45
Figura 4. Diagrama del recorrido de la labor de subsolada .....	46
Figura 5. Resultados de las mediciones de la labor de cincelado .....	47
Figura 6. Recorrido de la labor de cincelado .....	47
Figura 7. Resultados de las mediciones de la labor de rastro-arado .....	48
Figura 8. Recorrido de la labor de rastro-arado .....	48
Figura 9. Resultados de las mediciones de la labor de rastrillada .....	49
Figura 10. Recorrido de la labor de rastrillada .....	49
Figura 11. Resultados de las mediciones de la labor de surcado .....	50
Figura 12. Recorrido de la labor de surcado .....	51
Figura 13. Resultados de las mediciones de la labor de encalle de residuos	51
Figura 14. Recorrido de la labor de encalle de residuos .....	52
Figura 15. Resultados de las mediciones de la labor de cultivo-aporque ....	53
Figura 16. Recorrido de la labor de cultivo-aporque .....	53

Figura 17. Resultados de las mediciones de la labor de aplicación de abonos	54
Figura 18. Recorrido de la labor de aplicación de abonos .....	54
Figura 19. Estado inicial de la suerte A .....	56
Figura 20. Cámara utilizada en las mediciones .....	56
Figura 21. Emisiones de $CO_2$ eq por cámara por tiempo de muestreo .....	58
Figura 22. Emisiones de $CH_4$ por cámara por tiempo de muestreo .....	59
Figura 23. Emisiones de $CO_2$ por cámara por tiempo de muestreo .....	59
Figura 24. Emisiones de $N_2O$ por cámara por tiempo de muestreo .....	59
Figura 25. Emisiones de $CO_2$ eq por cámara por tiempo de muestreo .....	63
Figura 26. Emisiones de $CH_4$ por cámara por tiempo de muestreo .....	63
Figura 27. Emisiones de $N_2O$ por cámara por tiempo de muestreo .....	64
Figura 28. $CO_2$ por cámara por tiempo de muestreo .....	64
Figura 29. Emisiones de $CO_2$ eq por cámara por tiempo de muestreo .....	67
Figura 30. Emisiones de $CH_4$ por cámara por tiempo de muestreo .....	67
Figura 31. Emisiones de $N_2O$ por cámara por tiempo de muestreo .....	68
Figura 32. Emisiones de $CO_2$ por cámara por tiempo de muestreo .....	68
Figura 33. Emisiones de $CO_2$ calculadas / tipo de preparación .....	72
Figura 34. Emisiones de $CO_2$ medidas / tipo de preparación .....	72
Figura 35. Soca de manejo comercial .....	75
Figura 36. Soca de manejo limpio .....	75
Figura 37. Plantilla de manejo limpio .....	75
Figura 38. Huella de carbono calculada para una soca de manejo comercial .	79
Figura 39. Huella de carbono calculada para una soca de manejo limpio ...	79
Figura 40. Huella de carbono calculada para una plantilla de manejo limpio	79

---

**MODELACIÓN DINÁMICA DE LA HUELLA DE CARBONO GENERADA EN LAS LABORES  
DE PREPARACIÓN DEL SUELO Y LEVANTE DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

---

Figura 1. Diagrama causal del problema local - caso de estudio	100
Figura 2. Ciclo del nitrógeno y emisiones de GEI provenientes de los suelos gestionados	106
Figura 3. Plantilla del arquetipo soluciones contraproducentes	110
Figura 4. Plantilla del arquetipo de desplazamiento de carga	110
Figura 5. Plantilla del arquetipo límites del crecimiento	111
Figura 6. Plantilla del arquetipo tragedia del terreno común	111
Figura 7. Estructura general de una cadena de envejecimiento	113
Figura 8. Proceso de modelación dinámica	115

---

**INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DE CALIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO: ESTUDIO  
DE CASO EN UN PROCESO DE COMERCIO EXTERIOR**

---

Figura 1. Evolución de la gestión de calidad	141
Figura 2. Evolución de la gestión de la cadena de suministro	142
Figura 3. Integración de la gestión de calidad y la gestión de la cadena de suministro	144
Figura 4. Pilares de investigación	149
Figura 5. Desarrollo del modelo conceptual	158
Figura 6. Cadena de suministro para el comercio exterior	176
Figura 7. Conexión entre los participantes del proceso de comercio exterior	183
Figura 8. Sistemas de información vinculados en el proceso de comercio exterior	184



# Acrónimos

---

## **CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

---

AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use
CEPAL	Comisión Económica Para América Latina y el Caribe
CIAT	Centro de Investigación en Agricultura Tropical
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ONU	Organización de las Naciones Unidas
TLC	Tratados de Libre Comercio

---

## **MODELACIÓN DINÁMICA DE LA HUELLA DE CARBONO GENERADA EN LAS LABORES DE PREPARACIÓN DEL SUELO Y LEVANTE DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR**

---

Accefyn	Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
AEPS	Agricultura Específica Por Sitio
Cenicaña	Centro de investigaciones de la caña de azúcar de Colombia
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GRT	Guía de Recomendaciones Técnicas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientalesha
IPCC	International Panel for Climate Change
ITC	International Treading Center
MDL	Mecanismos de Desarrollo Limpio
UNFCCC	Panel de Convención sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas

---

**INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DE CALIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO: ESTUDIO  
DE CASO EN UN PROCESO DE COMERCIO EXTERIOR**

---

BASC	Business Alliance for Secure Commerce
CPFR	Collaborative Planning Forecasting and Replenishment
DEX	Documento de Exportación
DIAN	Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales
ECR	Efficient Consumer Response
EDI	Electronic Data Interchange
ERP	Enterprise Resource Planning
GIRO	Gestión Integral de Riesgos
IPT	Índice de Precios al Transportador
ISO	International Standardization Organization
ISPS	International Ship and Port Security
MBO	Management By Objectives
MUISCA	Modelo Único de Ingreso, Servicio y Control Automatizado.
NEED	Nuevo Esquema de Empresa Certificada
OEA	Operador Económico Autorizado
POS	Point Of Sale
PVP	Programa de Verificación a Proveedores
QCC	Quality Control Circles
QM	Quality Management
RR.HH	Recursos Humanos
RFID	Radio Frequency Identification
SCM	Supplies Chain Management
SCOR	Supply Chain Operations Reference
SCQM	Supply Chain Quality Management
SGMM	Smart Grid Maturity Model
SISE	Sistema Integrado de Seguridad Electrónica
SOP	Standard Operation Process
SYGA	Sistema de Información y Gestión Aduanera
TI	Tecnología e Información
TPM	Total Productive Maintenance
VUCE	Ventanilla Única de Comercio Exterior

# Presentación

La huella de carbono es un poderoso indicador ambiental que permite determinar el total de Gases de Efecto Invernadero [GEI] emitidos a la atmósfera por una actividad realizada por el hombre. Su resultado, para ser comparable, se expresa en cantidades equivalentes de dióxido de carbono.

Este volumen abre con una investigación realizada en ese sentido en una empresa agroindustrial dedicada al cultivo y procesamiento de la caña de azúcar, uno de los sectores más prósperos de la economía colombiana, específicamente en un proceso, la preparación del suelo para la siembra. El cálculo se realizó de dos maneras, una experimental –midiendo físicamente las emisiones de dióxido de carbono, óxido nitroso y metano generadas por el suelo, y las emisiones de dióxido de carbono generadas por los tractores empleados en su preparación–, y teórica –a partir de las ecuaciones, los factores de emisión genéricos que recomienda el Grupo Intergubernamental de expertos sobre cambio climático [IPCC] y el factor oficial de emisión de dióxido de carbono para el diesel colombiano establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética. Además de la validación de métodos que supone la comparación, sus resultados concretos –por ejemplo, que la mayoría de las emisiones no son el resultado de la quema de combustible, sino de las prácticas de fertilización–, son una herramienta importante para la toma de decisiones que apunten a una mayor sostenibilidad ambiental de la operación.

El segundo capítulo aborda una temática complementaria, la investigación se realiza en el mismo sector, pero con el propósito de dar a conocer una visión sistémica del comportamiento de la huella de carbono generada durante las labores de campo. Por medio del análisis de sensibilidad se proponen cuatro escenarios de simulación, modificando la fracción de conversión de

## Presentación

área comercial hacia orgánica, con diferentes tipos de preparación de suelo (convencionales y livianos), con fraccionamiento en dos aplicaciones, a treinta y sesenta días de germinación de la planta, de la dosis de agroquímicos utilizados para el levante del cultivo y modificando esas dosis, con otras recomendadas según las características del suelo y el ciclo de cosecha, todo esto con el fin de obtener propuestas de reducción de emisiones de GEI, que faciliten la toma de decisiones de la gerencia a este respecto.

El volumen cierra con la presentación de los resultados de una investigación enfocada en la integración de la gestión de la calidad [QM] y la gestión de la cadena de suministros [SCM] en la gestión de la calidad de la cadena de suministro [SCQM] un concepto que contribuye a la competitividad empresarial desde las variables de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento en los procesos, en este caso, de comercio exterior, considerando a la empresa –exportadora / importadora– y algunos agentes de su cadena de suministro –en este caso, su aliado BPO, el agente de aduanas, la aduana, el puerto y la empresa de transporte terrestre–. La investigación se desarrollo a través del método de casos aplicado a una empresa vallecaucana, grande, tradicional, consolidada, con presencia y operaciones en el exterior. Durante la investigación se construyeron herramientas para el análisis del nivel de madurez de la calidad, desde varias perspectivas, considerando los dominios: estrategia, controles, procesos, tecnología y recursos humanos. Esta investigación, aunque tiene una obvia limitante de extrapolación de sus resultados derivada del método, representa un buen primer paso para futuras investigaciones que puedan usar los instrumentos desarrollados, y las lecciones aprendidas, para una lectura más comprensiva.

José Ignacio Claros V.  
Editor

# CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Claudia Marcela Lubo Cetina, MSc.

Andrés López Astudillo, Ph.D

## **Citación**

Lubo, C. M. & López, A. (2019). Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar. En J. I. Claros (Ed.), *Bitácoras de la maestría: vol. 2. Huella de carbono – Dinámica de sistemas – Calidad* (pp. 25-94). Universidad Icesi.



---

## RESUMEN

---

La agricultura es una actividad humana que tiene un claro efecto en la producción de gases de efecto invernadero. La caña de azúcar, el cultivo base de una de las agroindustrias más prosperas de Colombia, no es ajena a esta realidad. La huella de carbono es un indicador que permite determinar el total de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera durante un ciclo productivo –desde la adquisición de las materias primas, hasta la eliminación de sus desechos–, cuyo resultado se expresa en cantidades equivalentes de dióxido de carbono. Este proyecto se desarrolló con el fin de contribuir al cálculo de la huella de carbono generada en la producción agroindustrial del Valle del Cauca, específicamente determinando aquella que se genera en los procesos de preparación del suelo para el cultivo de caña de azúcar. Este cálculo se realizó de dos maneras: experimental, midiendo las emisiones de dióxido de carbono, óxido nítrico y metano generadas por el suelo, y las emisiones de dióxido de carbono generadas por los tractores empleados en su preparación; y teórica, realizando cálculos a partir de las ecuaciones y los factores de emisión genéricos que recomiendan los expertos del Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], y el factor oficial de emisión de dióxido de carbono para el diesel colombiano establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. Una de las conclusiones de esta investigación es que el impacto más significativo en la emisión de gases de efecto invernadero producidos en la preparación del suelo no proviene del uso de tractores, sino de las prácticas de fertilización, algo que, revisando el detalle de las cifras, resulta un recurso importante para la toma de decisiones para una producción más limpia.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático, las regulaciones nacionales e internacionales y las pérdidas económicas ocasionadas como consecuencia del mismo han creado, en Colombia y en el mundo, la necesidad de medir la emisión de Gases de Efecto Invernadero [GEI] en los procesos productivos de las empresas y desarrollar estrategias para reducir emisiones y mitigar las consecuencias de las que no se pueden eliminar. Los aumentos de la concentración mundial de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se deben principalmente a la utilización de combustible fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra (GHG, 2012). Es muy probable que el aumento en la concentración de metano ( $CH_4$ ) se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil, y que el aumento en las concentraciones de óxido nitroso ( $N_2O$ ) proceda principalmente de los fertilizantes nitrogenados empleados en la agricultura. La agricultura es además un agente indirecto de emisión de GEI por su responsabilidad en la conversión de bosque en área cultivable.

La huella de carbono es un indicador que permite determinar la cantidad total de GEI emitidos a la atmósfera, medidos en  $CO_2$  equivalente ( $CO_2eq$ ), producto de la realización de actividades como el transporte, la minería, la agricultura y la producción de bienes. Su cálculo considera el total de emisiones de cada una de las etapas del ciclo productivo, desde la adquisición de materias primas, hasta la eliminación de sus desechos.

Dado que el cambio climático es una problemática global, vale la pena resaltar la posición de Tudela (2005, p. ) quien asevera que es

... mediante la medición, el control y la eventual reducción de sus emisiones, que los agentes económicos pueden mejorar las condiciones ambientales locales y su competitividad a escala nacional y global, a la vez que contribuyen a la resolución de un grave problema global. En efecto, reducir emisiones de GEI conlleva beneficios como: la limitación de las emisiones tóxicas; las mejoras en la salud; los ahorros, en dinero, por una mayor eficiencia energética o por la introducción de nuevos procesos; la promoción de fuentes renovables de energía; la identificación de oportunidades para participar en mercados de carbono; y, en general, el mejoramiento de la posición estratégica para el desarrollo sustentable de la propia empresa y del país.

Este proyecto se desarrolló con el fin de contribuir al cálculo de la huella de carbono generada en la producción agroindustrial del Valle del Cauca – específicamente de la generada en la preparación del suelo para el cultivo de caña de azúcar e identificar los GEI que en mayor medida contribuyen con el crecimiento de dicha huella. Para lograrlo se fijaron, como objetivos específicos: identificar las fuentes de emisión de GEI en dichos procesos; medir los GEI generados a partir de la ejecución de las actividades de encalle de residuos, cultivo, descepada, subsolada, rastro arado, rastrillada y surcada desarrolladas en los procesos de preparación de suelo; determinar la participación de cada uno de los tipos de GEI en la huella de carbono; contrastar las huellas de carbono obtenidas mediante la medición de las emisiones frente al cálculo teórico de sus emisiones; e identificar oportunidades de reducción de las emisiones de GEI.

El cálculo de la huella de carbono se desarrolló de forma experimental y teórica. El cálculo experimental se llevó a cabo por medio de la medición de las emisiones de  $CO_2$ ,  $N_2O$  y  $CH_4$  generadas por el suelo, y de las emisiones de  $CO_2$  generadas por los tractores empleados en el desarrollo de cada una de las labores involucradas en dicho proceso, para una hectárea de cultivo. Para el cálculo teórico se empleó el factor de emisión para el diesel colombiano de la Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] (Accefyn. 2003), y las ecuaciones y factores de emisión genéricos propuestos por los expertos del Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (Waldron et al., 2006).

Este proyecto representa la primera práctica de medición de las emisiones de GEI generadas por el suelo de un cultivo de caña de azúcar del Valle del Cauca, y hace parte de un proyecto de investigación marco, que busca medir el flujo de las emisiones generadas por el proceso de mineralización de suelo durante un periodo de cultivo completo, caracterizando las fases de preparación de suelo, fertilización, control de maleza, riego y maduración, para generar una herramienta de medición de la huella de carbono para el sector azucarero, que permita definir estrategias de reducción y mitigación de dicha huella.

## MARCO DE REFERENCIA

### HUELLA DE CARBONO

El cálculo de la huella de carbono ha sido aplicado en diferentes ámbitos, como una herramienta para monitorear el estado actual de las emisiones de GEI y

como punto de partida para crear estrategias que permitan mitigar y reducir el impacto generado por este tipo de emisiones.

Larsen y Hertwich (2009) utilizaron las compras municipales de las ciudades noruegas asignándoles intensidades de emisión de acuerdo con el tipo de energía utilizada en su producción, como si se tratara de un producto o un servicio, para calcular la huella de carbono del país y así implementar políticas orientadas a reducirla. Viglizzo et al., (2011) utilizaron este indicador para evaluar el impacto de la expansión agrícola en la Argentina entre 1960 y 2005, considerando prácticas agrícolas –como la labranza y el empleo de fertilizantes, y encontraron que en la última década de estudio, los agricultores desarrollaron la capacidad de producir bajo esquemas de relativamente baja adición de compuestos y bajo impacto ambiental, mostrando así la utilidad de medir y monitorear las emisiones de GEI. De Figueiredo et al. (2010) desarrollaron el cálculo de la huella de carbono para los procesos de siembra, cosecha y producción de azúcar en Brasil, bajo la metodología del IPCC 2006 (Waldron et al., 2006), y encontraron que ella genera 2,41 toneladas de  $CO_2eq$  ha<sup>-1</sup> de cultivo, considerando sólo los límites de la empresa. En el este de Tailandia, Yuttitham et al. (2011) desarrollaron el cálculo de la huella de carbono del cultivo y procesamiento de la caña de azúcar, utilizando la metodología PAS 2050, bajo el esquema de la cuna a la puerta, y obtuvieron que la emisión total de una plantación de caña de azúcar, considerando el uso de combustible fósil y el uso y producción de los fertilizantes, herbicidas e insecticidas, fue de 2,84 Ton $CO_2eq$  ha<sup>-1</sup>, y que la mayor contribución a las emisiones estuvo relacionado con el uso de fertilizantes.

Van Rikxoort (2011), por su parte, utilizó el modelo de *Cool Farm Tool* para cuantificar las emisiones de GEI de cuatro sistemas de producción de café con respecto al carbono almacenado y la huella de carbono, y presentó un ejemplo y una guía de los aspectos clave que se debe tener en cuenta al momento de definir la metodología de toma de muestras, ejecución de las mediciones y manejo de los datos obtenidos.

En el campo específico de la huella de carbono generada por los procesos de preparación de suelo de un cultivo de caña de azúcar, Rojas y Concha (2011) desarrollaron un experimento para el cálculo teórico de emisiones de  $CO_2$  generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar. El cálculo de las emisiones generadas por dichos tipos de preparación de suelos se desarrolló con base en el consumo de combustible de los tractores

empleados en la ejecución de las labores de cada tipo de preparación, teniendo en cuenta la composición del combustible colombiano y las emisiones esperadas según el porcentaje de cada elemento contenido en su composición, bajo el supuesto de que el combustible se quema completamente. Su trabajo representó un punto de partida para el desarrollo de nuestro proyecto, el cual, con mediciones en campo, busca contrastar los resultados obtenidos en el cálculo teórico y considerar también las emisiones generadas en el proceso de mineralización natural del suelo. Rojas y Concha encontraron que al preparar 0,5 Ha. de suelo en una hacienda, se genera una disminución de 64.8 % de las emisiones de  $CO_2$ , por la utilización de labranza reducida en lugar de labranza liviana 1. Al comparar la labranza reducida con la labranza liviana 2 y la labranza liviana 3, las reducciones fueron, respectivamente, de 61,9 % y 51,08 %, con lo que concluyeron que la utilización de labores de preparación reducida disminuye el consumo de combustible y, en consecuencia, la emisión de los GEI generados por la combustión, manteniendo o aumentando la calidad de dichas labores y obteniendo un beneficio económico en el costo de ejecución de las labores.

Con la inclusión del muestreo para determinar la emisión de GEI por medio de cromatografía de gases y la medición directa de las emisiones generadas por los tractores empleados en la ejecución de las labores de preparación de suelo, se busca ampliar el espectro de las investigaciones desarrolladas hasta el momento, permitiendo la exploración en el comportamiento de los GEI y la identificación de aquellos con mayor contribución a la huella de carbono generada en el desarrollo de los procesos de campo, específicamente en la preparación de suelos del ingenio objeto de estudio.

## **CAÑA DE AZÚCAR Y MEDIO AMBIENTE**

De acuerdo con Goldemberg (2009), a fines del siglo XXI la biomasa representará entre el 10 y el 20 % de la energía utilizada por la humanidad. Teniendo en cuenta que de todas las opciones disponibles, el etanol de caña de azúcar tiene el mejor desempeño energético, se estima que el crecimiento de la demanda de biomasa impactará directamente la demanda de caña de azúcar.

En Colombia, donde el sector se ha concentrado en el valle geográfico del río Cauca, la expectativa de crecimiento de la demanda de caña de azúcar es alta. Por una parte el mercado externo se ha ampliado (y seguirá haciéndolo) gracias a la entrada en vigencia de los Tratados de Libre Comercio [TLC] que ha suscrito el país con Estados Unidos, Canadá, Chile, la Unión Europea,

Corea y Japón, los cuales implican, no solo la venta de importantes cantidades de azúcar, adicionales, sino también la participación del país en el mercado internacional de biocombustibles. A nivel interno, se prevé que la demanda de etanol aumente como resultado de la decisión del país de aumentar en un 2.5% anual, durante veinte años, la participación del bioetanol en la mezcla de combustibles para uso vehicular.

El proceso de preparación de suelo para el cultivo de caña de azúcar varía dependiendo del ciclo de cultivo en el que se encuentra la semilla. Cuando el cultivo es nuevo y no ha recibido ningún corte, se denomina plantilla y puede recibir entre cinco y diez cortes antes de ser renovada; cuando la plantilla recibe su primer corte, se denomina soca y recibe un tratamiento de preparación de suelo diferente para el levante, ya que cuenta con un sistema radicular desarrollado y en completa capacidad de funcionamiento. Para el tratamiento de las plantillas se desarrollan seis labores agrícolas: descepada, subsolada, derrastroarado, rastro arado, rastrillado y surcado, las cuales, dependiendo del orden y de la intensidad con que se apliquen, conforman seis tipos diferentes de preparaciones de suelo (Rojas & Concha, 2011). El tratamiento de las socas, por su parte, involucra actividades como encalle de residuos, subsolado, cultivo y aporque que tienen como finalidad acondicionar los campos después de soportar el tráfico intenso de la maquinaria agrícola empleada en la cosecha. De acuerdo con Porras (1995), la secuencia cronológica de estas labores comprende: quema y encalle de residuos; subsolado; cultivo; aporque; mantenimiento de acequias; y resiembra (si el lector no está familiarizado con el cultivo de caña de azúcar, para un mejor entendimiento de la manera en que se desarrollan las labores de preparación del suelo, se recomienda revisar la sección 6.1 en Lubo (2014).

La aplicación secuencial de dichas labores, según el tipo de preparación de suelo, se desarrolla mediante el empleo de tractores que generan emisiones a partir de los proceso de combustión del diesel que los mueve. Además, la preparación estimula en el suelo un proceso de mineralización diferente al de las tierras no preparadas.

Con la preparación de suelos se busca: la destrucción de malezas y residuos de cultivos anteriores; el aumento en la disponibilidad de la capacidad de infiltración y retención de agua en el suelo; un mayor intercambio de aire entre el suelo y la atmosfera; la penetración de las raíces; el aumento de la disponibilidad de nutrimentos y de la actividad microbiana del suelo; y la

destrucción de capas compactadas resultantes de la deficiente preparación de los suelos y del tráfico de la maquinaria. Las labores para la preparación de suelo son: descepada, subsolado, arada, rastrillada y surcada, las cuales, junto con la aplicación de materia orgánica –vinaza, compost y lodos–, y el encalle de residuos, disponen el suelo para responder a las necesidades nutritivas de la caña de azúcar.

Después de la surcada, el suelo está listo para recibir la semilla; la siembra, se hace con la variedad que mejor se adapta a la zona agroecológica, depositando trozos de tallo de 60 cm de largo, cada uno con dos a tres yemas sanas, que darán origen a las nuevas plantas. Se depositan de 7 a 8 ton de semilla por hectárea sembrada. Luego se tapa manual o mecánicamente con una capa de suelo de 5 centímetros de espesor y se aplica el riego de germinación, bien sea por surcos o por aspersión. Los trozos de caña provienen de semilleros donde se les ha dado un manejo especial, buscando variedades puras y sanas. Una vez establecido el cultivo, se hacen riegos de levante, aproximadamente cada 30 días. El manejo de las malezas en cañas convencionales se realiza químicamente dos veces, a los 30 y 60 días aproximadamente en plantillas, y una vez más, a los 45 días en socas.

Teniendo en cuenta todo el proceso de transformación que sufre el suelo como consecuencia de las actividades de su preparación, es posible identificar dos fuentes de emisión de GEI: la mineralización del suelo gestionado con procesos de labranza y aplicación de materia orgánica, y la combustión realizada por la maquinaria empleada en el manejo de los suelos.

Actualmente existe un cálculo teórico de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) estimadas a partir del combustible consumido durante la ejecución de las labores de preparación de suelo, involucradas en cada uno de seis tipos de preparación para el cultivo de la caña de azúcar, sin embargo, se desconoce la cercanía de las emisiones estimadas a las emisiones reales, medidas durante la ejecución de las labores, así como las emisiones generadas como consecuencia del proceso de mineralización que sufre el suelo preparado para el cultivo, un vacío que justifica la realización de este proyecto de investigación, que no solo busca estimar y medir las emisiones generadas a partir de la ejecución de las labores de preparación de suelo, sino también contrastar el efecto de las distintas formas de preparación de suelo y hacer una aproximación al porcentaje de emisiones que corresponde a cada uno de los gases estudiados:  $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$ .

## MARCO TEÓRICO

Los GEI son gases de la atmósfera, de origen natural o antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la tierra, la atmósfera y las nubes, propiedad que genera el efecto invernadero (Benavides & León, 2007). El cambio climático, por su parte, es una consecuencia del efecto invernadero causado por la acumulación de gases en la atmósfera. Dichos gases absorben la radiación que emite la tierra y atrapan el calor, impidiendo que la energía se traslade al espacio, lo que incrementa la temperatura terrestre (Frohmann et al., 2012).

La Comisión Económica Para América Latina y el Caribe [CEPAL] define la huella de carbono como un indicador de la cantidad de GEI generados y emitidos por una empresa o durante el ciclo de vida de un producto a lo largo de la cadena productiva, a veces incluyendo también su consumo, recuperación al final del ciclo y su eliminación (Frohmann et al., 2012). Por lo general y a partir de los acuerdos firmados en tratados internacionales como el protocolo de Kyoto (ONU, 1997), los gases considerados en dicho indicador son: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos (*HFC*), perfluorocarbonos (*PFC*) y hexafluoruro de azufre (*SF<sub>6</sub>*).

### EMISIONES DEL SUELO

La materia orgánica del suelo depende del aporte de material orgánico que se haga al mismo, así como de la velocidad con la que dicho material se descompone. Según investigaciones citadas por Madero et al., (2010), el contenido de materia orgánica del suelo depende del clima, la vegetación, el relieve, el material parental y el tiempo; se puede clasificar en dos grupos: los restos orgánicos y las sustancias húmicas, los restos orgánicos son aquellos provenientes de plantas, animales y microorganismos, los cuales se descomponen por efecto de la mineralización y como consecuencia de la respiración de los microorganismos del suelo, producen *CO<sub>2</sub>*; las sustancias húmicas son transformaciones, no mediadas por la vida, de los restos vegetales y animales generados por los restos orgánicos, la cual, a medida que avanza produce una disminución continua de la relación C/N.

El proceso microbiano por medio del cual el nitrógeno del suelo es convertido de forma orgánica a formas inorgánicas se denomina mineralización y

generalmente ocurre de forma concurrente con la conversión de nitrógeno inorgánico a orgánico, proceso que se denomina inmovilización. Una alta concentración de carbono de fácil disponibilidad para los microorganismos determina una tasa de inmovilización mayor que de mineralización, lo que se traduce en una menor disponibilidad de nitrógeno para las plantas. La transformación del nitrógeno amoniacal ( $NH_4^+$ ) a nitrito ( $NO_2^-$ ) y luego a nitrato ( $NO_3^-$ ), se denomina nitrificación, en términos químicos es un proceso de oxidación, el cual es llevado a cabo, típicamente, por bacterias aeróbicas autotróficas que utilizan el sustrato nitrogenado sobre el que actúan como fuente de energía y toman  $CO_2$  como fuente de carbono (Madero et al., 2010).

De forma paralela al proceso de nitrificación, se desarrolla también un proceso de desnitrificación, proceso microbiano por el cual el nitrógeno, en forma de nitrato, es reducido a formas gaseosas, principalmente óxido nítrico ( $NO$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) y eventualmente nitrógeno elemental ( $N_2$ ). Este proceso remueve del suelo dos formas químicas del nitrógeno que directa o indirectamente estarían disponibles para las plantas, pasándolas a la atmósfera, por esta razón puede considerarse como uno de los principales factores determinantes de la baja eficiencia de los fertilizantes nitrogenados aplicados al suelo, pues dependiendo de las prácticas de manejo, las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación pueden llegar a representar el 70% del fertilizante nitrogenado aplicado (Madero et al., 2010).

La mineralización de los suelos gestionados es un proceso natural que juega un papel importante en el ciclo del nitrógeno dado que convierte el amoníaco a su forma más oxidada, lo que facilita su asimilación en la planta (Salazar-Sosa et al. (2003), pero en esta secuencia de reacción se genera óxido nitroso, el cual se fuga de las células microbianas al suelo y posteriormente a la atmósfera (Waltron et al., 2006). De acuerdo con los cálculos de Yuttitham et al., (2011), en promedio las emisiones directas relacionadas con el uso de fertilizantes son del orden de: 426.3  $kgCO_2eq/ha$ , de las cuales el 98.31% corresponde a emisiones generadas por el uso de fertilizantes sintéticos.

## EMISIONES POR COMBUSTIÓN

Los tractores utilizados en actividades agrícolas cuentan con motores de 108 a 220 caballos de fuerza que alcanzan su máxima potencia a 1800 y 2250 rpm, con 2.5 gl/h y 13gl/h de consumo de diesel, dependiendo del tipo de suelo y de la actividad que se esté desarrollando. Según por Arapatsakos y Gemtos (2008)

la calidad del combustible afecta fuertemente las emisiones del motor, pues de él dependen los hidrocarburos no quemados (*HC*), el monóxido de carbono (*CO*) y el material particulado emitido. Arapatsakos y Gemtos (2008) midieron las emisiones de un tractor con motor a 4 cilindros, mientras araba un campo de maíz, que alcanzó su máxima potencia (aproximadamente 60 hp) a 2800 rpm, emitió 1.188,65 ppm *CO*/s, 68,78 ppm *HC*/s y 139,28 ppm *NO*<sub>2</sub>/s, resultados que dan una idea del nivel de emisión de GEI que corresponde al empleo de tractores en los procesos de labranza. Sin embargo, los autores no hacen referencia a la cantidad de *CO*<sub>2</sub> emitida.

## MÉTODO

Este es un proyecto de tipo exploratorio que busca medir las emisiones provenientes de la mineralización del suelo y de las fuentes de combustión móviles generadas en el proceso de preparación de una hectárea de suelo para un cultivo de caña de azúcar de un ingenio azucarero del Valle del Cauca. Las actividades de medición están sujetas a la programación del ingenio y sólo involucran las actividades desarrolladas al interior de una hectárea de suelo. Teniendo en cuenta que estas labores se desarrollan a través de contratistas, cabe mencionar que no se tienen en cuenta las emisiones generadas como consecuencia del desplazamiento de los tractores de una suerte a otra.

En el desarrollo metodológico del proyecto, se buscó plantear cómo medir de forma indirecta las emisiones de *CO*<sub>2</sub> que son consecuencia del uso de tractores en el proceso de preparación de suelos y las emisiones que genera el suelo como consecuencia de su proceso de mineralización. Para las emisiones generadas por los tractores se empleó un equipo *CO*<sub>2</sub> Meter GCH-2018 marca Luthron, que mide la presencia de *CO*<sub>2</sub> en el aire en partes por millón (ppm); para analizar el comportamiento de la concentración de *CO*<sub>2</sub> en el aire y así estimar y contrastar la huella de carbono generada por el uso de tractores en las labores de preparación se considera la humedad y la temperatura del ambiente; para la medición de las emisiones generadas por el suelo, se emplea la técnica de la cámara cerrada, utilizando una metodología desarrollada por el laboratorio de suelos del Centro de Investigación en Agricultura Tropical [CIAT], por medio de la cual se extrae una muestra de gas y se registra la temperatura y el tiempo transcurridos entre una toma y otra, para así poder determinar el flujo de gas proveniente del suelo.

Las muestras fueron analizadas por el laboratorio de suelos del CIAT, empleando cromatografía de gases, técnica que permite caracterizar las emisiones del suelo posteriores al proceso de preparación, de forma que sea posible estimar la huella de carbono generada por el suelo, como consecuencia de dichos procesos.

En el proceso de mineralización de suelo tienen incidencia factores que varían permanentemente y son difíciles de controlar, tales como: el clima y el tipo de suelo sus necesidades de fertilización, por lo tanto, las mediciones desarrolladas no son extensivas a todas las hectáreas de suelo preparadas y sólo reflejan el comportamiento en un momento específico, bajo condiciones específicas, de determinado espacio de suelo.

Con las mediciones se busca estimar la huella de carbono de los procesos de preparación de suelo y hacer una aproximación al porcentaje de emisiones generadas como consecuencia de la mineralización del suelo y la combustión móvil de los tractores empleados. Para el cálculo de la huella de carbono, en el estudio se han incluido los siguientes GEI:  $CH_4$ ,  $N_2O$  y  $CO_2$ , que son los gases comúnmente generados en estos procesos (una lista de los tipos de vehículo empleado en cada tipo de preparación, su consumo promedio de combustible y las emisiones que están asociadas a la labor de preparación puede ser consultada en Lubo, 2014).

A partir de esta información, en este proyecto se plantea una metodología exploratoria de medición indirecta en campo que busca contrastar el comportamiento de las emisiones de  $CO_2$  con relación al valor calculado de las emisiones generadas por los tractores, utilizando los factores de emisión de la UPME para el combustible colombiano (Accefyn, 2003) y la metodología de cálculo planteada por el IPCC para las emisiones generadas por los procesos de combustión móvil (Waldron et al., 2006).

Para obtener los datos de actividad del proceso de combustión de las fuentes móviles, se planteó un protocolo de medición indirecta en campo de las emisiones generadas por los tractores durante el desarrollo de cada una de las labores de preparación de suelo, para una hectárea de cultivo, considerando la temperatura, la humedad relativa y dos momentos de muestreo: cuando el tractor está lo más cerca posible a la sonda de medición y cuando está en el punto más lejano de la misma, en 15 puntos específicos, durante un pase o recorrido completo de la hectárea preparada.

Para el cálculo de la huella de carbono por combustión móvil se empleó la ecuación 3.3.1 de las recomendaciones del IPCC (Waldron et al., 2006), según la cual las emisiones son iguales a la sumatoria del combustible consumido multiplicada por el factor de emisión de dicho combustible. En el caso particular de este proyecto, se contabilizó la cantidad de combustible diesel consumido por cada tractor en el desarrollo de cada labor de preparación y se multiplicó dicha cantidad por el factor de emisión para el diesel colombiano, definido por la UPME (ECUACIÓN 1).

$$Emisiones = \sum_j (Combustible_j \times EF_j) \quad (1)$$

Para estimar las emisiones por mineralización de suelos gestionados, se empleó la ecuación 11.3 de las directrices del IPCC (Waldron et al., 2006), definida para la estimación de la emisión de nitrógeno a partir de la aplicación de fertilizantes nitrogenados orgánicos o minerales. Para aplicarla se determinó la cantidad de nitrógeno contenido en cada fertilizante aplicado y se multiplicó por el factor de emisión definido para tal fin, por el IPCC, como se presenta en la ECUACIÓN 2, donde: FON es la cantidad total de fertilizante de N orgánico aplicado al suelo. Kg N año-1; FAM es la cantidad total de N de estiércol animal aplicada al suelo. Kg N año-1; FSEW es la cantidad total de N de barros cloacales aplicados al suelo. Kg N año-1; y FCOMP es la cantidad total de N de compost aplicada al suelo. Kg N año-1

$$F_{ON} = F_{AM} + F_{SEW} + F_{COMP} + F_{OOA} \quad (2)$$

Dado que las emisiones generadas por la urea son diferentes a las de los fertilizantes nitrogenados, para estimar las emisiones por fertilización con urea el IPCC presenta la ecuación 11.13 (ver ECUACIÓN 3), en la cual se presenta que las emisiones totales de  $CO_2$  generadas por la aplicación de urea son iguales a la multiplicación de la cantidad de urea aplicada por el factor de emisión. Dado que no se cuenta con un factor de emisión propio, en este cálculo se empleó el factor de emisión propuesto por el IPCC. En la ECUACIÓN 3:  $M$  es la cantidad de fertilización con urea, expresado en Ton urea año-1; y  $FE$  el factor de emisión expresado en Ton C(ton de urea)-1.

Teniendo en cuenta que la utilización de fertilizantes nitrogenados también genera emisiones por lixiviación y volatilización, de acuerdo con las directrices del IPCC, se estimó una fracción de volatilización del 10% y una fracción de lixiviación del 30% de los fertilizantes nitrogenados aplicados. Para el cálculo estas emisiones se utilizó la ecuación 11.10 de las directrices de la IPCC (ver ECUACIÓN 4), según la cual se debe multiplicar la fracción de fertilizante que es lixiviado o volatilizado por el factor de emisión por volatilización. En la ECUACIÓN 4:  $N_2O(L)-N$  es la cantidad de  $N_2O-N$  producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de  $N$  a suelos gestionados (Kg  $N_2O-N$  año-1);  $FSN$  es la cantidad de  $N$  de fertilizantes sintéticos aplicada al suelo (Kg  $N$  año-1);  $FON$  es la cantidad de  $N$  de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo (Kg  $N$  año-1);  $FPRP$  es la cantidad de  $N$  de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo (Kg  $N$  año-1);  $FCR$  es la cantidad de  $N$  en los residuos agrícolas, incluyendo cultivos fijadores de  $N$  y de la renovación de forraje/pastura, devuelta a los suelos (Kg  $N$  año-1); y  $FSOM$  es la cantidad de  $N$  mineralizado en suelos minerales relacionada con la pérdida de  $C$  del suelo, como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra (Kg  $N$  año-1). En la TABLA 1 se presenta la lista de factores de emisión utilizados en el cálculo teórico de la huella de carbono y en la TABLA 2 el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases, a un horizonte de cien años, de acuerdo con el IPCC (Foster et al., 2007).

**Tabla 1. Factores de emisión**

Ítem	Valor	Unidad
Aportes de $N_2O$ por uso de fertilizantes minerales	0,01	kg $N_2O-N$ /ha/año
Aportes de $CO_2$ por utilización de urea	0,2	kg C/kg Urea/año
Volatilización y re deposición de nitrógeno	0,01	kg $N_2O-N$ /ha/año
Lixiviación o escurrimiento de nitrógeno	0,0075	kg $N_2O-N$ /ha/año
Aporte de $CO_2$ por combustión de diesel colombiano	300539	$CO_2$ mg/m3

**Tabla 2. Potencial de calentamiento global en un horizonte de cien años (Foster et al., 2007)**

GEI	Potencial
$CO_2$	1
$CH_4$	25
$N_2O$	298

## **PROTOCOLO DE MUESTREO DE GEI EMITIDOS POR LOS TRACTORES**

Se midió la concentración ambiental de  $CO_2$  en partes por millón (ppm) de una hectárea (ha) de tierra, durante los procesos de descepada, subsolada, rastro arado, rastrillado, cincelado, y surcado; se realizaron quince mediciones de la concentración de  $CO_2$  durante la ejecución de cada proceso, además de la temperatura y la humedad al momento de iniciar las labores.

### **MEDICIÓN INICIAL DEL TERRENO A MUESTREAR**

Una vez se conoce el sentido en el que se desarrollará el proceso a muestrear, se realiza la medición de una hectárea de terreno (el alcance planteado para el proyecto). Cuando es posible, se mide un área de 100 m de ancho por 100 m de largo, en caso contrario, lo importante es que mida 10.000 m<sup>2</sup>.

### **ALISTAMIENTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN**

Antes de iniciar las labores de campo, se enciende el medidor de  $CO_2$  conectado a la sonda para medición de la humedad, se espera aproximadamente dos minutos a que se estabilice la medición y se registra la medida del porcentaje de humedad en el ambiente. Posteriormente, se apaga el medidor y se conecta a la sonda de medición de  $CO_2$  y temperatura, una vez conectado, se enciende nuevamente, se espera aproximadamente dos minutos a que se estabilice la medición, se registra la temperatura y, simultáneamente al inicio de las labores de preparación de suelo, se presiona el botón REC del equipo, para que este registre la concentración de  $CO_2$  más alta y la más baja, durante el periodo de muestreo.

### **INFORMACIÓN DE INICIO DEL MUESTREO**

Previo al inicio de las labores, se registra: el tipo de vehículo, el valor inicial del odómetro del vehículo que se utilizará en la labor, su velocidad promedio, su consumo promedio de combustible y la hora de inicio de ejecución de la labor.

### **TOMA DE MUESTRAS**

Para realizar las mediciones, es necesario ubicarse en el punto más cercano posible al tractor que está desarrollando la labor; teniendo en cuenta que no se puede permanecer siempre al lado del tractor, dado su velocidad de trabajo,

la persona que está desarrollando el muestreo debe ubicarse a un costado de la hectárea y registrar las mediciones del momento en el que el tractor está más cerca y del momento en el que está más lejos del punto de medición, momento en el que el tractor reduce su velocidad para cruzar y regresar, hasta completar las 15 mediciones. Durante las mediciones que se han realizado, se ha observado que cuando el tractor está más cerca del equipo, la concentración en ppm es menor que cuando está más lejos del punto de medición. Debe tenerse en cuenta que las mediciones que realizan en campo abierto y el viento tiene una alta incidencia en la concentración medida de  $CO_2$ .

#### **INFORMACIÓN DE FINALIZACIÓN DE MUESTREO**

Al finalizar las labores de preparación de suelo, se registra nuevamente la marcación del odómetro y la hora de finalización de las labores.

#### **PROTOCOLO DE MUESTREO DE GEI EMITIDOS POR EL SUELO**

Con base en el protocolo para muestreo de gases de efecto invernadero mediante la técnica de cámara cerrada, desarrollado por el CIAT en el marco del proyecto “Análisis integral de sistemas productivos en Colombia para la adaptación al cambio climático”, se estableció el siguiente protocolo de muestreo de GEI emitidos por el suelo. Con el cual se llevó a cabo el muestreo de tres hectáreas de suelo, en tres suertes diferentes, después de haber sido ejecutadas las labores de preparación de suelo.

#### **MEDICIÓN INICIAL DEL TERRENO A MUESTREAR**

Una vez se conoce el terreno a evaluar, se mide y se demarca un área cuadrada o rectangular de 10.000 m<sup>2</sup>, sobre la que se ubicarán las cámaras de muestreo, siguiendo una diagonal. Considerando el tamaño de cada lado y utilizando el teorema de Pitágoras, se calcula la diagonal que atraviesa el área a muestrear. Dado que la primera y la última cámara deben tener al menos 5 m de distancia entre el límite del área y la cámara, al valor de la diagonal se le restan 14 m y se divide entre 5, operación que indicará la distancia a la que debe ser ubicada cada cámara para cubrir de manera uniforme, el terreno a evaluar.

#### **INSTALACIÓN DE CÁMARAS DE MUESTREO**

La cámara de muestreo consiste en dos anillos de PVC, una base, una tapa de aproximadamente 25 cm de diámetro y 10 cm de altura, con dos tapones en la

parte superior y una banda de caucho. La base del primer anillo se ubica a 5 m de distancia de ambas partes laterales de la hectárea medida, sobre el surco de siembra, donde se entierra a 5 cm de profundidad, cuidando que quede lo más horizontal posible. Posteriormente, y a partir de ahí, se mide la distancia calculada a la que será ubicada la siguiente cámara, siempre en dirección diagonal, y se ubican las otras cinco cámaras, siguiendo esta metodología. Antes de instalarse la última cámara, se revisa que haya una distancia de al menos 5 m desde cada costado del área medida hasta el punto donde será ubicada la cámara. Los anillos base se entierran en el suelo y se dejan de forma permanente durante el periodo en el que se tomarán muestras del flujo de gases del suelo, de forma que, cada que se vaya a realizar un muestreo, se conserve el lugar donde se tomó la primera muestra. El anillo tapa cuenta con una banda para sellar herméticamente la cámara y dos tapones de caucho, uno para instalar el termómetro y otro para sacar las muestras de gas; este anillo sólo se ubica sobre la base, al momento de iniciar el proceso de muestreo y se lleva al lugar de muestreo, cada que se van a extraer muestras. Los cauchos deben ser cambiados, preferiblemente cada que se vayan a extraer muestras, de forma que se conserve lo más herméticamente posible el interior de la cámara.

#### **ALISTAMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS A UTILIZAR**

Una vez instaladas todas las cámaras, se deja en cada una de ellas, una tapa con el termómetro instalado, un cronómetro y cuatro viales con vacío.

#### **TOMA DE MUESTRAS**

Se realiza utilizando una jeringa de 20 ml en la que se instala una válvula de paso y una aguja pequeña. Para iniciar el muestreo, la jeringa debe estar vacía, con el embolo completamente adentro y la mariposa de la válvula de paso abierta (paralela a la jeringa). La periodicidad de la toma de la muestra depende de la ubicación de las cámaras y de la facilidad del desplazamiento entre una y otra. Teniendo en cuenta que el desplazamiento al interior del terreno tiene cierto grado de dificultad, las muestras se toman con intervalos de 20 minutos, tiempo requerido para muestrear las seis cámaras y llegar nuevamente a la primera. Esta es la secuencia de ejecución del muestreo:

- se revisa que al interior de la cámara haya la menor cantidad de maleza posible, si hay maleza u otro elemento extraño, debe ser cortada u extraído, procurando mover lo menos posible el suelo;

## Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar

- se programa el cronómetro con el tiempo del intervalo de muestreo (20 minutos, en este caso);
- se ubica la tapa sobre la cámara base, sellando perfectamente con la banda de caucho y cuidando que la punta del termómetro no tenga contacto con la superficie del suelo;
- se inserta completamente la aguja en el tapón, se toman 20 ml de aire, se expulsan dentro de la cámara, se repite este procedimiento dos veces con el fin de homogeneizar los gases dentro de la cámara;
- se toman 20 ml de aire, se cierra la válvula de forma que la mariposa quede horizontal y se retira la aguja, sosteniendo el tapón para evitar el escape de los gases acumulados;
- se abre la válvula, se retiran 5 ml de aire, se cierra nuevamente y se depositados en el vial con vacío los 15 ml que quedan en la jeringa (para introducir estos gases en el vial, se debe retirar la tapa de aluminio e insertar la aguja en el vial, posteriormente se abre la válvula y se verifica que el vial tenga vacío, dejando que el vacío del vial extraiga el aire que está al interior de la jeringa, si el aire no es extraído por el vial, significa que el vial no tiene vacío y debe ser reemplazado por otro);
- una vez extraída y almacenada la muestra se activa el cronometro;
- se marca el vial con el número de cámara, fecha de muestreo y tiempo transcurrido desde el inicio del muestreo y temperatura;
- se continúa con el muestreo de las siguientes cinco cámaras, asegurando que es posible regresar a tomar la segunda muestra antes de que hayan pasado los 20 minutos.

### **ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS**

Al finalizar el muestreo: se destapan las cámaras, se guardan los termómetros y los cronómetros y se empaacan las muestras para ser entregadas, en el menor tiempo posible, al laboratorio para que las analice por cromatografía de gases.

### **REGISTRO DE INFORMACIÓN**

Durante el periodo de muestreo, es importante registrar los cambios en el clima, las condiciones alrededor de cada cámara, los incidentes ocurridos durante el muestreo y cualquier eventualidad que pueda afectar los resultados de las muestras.

## TRABAJO DE CAMPO

En esta sección se describen, específicamente, las tareas de recolección de información realizadas y los resultados base obtenidos, respectivamente en las mediciones en aire y en suelo.

### MEDICIÓN DE LAS EMISIONES EN EL AIRE

#### DESCEPADA

Este proceso fue realizado con un tractor oruga SRX-280, motor Cummins modelo 2010. El recorrido de una hectárea le tomó al tractorista 60 minutos por pase, tiempo en el cual tuvo un consumo promedio de 13 gl/h. El muestreo fue realizado a 36.6°C en un día soleado sobre un suelo de tipo limoso arcilloso, de consistencia húmeda y pesada.

Al finalizar las mediciones se obtuvo un nivel promedio de concentración de  $CO_2$  en el ambiente de 321ppm/ha, equivalentes a  $4,87 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ -eq, con una desviación estándar de 19ppm/ha. Como se observa en la FIGURA 1, el nivel de concentración del  $CO_2$  está entre 290 y 360 ppm, con un crecimiento constante hasta la décima medición, cuando empieza a descender hasta un nivel de 310 ppm/ha, variación que podría ser consecuencia de un cambio en el clima, pues, dado el método de medición, el nivel y la dirección del viento puede tener incidencia significativa en el valor de la concentración de  $CO_2$  en el ambiente. En la FIGURA 2 se presenta el recorrido seguido por el tractor, el punto de partida del tractor y una representación de la forma como se toman las mediciones durante la ejecución de la labor.

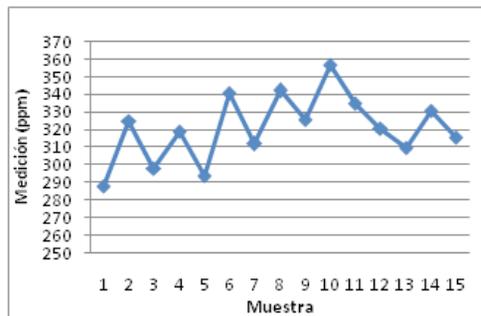


Figura 1. Resultados de las mediciones de la labor de descepada

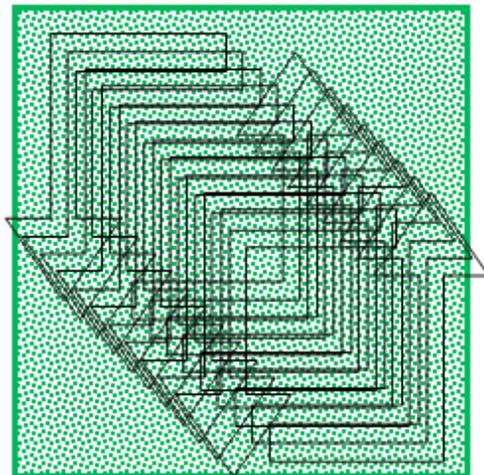


Figura 2. Diagrama del recorrido de la labor de descepada

#### SUBSOLADO

Este proceso se llevó a cabo empleando un tractor Jhon Deere 8420 que consume aproximadamente 6 gl/h de diesel, al cual le tomó 1,7 h cubrir completamente la hectárea, de un suelo tipo limoso arcilloso, con el recorrido establecido para esta labor. El nivel promedio de la concentración de  $CO_2$  en el ambiente fue de 336 ppm/ha, equivalentes a  $5,1 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ -eq, a una temperatura promedio de  $34,9^\circ C$ , con una desviación estándar de 53,98ppm.

En la FIGURA 3 se puede observar una alta variabilidad en el nivel de emisiones de  $CO_2$  en el ambiente, con picos de concentración en las mediciones quinta

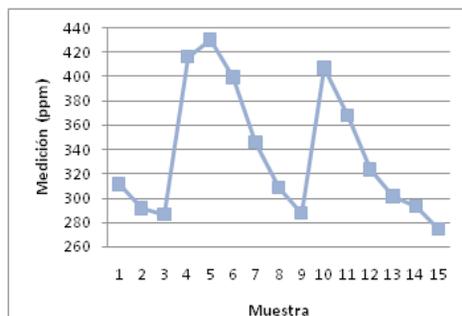
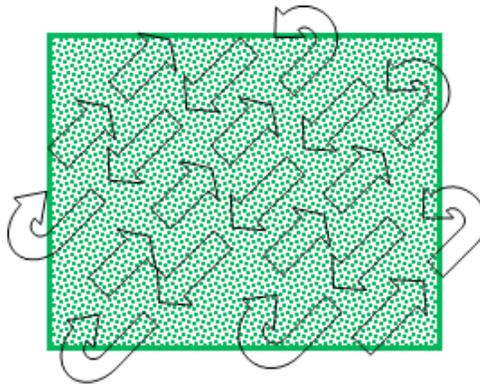


Figura 3. Resultados de las mediciones de la labor de subsolada

y décima. La mayor concentración de  $CO_2$  se obtuvo en la quinta medida (430 ppm/ha). La variabilidad en las medidas puede estar relacionada con: las condiciones del suelo al momento de ser efectuada la labor; el recorrido y los cambios de potencia que se presentaron al extremo de cada tramo, cuando se reduce la velocidad a cero para dar la vuelta y continuar con el desarrollo de la actividad; la distancia entre el tractor y la antena de medición; y la dirección del viento al momento de la medición. En la FIGURA 4 se presenta el recorrido de la labor de Subsolada.



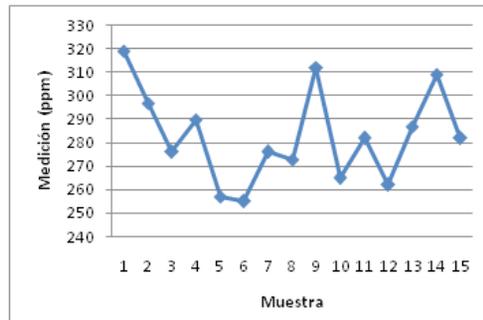
**Figura 4. Diagrama del recorrido de la labor de subsolada**

#### CINCELADO

El muestreo de este proceso se hizo a una temperatura promedio de 31 °C y 61,20% de humedad relativa, en un terreno franco arcilloso, con un tractor Jhon Deere 8410, que consume un promedio de 7 gl/h de diesel. Cubrir la hectárea de suelo desarrollando esta labor tomó 30 minutos, tiempo durante el cual se registró un nivel promedio de  $CO_2$  de 283 ppm/ha, equivalentes a  $4,29 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ -eq, con una desviación estándar de 19,8ppm/ha.

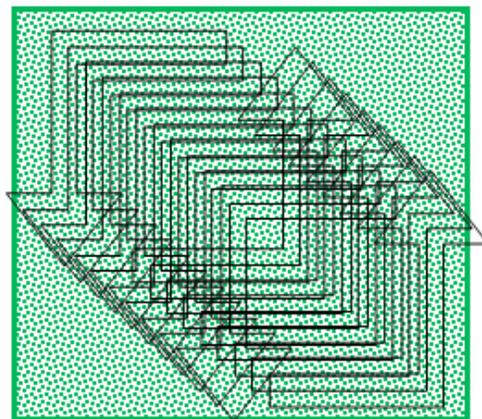
Como se puede observar en la FIGURA 5, el nivel de la concentración de  $CO_2$  en el ambiente no tiene un patrón determinado, aunque se mantiene constante alrededor de las 283 ppm. Inicia con su máximo valor de concentración en

## Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar



**Figura 5. Resultados de las mediciones de la labor de cincelado**

320 ppm y baja hasta 255 ppm. Ese comportamiento se podría explicar por el nivel y la dirección del viento, y la variación de la velocidad del tractor, sin embargo, no se cuenta con información que permita evidenciar la forma como estos factores inciden sobre los resultados obtenidos. En la FIGURA 6 se presenta el recorrido de la labor de cincelado.



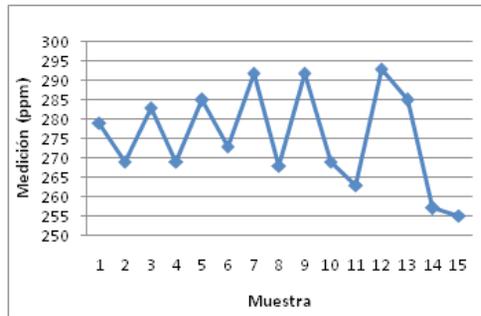
**Figura 6. Recorrido de la labor de cincelado**

### **RASTRO-ARADO**

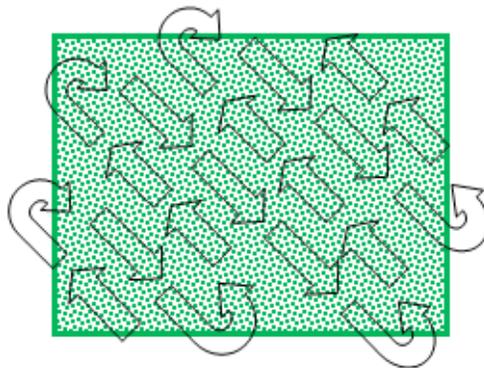
Este proceso se llevó a cabo sobre un terreno franco arcilloso, empleando un tractor Jhon Deere 8285, que tardó 27 minutos en cubrir la hectárea. Su consumo promedio de diesel fue de 1 gl/h. La temperatura promedio fue de

32,4°C y la humedad relativa de 61,2%. El nivel promedio de la concentración de  $CO_2$  durante la ejecución de la labor fue de 275ppm/ha, equivalentes a  $4,18 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ -eq, con una desviación estándar de 12,56ppm/ha.

En la FIGURA 7 se puede observar una gran variación del nivel de concentración de  $CO_2$  en la medida en que avanza el proceso, de 293 ppm en la toma 13, a 255 ppm en la toma 15, donde se registra el nivel más bajo. Este comportamiento puede estar relacionado principalmente con la dirección y la cantidad de viento presente al final del muestreo. La FIGURA 8 corresponde al recorrido de esta labor.



**Figura 7. Resultados de las mediciones de la labor de rastro-arado**



**Figura 8. Recorrido de la labor de rastro-arado**

## RASTRILLADO

Esta labor se llevó a cabo utilizando un tractor John Deere 7810, con una potencia de 175 hp, que consume 6 gal/h de diesel. El desarrollo de un pase completo de rastrillo sobre la hectárea de suelo le tomó al tractorista 45 minutos, durante los cuales el nivel promedio de emisiones fue de 292 ppm/ha, equivalentes a  $4,44 \times 10^{-7}$  TonCO<sub>2</sub>eq. La temperatura promedio fue de 30,15 °C y la humedad relativa de 60.1 %.

Como se puede observar en la FIGURA 9, la desviación estándar del muestreo fue de 10,58 ppm, valor que, teniendo en cuenta las condiciones de muestreo,

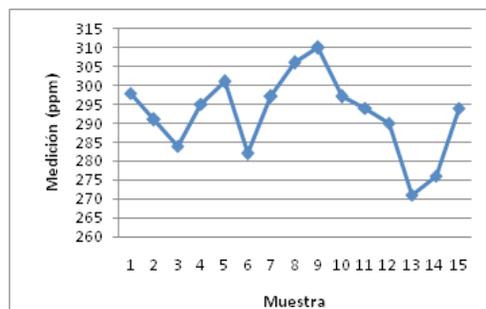


Figura 9. Resultados de las mediciones de la labor de rastrillada

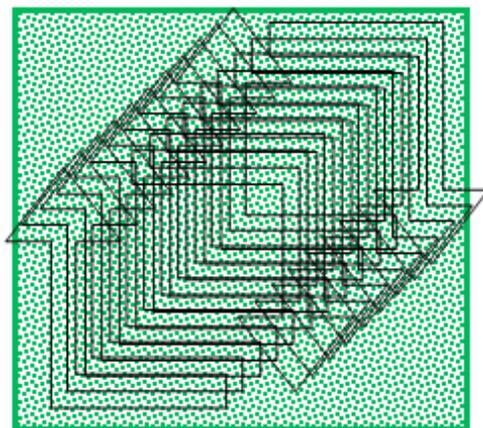


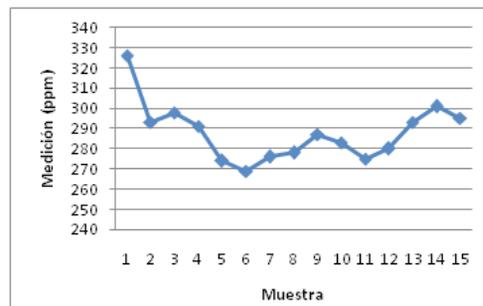
Figura 10. Recorrido de la labor de rastrillada

es relativamente pequeño. En cuanto a su comportamiento, se pueden identificar dos picos de concentración, uno en la novena medición, cuando alcanzó el valor máximo de 310 ppm, y otra en la decimotercera medición, cuando alcanzó el punto mínimo (270 ppm). Teniendo en cuenta que el nivel de remoción de tierra durante el desarrollo de esta labor, con respecto a las demás es relativamente bajo, podría inferirse que la oscilación en el nivel de concentración de  $CO_2$  en el ambiente puede ser, principalmente, por efecto de la dirección y la cantidad de viento presente durante el proceso de medición. La FIGURA 10 corresponde al recorrido de la labor de rastrillada.

### SURCADO

Este proceso se llevó a cabo empleando un tractor John Deere 6165, con una potencia de 165 hp y un consumo de diesel de 4 gl/h y tomó 25 minutos. La temperatura ambiente promedio fue de 31.4 °C y la humedad relativa de 60.10%. El nivel promedio de la concentración de  $CO_2$  en el ambiente fue de 288 ppm/ha, que equivale a  $4.37 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ eq.

Como se puede observar en la FIGURA 11, el comportamiento del nivel fue relativamente constante, Su desviación estándar fue de 14.35 ppm/ha; obtuvo su valor más alto en la primera muestra (325 ppm/ha) y el más bajo en la sexta (270 ppm/ha). Teniendo en cuenta el recorrido del tractor (FIGURA 12), el nivel de variación se le podría atribuir a la dirección e intensidad del viento, y a los cambios de velocidad que realiza el tractorista para dar la vuelta y regresar con el vehículo.



**Figura 11. Resultados de las mediciones de la labor de surcado**

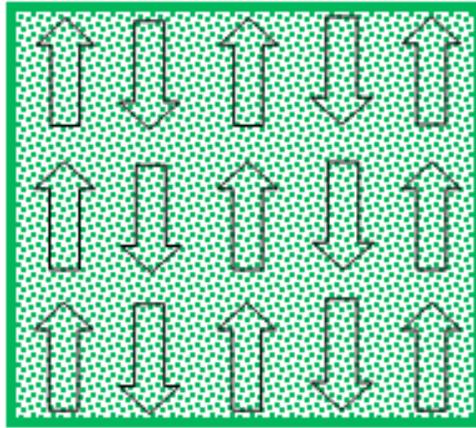


Figura 12. Recorrido de la labor de surcado

#### ENCALLE DE RESIDUOS

Este proceso se llevó a cabo con un tractor John Deere 6125D, modelo 2013, con una potencia de 270HP, empleando una herramienta de cuatro discos giratorios, a una velocidad promedio de 18 km/h, con un consumo promedio de 2,5 gl/h. El proceso tomó aproximadamente 30 minutos. La temperatura fue de 29,8 °C, con 57% de humedad relativa y presencia moderada de viento. El nivel promedio de concentración de  $CO_2$  durante la medición fue de 303,6 ppm/ha, equivalentes a  $4,61 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ eq, con una desviación estándar de 15,74. El comportamiento de las concentraciones (FIGURA 13) muestra un

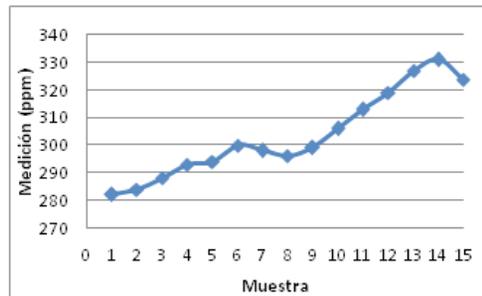
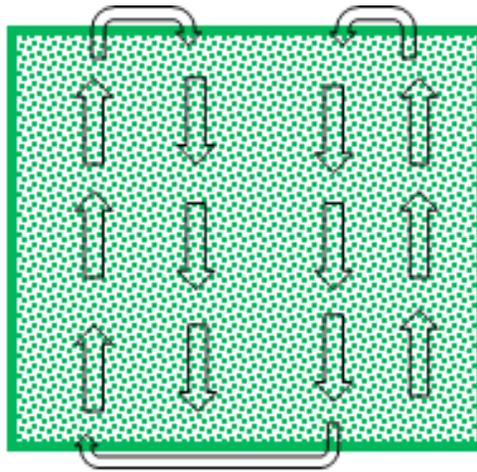


Figura 13. Resultados de las mediciones de la labor de encalle de residuos

incremento sostenido durante el periodo de medición, con pocas fluctuaciones, y con un valor mínimo de 280ppm y máximo de 330ppm. Este comportamiento podría estar relacionado con las condiciones del terreno, así como con la cantidad de residuos que deben ser movilizadas en cada vuelta del tractor a través del surco. La FIGURA 14 corresponde al recorrido de este proceso.



**Figura 14. Recorrido de la labor de encalle de residuos**

#### **CULTIVO-APORQUE**

Este proceso se llevó a cabo empleando un tractor John Deere 6125D modelo 2013, a una velocidad de 10 km/h, con un consumo promedio de 2 gl/h, durante 40 minutos. La temperatura fue de 33.8 °C, con una humedad relativa de 53% y alta presencia de viento. El nivel promedio de la concentración del  $CO_2$  fue de 253,5ppm/ha, equivalentes a  $3.85 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ eq, con una desviación estándar de 21,07.

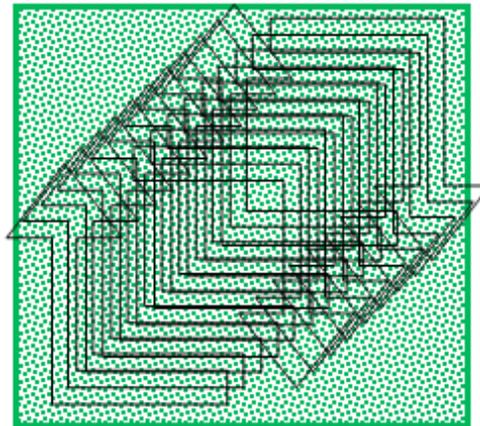
En la FIGURA 15 se puede observar un crecimiento sostenido, con dos incrementos significativos, a 275 y 280 ppm, que podrían estar relacionados, tanto con las variaciones en el nivel de viento, como con los cambios en la velocidad del tractor. Cuando el vehículo termina de recorrer el surco, debe reducir su velocidad para poder cruzar y arrancar nuevamente, lo que implica un cambio de potencia y un mayor consumo de combustible. La FIGURA 16 corresponde al recorrido del tractor en esta tarea.



con el trayecto del tractor y la variación en las condiciones del terreno a medida que este avanza al interior de la hectárea (ver mediciones 6, 8, 9 y 10), cuando la concentración de  $CO_2$  es más alta y varía en un rango entre 344 y 338 ppm. La FIGURA 18 corresponde al recorrido de esta labor.



**Figura 17. Resultados de las mediciones de la labor de aplicación de abonos**



**Figura 18. Recorrido de la labor de aplicación de abonos**

## MEDICIÓN DE LAS EMISIONES DEL SUELO

Se seleccionaron tres suertes donde se habían realizado procesos de preparación de suelos. Se caracterizaron las emisiones de dos socas –una de manejo comercial (suerte A), otra de manejo limpio (suerte B), y una plantilla de manejo limpio

(suerte C). En cada suerte se midió una hectárea de suelo y en ella se ubicaron seis anillos de muestreo, atravesándola en forma diagonal. En la TABLA 3 se resumen las características de las suertes y el tratamiento que habían recibido.

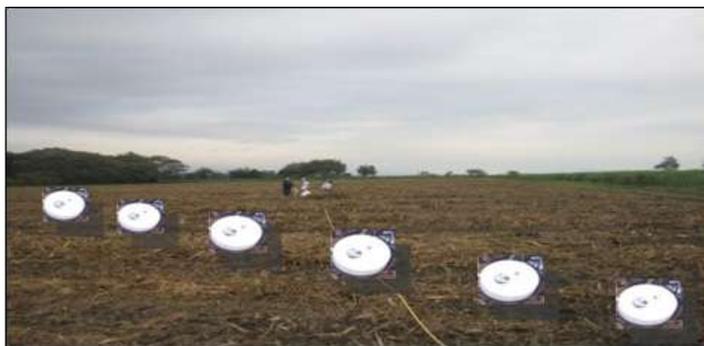
**Tabla 3. Labores de preparación del suelo aplicadas a cada suerte**

Labor	Suerte A	Suerte B	Suerte C
Variedad	CC8592	CC-01-1228	CC-97-7170
Preparación convencional			X
Encalle mecánico de residuos	X	X	
Subsolada	X	X	
Cultivo aporque		X	
Aplicación mecánica de vinaza	X		
Aplicación mecánica de lodos	X		
Aplicación mecánica de compost	X		

#### **SOCA DE MANEJO COMERCIAL (SUERTE A)**

Este cultivo tuvo su primer corte el 29 de noviembre, fecha en la cual recibió encalle mecánico de residuos al dos por uno. Tres días después recibió una aplicación de 9.000 lt/ha de vinaza, 100 kg/ha de urea y 10 ton/ha de compost. Al día siguiente recibió 12 ton/ha de lodos. El 5 de diciembre se hizo el primer muestreo de esta suerte, tal como indica el protocolo, se midió una hectárea de suelo, se delimitó y se ubicaron seis cámaras en diagonal, las cuales fueron enterradas a 5 cm de profundidad, con 30 m de distancia entre una y otra. En la FIGURA 19 se puede observar el estado inicial de la suerte al momento de la medición y delimitación de la hectárea, en ella se puede apreciar la ubicación de las cámaras empleadas para el muestreo de los gases emitidos por el suelo, sobre la hectárea seleccionada para el análisis experimental.

La FIGURA 20 corresponde a una cámara, de las que fueron empleadas para la medición de los gases del suelo. En el primer muestreo, sólo las cámaras 1, 3 y 5 contaban con un termómetro para medir la temperatura al interior de la cámara. Se tomaron cuatro muestras de gas por cada cámara, con una secuencia de muestreo de de 20 minutos entre cada uno. En la TABLA 4 se presentan la hora y la temperatura a la que fue tomada cada muestra.



**Figura 19. Estado inicial de la suerte A**



**Figura 20. Cámara utilizada en las mediciones**

**Tabla 4. Datos de toma de muestreo: suerte A**

Cámara	Toma 1: 0 minutos		Toma 2: 20 minutos		Toma 3: 40 minutos		Toma 4: 60 minutos	
	Hora	° C	Hora	° C	Hora	° C	Hora	° C
1	9:24 AM	28.8	9:45 AM	33.3	10:05 AM	33.6	10:25 AM	33.1
2	9:27 AM		9:47 AM		10:07 AM		10:27 AM	
3	9:29 AM	31.1	9:49 AM	33.9	10:10 AM	33.8	10:31 AM	33.8
4	9:31 AM		9:52 AM		10:13 AM		10:35 AM	
5	9:33 AM	31.8	9:54 AM	34.0	10:15 AM	33.4	10:36 AM	33.7
6	9:36 AM		9:57 AM		10:17 AM		10:37 AM	

**Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar**

En la TABLA 5 se presentan los resultados del análisis de muestras obtenidos por medio de cromatografía de gases, expresados en partes por millón (ppm), para identificar la emisión de cada gas, y en toneladas de carbono equivalentes (TonCO<sub>2</sub>eq), para totalizar los gases emitidos por cada cámara en cada uno de los tiempos de muestreo, teniendo en cuenta su potencial de calentamiento

**Tabla 5. Gases emitidos por cámara: suerte A**

Cámara	°C	Concentraciones (ppm)		Concentraciones (TonCO <sub>2</sub> eq)			Total (TonCO <sub>2</sub> eq)
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	
C1-T0	28,8	1,130	0,218	1,56E-08	9,88E-08	1,37E-06	1,48E-06
C1-T1	33,3	1,162	0,354	1,61E-08	1,60E-07	1,00E-06	1,18E-06
C1-T2	33,6	1,105	0,608	1,53E-08	2,75E-07	1,44E-06	1,73E-06
C1-T3	33,1	1,093	0,021	1,51E-08	4,16E-07	1,73E-06	2,17E-06
C2-T0	30,0	1,096	0,242	1,52E-08	1,10E-07	4,74E-07	5,99E-07
C2-T1	33,6	1,095	0,378	1,51E-08	1,71E-07	1,15E-06	1,34E-06
C2-T2	33,7	1,110	0,630	1,53E-08	2,85E-07	4,25E-06	4,55E-06
C2-T3	33,5	1,115	0,752	1,54E-08	3,40E-07	6,30E-06	6,66E-06
C3-T0	31,1	1,055	0,245	1,46E-08	1,11E-07	3,85E-07	5,11E-07
C3-T1	33,9	1,086	0,321	1,50E-08	1,45E-07	1,45E-06	1,61E-06
C3-T2	33,8	1,105	0,461	1,52E-08	2,09E-07	1,91E-06	2,14E-06
C3-T3	33,8	1,075	0,500	1,49E-08	2,26E-07	2,37E-06	2,61E-06
C4-T0	31,5	1,081	0,322	1,49E-08	1,46E-07	5,48E-07	7,08E-07
C4-T1	34,0	1,084	0,348	1,50E-08	1,58E-07	1,58E-06	1,75E-06
C4-T2	33,6	1,104	0,699	1,53E-08	3,16E-07	2,75E-06	3,08E-06
C4-T3	33,8	1,061	0,960	1,47E-08	4,34E-07	3,78E-06	4,23E-06
C5-T0	31,8	1,066	0,264	1,47E-08	1,19E-07	4,24E-07	5,58E-07
C5-T1	34,0	1,081	0,464	1,49E-08	2,10E-07	1,06E-06	1,28E-06
C5-T2	33,4	1,105	0,588	1,53E-08	2,66E-07	1,69E-06	1,97E-06
C5-T3	33,7	1,174	0,746	1,62E-08	3,37E-07	2,26E-06	2,62E-06
C6-T0	31,8	1,085	0,319	1,50E-08	1,44E-07	3,82E-07	5,42E-07
C6-T1	34,0	1,092	0,324	1,51E-08	1,47E-07	8,62E-07	1,02E-06
C6-T2	33,4	1,067	0,342	1,47E-08	1,55E-07	1,00E-06	1,17E-06
C6-T3	33,7	1,040	0,460	1,44E-08	2,08E-07	1,24E-06	1,46E-06
Máximo	34,0	1,2	1,0	1,62E-08	4,34E-07	6,30E-06	6,66E-06
Mínimo	28,8	1,0	0,2	1,44E-08	9,88E-08	3,82E-07	5,11E-07
			Mineralización	3,63E-07	5,19E-06	4,14E-05	4,70E-05
				1%	11%	88%	100%

global. Para las cámaras que no contaban con termómetro, la temperatura se tomó como el promedio de la temperatura de las cámaras ubicadas a sus lados, excepto para la cámara 6, que por estar en un extremo usó la de la cámara 5.

De acuerdo con el total de gases emitidos por las seis cámaras, se estimó que por mineralización del suelo se emiten aproximadamente  $4,7 \times 10^{-5}$  Ton $CO_2$ eq cada hora, de ellas, el 88% corresponde a emisiones de  $CO_2$ , el 11% a  $N_2O$  y el 1% a  $CH_4$ .

Para analizar el comportamiento de los gases a medida que transcurre el tiempo de muestreo, se graficó el total de toneladas de  $CO_2$  equivalente emitidas a los 0 (T0), 20 (T20), 40 (T40) y 60 (T60) minutos de haberse iniciado el muestreo, su resultado se presenta en la FIGURA 21, donde se puede observar que la franja azul que representa el muestreo inmediatamente después de cerrar la cámara se encuentra más abajo que las demás, mientras que la franja morada, que representa el contenido de gases de cada cámara pasados 60 minutos, tiene mayor cantidad de  $CO_2$ eq. Este comportamiento es similar en todas las cámaras, sin embargo, en la cámara 1 se puede observar que el contenido inicial de gases, es mayor al contenido transcurridos 20 minutos. Cuando se hace un análisis completo de los flujos del suelo durante todo el periodo de cultivo, este comportamiento suele relacionarse con la acción del suelo como sumidero, sin embargo, teniendo en cuenta que los datos obtenidos solo representan el comportamiento del suelo en un momento puntual, no es posible determinar el flujo de gases ni la capacidad de absorción del suelo. En cuanto a las muestras tomadas, se puede observar que la emisión más alta de gases fue registrada en la cámara 2 al finalizar el muestreo, cuando se alcanzó una emisión de  $6,66 \times 10^{-6}$  Ton $CO_2$ eq, y la más baja en la cámara 3, con  $5,11 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ eq, registrada al inicio del muestreo. Estas diferencias en la emisión de gases muestran la variación en la actividad microbiana a través del área de muestreo, lo que

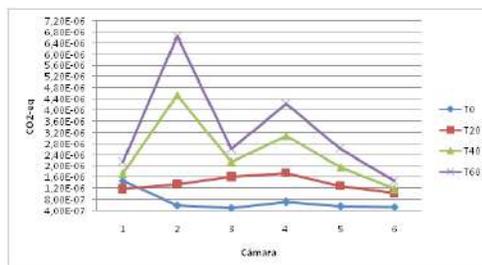


Figura 21. Emisiones de  $CO_2$ eq equivalente por cámara por tiempo de muestreo

podría relacionarse con la homogeneidad en la aplicación de los abonos y las condiciones específicas de humedad y porosidad del suelo en cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras (Madero et al., 2010).

Las FIGURAS 22, 23 y 24 corresponden a los niveles de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, por cámara en cada momento de muestreo. Las series T0, T1, T2, T3 hacen referencia al tiempo transcurrido desde el momento en el que se inició el muestreo y representa el muestreo a los 0, 20, 40 y 60 minutos, respectivamente.

A diferencia de lo que sucede con la cantidad total de gases al interior de cada cámara, analizados en la FIGURA 21, la mayor concentración de metano no se

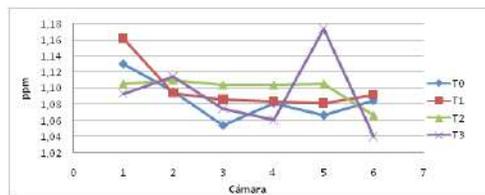


Figura 22. Emisiones de metano por cámara por tiempo de muestreo

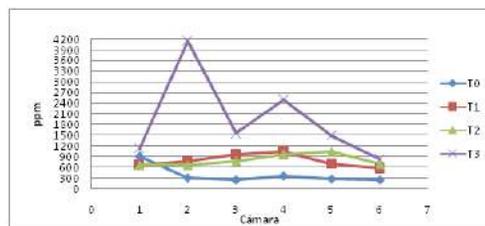


Figura 23. Emisiones de dióxido de carbono por cámara por tiempo de muestreo

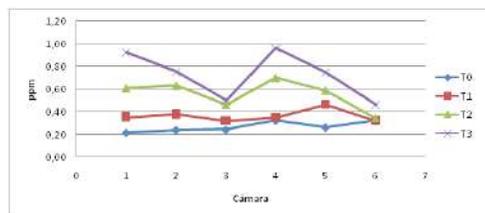


Figura 24. Emisiones de óxido nítrico por cámara por tiempo de muestreo

registra transcurridos los 60 minutos de muestreo sino que varía al interior de cada cámara. De hecho, tan solo en la cámara 5 se puede observar una acumulación de metano en su interior (ver FIGURA 22), en las otras cámaras, se observa que la concentración de metano a los 20 y 40 minutos de iniciado el muestreo, fue superior a la concentración registrada transcurridos 60 minutos. En términos generales, el comportamiento de este gas es relativamente estable, sólo representa el 1% de los gases emitidos y el rango de sus concentraciones está entre 1,174ppm y 1,040ppm.

Cuando se hace un análisis completo de los flujos del suelo durante todo el periodo de cultivo, el comportamiento descrito suele relacionarse con la acción del suelo como sumidero, sin embargo, teniendo en cuenta que los datos obtenidos solo representan el comportamiento del suelo en un momento puntual, no se posible determinar el flujo de gases, ni la capacidad de absorción del suelo.

En cuanto a las muestras tomadas, se puede observar que la emisión más alta de gases fue registrada en la cámara 2 al finalizar el muestreo, cuando se alcanza una emisión de  $6,66 \times 10^{-6}$  Ton $CO_2$ eq y la más baja fue de  $5,11 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2$ eq, registrada en la cámara 3 al inicio del muestreo. Estas diferencias en la emisión de gases, muestran la variación en la actividad microbiana a través del área de muestreo, lo que puede tener relación con la homogeneidad en la aplicación de los abonos y las condiciones específicas de humedad y porosidad del suelo en cada uno de los puntos donde se tomaron las muestras (Madero et al., 2010).

En cuanto a la concentración de  $CO_2$ , en la FIGURA 23 se puede observar un incremento en las emisiones de este gas, pues al finalizar los 60 minutos de muestreo la concentración del gas fue mayor a la de las mediciones anteriores, siendo la cámara 2, el punto donde el suelo refleja un nivel superior, con una concentración 78 % superior a la de la cámara 6, que registró el valor mínimo de emisión para el tiempo de muestreo 3. En general, se puede observar que el comportamiento de las emisiones de este gas se asemeja más al comportamiento del total de los gases en toneladas de carbono equivalente, lo que se explica porque el 88% del total de las emisiones del suelo, corresponden a  $CO_2$ .

El comportamiento del óxido nitroso (FIGURA 24) es relativamente constante y conserva la secuencia de valores mínimos al iniciar el muestreo y máximos a los 60 minutos de haber cerrado la cámara, en todos los lugares donde fueron ubicadas las cámaras. El rango de variación de la concentración de óxido

nitroso varía entre 0,218 y 0,960ppm, un rango más amplio que el del metano, pero menor que el del dióxido de carbono. Con respecto de las emisiones totales, el óxido nitroso representa el 11%.

**SOCA DE MANEJO LIMPIO (SUERTE B)**

El cultivo tuvo su tercer corte el 2 de febrero y recibió encalle mecánico de residuos al dos por uno el 5 de febrero; al día siguiente se hizo el muestreo ubicando cada cámara a 23m de distancia diagonal entre una y otra, teniendo en cuenta la forma del terreno. Al finalizar el muestreo, se identificó un hormiguero en la cámara 6. El muestreo se llevó a cabo con intervalos de tiempo de 15 minutos, con todas las cámaras dotadas de un termómetro. En la TABLA 6 se presentan los datos registrados al momento de extraer cada muestra.

**Tabla 6. Datos de muestreo: suerte B**

Cámara	Toma 1: 0 minutos		Toma 2: 20 minutos		Toma 3: 40 minutos		Toma 4: 60 minutos	
	Hora	°C	Hora	°C	Hora	°C	Hora	°C
1	9:19 AM	23.7	9:35 AM	25.8	9:51 AM	27.1	10:06 AM	28.9
2	9:22 AM	23.0	9:38 AM	25.3	9:53 AM	27.5	10:08 AM	29.2
3	9:24 AM	22.6	9:40 AM	24.5	9:55 AM	27.0	10:10 AM	28.7
4	9:26 AM	23.6	9:42 AM	26.0	9:58 AM	28.5	10:13 AM	29.9
5	9:28 AM	23.9	9:44 AM	26.3	10:01 AM	28.7	10:15 AM	29.0
6	9:30 AM	22.8	9:47 AM	26.9	10:03 AM	29.4	10:17 AM	29.6

En la TABLA 7 se presentan los resultados del análisis de muestras obtenidos por medio de cromatografía de gases, expresados en partes por millón (ppm), para identificar la emisión de cada gas, y en toneladas de carbono equivalentes (TonCO<sub>2</sub>eq), para totalizar los gases emitidos por cada cámara en cada uno de los tiempos de muestreo, teniendo en cuenta su potencial de calentamiento global.

De acuerdo con el total de gases emitidos por las seis cámaras ubicadas en la suerte B con cultivo de manejo limpio, en estado en transición y sin aplicación de fertilizantes químicos durante un año, se estimó que por mineralización del suelo, se emiten aproximadamente 3,31x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq cada 45 minutos, de los cuales el 90% corresponde a emisiones de dióxido de carbono, el 8% a

**Tabla 7. Emisión de gases por cámara: suerte B**

Cámara	°C	Concentraciones (ppm)			Concentraciones (TonCO <sub>2</sub> eq)			Total (TonCO <sub>2</sub> eq)
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	
C1-T0	23,7	2,16	0,25	462,63	2,99E-08	1,13E-07	7,02E-07	4,85E-07
C1-T1	25,8	1,72	0,27	621,52	2,37E-08	1,21E-07	9,43E-07	1,09E-06
C1-T2	27,1	1,73	0,20	746,24	2,39E-08	9,17E-08	1,13E-06	1,25E-06
C1-T3	28,9	1,77	0,29	1.159,67	2,44E-08	1,31E-07	1,76E-06	1,92E-06
C2-T0	23,0	1,69	0,25	456,15	2,34E-08	1,11E-07	6,92E-07	8,27E-07
C2-T1	25,3	1,68	0,25	523,11	2,32E-08	1,14E-07	7,94E-07	9,30E-07
C2-T2	27,5	1,66	0,18	482,22	2,30E-08	8,34E-08	7,32E-07	8,38E-07
C2-T3	29,2	1,66	0,19	820,35	2,29E-08	8,78E-08	1,24E-06	1,36E-06
C3-T0	22,6	1,68	0,20	414,66	2,32E-08	921E-08	6,29E-07	7,44E-07
C3-T1	24,5	1,67	0,23	811,23	2,31E-08	1,04E-07	1,23E-06	1,36E-06
C3-T2	27,0	1,68	0,21	827,58	2,32E-08	9,29E-08	1,26E-06	1,37E-06
C3-T3	28,7	1,73	0,20	467,90	2,39E-08	8,92E-08	7,10E-07	8,23E-07
C4-T0	23,6	1,68	0,18	436,48	2,32E-08	8,18E-08	6,23E-07	8,67E-07
C4-T1	26,0	1,67	0,24	685,72	2,31E-08	1,08E-07	1,04E-06	1,17E-06
C4-T2	28,5	1,69	0,20	989,11	2,34E-08	9,19E-08	1,50E-06	1,62E-06
C4-T3	29,9	1,69	0,20	1.179,86	2,34E-08	9,26E-08	1,79E-06	1,91E-06
C5-T0	23,9	1,64	0,22	668,91	2,27E-08	9,98E-08	1,01E-06	1,14E-06
C5-T1	26,3	1,66	0,32	704,76	2,29E-08	1,44E-07	1,07E-06	1,24E-06
C5-T2	28,7	1,81	0,50	1.028,83	2,50E-08	2,27E-07	1,56E-06	1,81E-06
C5-T3	29,0	1,63	0,43	1.818,28	2,26E-08	1,93E-07	2,76E-06	2,97E-06
C6-T0	22,8	1,62	0,13	522,63	2,24E-08	5,90E-08	7,93E-06	8,74E-07
C6-T1	26,9	1,64	0,25	899,67	2,27E-08	1,14E-07	1,36E-07	1,50E-06
C6-T2	29,4	1,64	0,26	1.455,22	2,27E-08	1,15E-07	2,21E-06	2,35E-06
C6-T3	29,6	1,71	0,32	1.510,50	2,37E-08	1,43E-07	2,29E-06	2,46E-06
Máximo	29,9	2,16	0,50	1.818,28	2,99E-08	2,27E-07	2,76E-06	3,02E-06
Mínimo	22,6	1,61	0,13	414,66	2,24E-08	5,9E-08	9,26E-06	7,10E-07
			Mineralización		5,66E-07	2,70E-06	2,99E-05	3,31E-05
					2%	8%	90%	100%

óxido nítrico y el 2% a metano. Presenta un nivel total de emisiones menor al registrado por el cultivo de manejo comercial, con un mayor porcentaje de dióxido de carbono y metano y un menor porcentaje de emisión de óxidos nítricos.

En la FIGURA 25 es posible observar las emisiones en toneladas de dióxido de carbono equivalente, registradas en cada una de las cámaras de muestreo ubicadas en esta suerte. Las series T0, T15, T30, T45 hacen referencia al tiempo transcurrido después de cerrada la cámara de muestreo, representando 0, 15, 30 y 45 minutos transcurridos después de haber cerrado la cámara, respectivamente.

Al graficar las emisiones de carbono equivalente registradas en las muestras tomadas sobre la suerte de manejo limpio (FIGURA 25), puede observarse como inmediatamente después de cerrarse la cámara se registran los niveles más bajos de emisión para todas las cámaras, y transcurridos 45 minutos, la concentración en todas las cámaras alcanza su máximo valor, salvo en la cámara 3, donde la concentración regresa a un valor cercano al inicial. La concentración más alta de gases se registró en la cámara 5 con  $2,97 \times 10^{-6}$  Ton $CO_2eq$  y la más baja en la cámara 4 con  $7,67 \times 10^{-7}$  Ton $CO_2eq$ . Las FIGURAS 26, 27 y 28 corresponden a los niveles de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, por cámara en cada momento de muestreo, respectivamente.

En la FIGURA 26, se puede observar cómo, aunque la cámara 1 inicia con una alta concentración de metano (220 ppm), transcurridos 15 minutos su nivel baja a 1,72ppm, valor en el que se mantiene durante los 45 minutos del

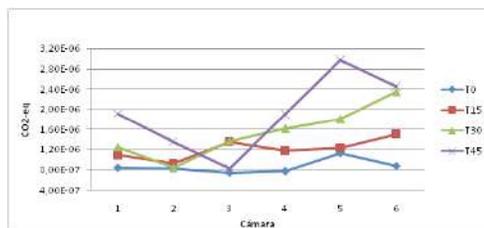


Figura 25. Emisiones de  $CO_2eq$  equivalente por cámara por tiempo de muestreo

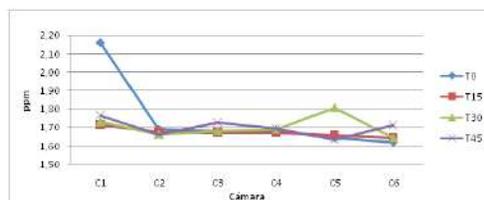
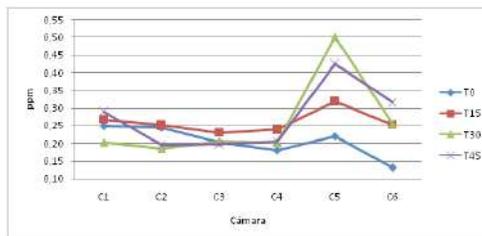
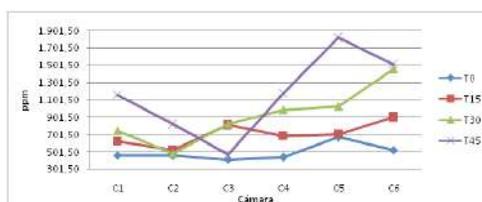


Figura 26. Emisiones de metano por cámara por tiempo de muestreo



**Figura 27. Emisiones de óxido nitroso por cámara por tiempo de muestreo**



**Figura 28. Dióxido de carbono por cámara por tiempo de muestreo**

muestreo, lo que podría interpretarse como un flujo negativo de emisión de metano en este punto del terreno. A nivel general, se observar que el metano tiene un rango de fluctuación relativamente bajo, entre 1,63 y 1,81ppm (así es en cinco de las seis cámaras analizadas) y que la mayor concentración de este gas no se registra siempre en el muestreo realizado pasados los 45 minutos del cierre de la cámara, lo cual podría indicar que el suelo presenta flujos negativos de este gas.

En cuanto a las emisiones de óxido nitroso (Figura 27), se puede observar que en las cámaras 2, 3, 4 y 5, su concentración transcurridos 45 minutos de muestreo no es la más alta. El nivel de emisiones en las cámaras 1, 2, 3 y 4 es relativamente estable y presenta un rango de variación mucho menor al de las cámaras 5 y 6, las cuales presentan concentraciones entre 0,15 y 0,5 ppm. En la cámara 5 se alcanza el mayor nivel de concentración de sus emisiones totales.

El dióxido de carbono (FIGURA 28) presenta un comportamiento muy similar al del total de los gases, medidos en toneladas de carbono equivalente, algo esperado si se considera que 90% de los gases emitidos por el suelo corresponden a  $CO_2$ . Su rango de variación está entre 414 y 1818 ppm, mucho más amplio que el de los demás gases. En cinco de las seis cámaras llega a la mayor concentración transcurridos los 45 minutos de muestreo. En la cámara 3

puede evidenciarse que al inicio y al final del muestreo la concentración de los gases es casi la misma, lo cual podría estar relacionado con las características específicas del suelo en ese punto de muestreo.

**PLANTILLA DE MANEJO LIMPIO (SUERTE C)**

Este cultivo terminó de recibir todas las labores de preparación de suelo convencional el 13 de diciembre, y fue muestreado cuatro días después, antes de que se llevara a cabo la siembra de la plantilla. Las cámaras de este muestreo fueron instaladas con una distancia diagonal de 25m entre cámara y cámara, con intervalos de tiempo de 20min entre cada muestra. En la TABLA 8 se relacionan la hora y la temperatura a la que fue extraída cada muestra.

En la TABLA 9 se presentan los resultados del análisis de muestras obtenidos por cromatografía de gases, expresados en partes por millón (ppm), para identificar la emisión de cada gas, y en toneladas de carbono equivalentes (TonCO<sub>2</sub>eq), para totalizar los gases emitidos por cada cámara en cada uno de los tiempos de muestreo, teniendo en cuenta su potencial de calentamiento global.

Al revisar los resultados obtenidos en la cromatografía de gases de las muestras extraídas en esta suerte, fue posible identificar niveles de concentración de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> atípicos en la cámara 4, por lo tanto, con el objetivo de reducir la variabilidad de los resultados, se descartaron las muestras tomadas en ella, pues no fue posible determinar la causa de este comportamiento.

De acuerdo con el total de gases emitidos por el suelo durante los 60 minutos de muestreo, se estimó que por mineralización del suelo se emiten aproximadamente 2,39x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq cada hora, un valor menor al total

**Tabla 8. Datos de muestreo: suerte C**

Cámara	Toma 1: 0 minutos		Toma 2: 15 minutos		Toma 3: 30 minutos		Toma 4: 45 minutos	
	Hora	°C	Hora	°C	Hora	°C	Hora	°C
1	8:54 AM	27.6	9:14 AM	30.9	9:34 AM	30.6	9:55 AM	31.1
2	8:57 AM	27.5	9:17 AM	30.9	9:37 AM	30.6	9:57 AM	31.2
3	8:59 AM	27.4	9:20 AM	30.8	9:41 AM	30.5	10:02 AM	31.2
4	9:02 AM	28.2	9:22 AM	30.6	9:43 AM	30.3	10:03 AM	31.0
5	9:04 AM	29.0	9:24 AM	30.3	9:44 AM	30.1	10:04 AM	30.8
6	9:07 AM	29.0	9:29 AM	30.3	9:49 AM	30.1	10:08 AM	30.8

**Tabla 9. Emisión de gases por cámara: suerte C**

Cámara	°C	Concentraciones (ppm)			Concentraciones (TonCO <sub>2</sub> eq)			Total
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	(TonCO <sub>2</sub> eq)
C1-T0	27,6	1,75	0,42	308,32	2,42E-08	1,91E-07	4,68E-07	6,83E-07
C1-T1	30,9	1,77	0,54	495,57	2,45E-08	2,46E-07	7,52E-07	1,02E-06
C1-T2	30,6	1,76	0,90	770,22	2,43E-08	4,07E-07	1,17E-06	1,60E-06
C1-T3	31,1	1,80	1,05	722,02	2,49E-08	4,75E-07	1,10E-06	1,60E-06
C2-T0	27,5	1,80	0,38	166,32	2,49E-08	1,72E-07	2,52E-07	4,49E-07
C2-T1	30,9	1,98	0,46	383,02	2,73E-08	2,08E-07	5,81E-07	8,16E-07
C2-T2	30,5	1,71	0,59	851,72	2,37E-08	2,65E-07	1,29E-06	1,58E-06
C2-T3	31,1	1,73	0,63	806,08	2,39E-08	2,85E-07	1,22E-06	1,53E-06
C3-T0	27,4	1,76	0,37	314,53	2,43E-08	1,67E-07	4,77E-07	6,69E-07
C3-T1	30,8	1,80	0,45	338,19	2,49E-08	2,03E-07	5,13E-07	7,41E-07
C3-T2	30,5	1,78	0,65	618,51	2,46E-08	2,92E-07	9,38E-07	1,26E-06
C3-T3	31,2	1,81	0,65	515,78	2,50E-08	2,94E-07	7,83E-07	1,10E-06
C4-T0	28,2	1,76	0,70	296,38				
C4-T1	30,5	1,91	7,29	1.727,74				
C4-T2	30,3	1,86	12,40	2.521,98				
C4-T3	31,0	2,26	17,34	6.443,07				
C5-T0	29,0	1,90	1,22	544,15	2,63E-08	5,54E-07	8,26E-07	1,41E-06
C5-T1	30,3	1,77	0,48	245,16	2,45E-08	2,18E-07	3,72E-07	6,15E-07
C5-T2	30,1	1,77	0,42	389,72	2,45E-08	1,90E-07	5,91E-07	8,06E-07
C5-T3	30,8	1,69	0,43	726,90	2,34E-08	1,95E-07	1,10E-06	1,32E-06
C6-T0	29,0	1,80	0,29	213,38	2,49E-08	1,32E-07	3,24E-07	4,80E-07
C6-T1	30,3	1,82	1,30	544,41	2,51E-08	5,86E-07	8,26E-07	1,44E-06
C6-T2	30,1	1,81	2,17	787,10	2,50E-08	9,82E-07	1,19E-06	2,20E-06
C6-T3	30,8	1,87	2,80	867,84	2,59E-08	1,27E-06	1,32E-06	2,61E-06
Máximo	31,2	2,26	17,34	6.443,07	3,12E-08	7,84E-06	9,78E-06	1,76E-05
Mínimo	27,4	1,69	0,29	166,32	2,34E-08	1,32E-07	2,52E-07	4,07E-07
Max.Aj.	31,2	1,98	2,80	867,84	2,73E-08	1,27E-06	1,32E-06	2,61E-06
Min. Aj.	27,4	1,69	0,29	166,32	2,34E-08	1,32E-07	2,52E-07	4,07E-07
			Mineralización		4,96E-07	7,33E-06	1,61E-05	2,39E-05
					2%	31%	67%	100%

registrado por la soca de manejo comercial y la soca de manejo limpio. De estas emisiones, el 67% corresponde a dióxido de carbono, el 31% a óxido nitroso y el 2% a metano. A diferencia de las otras dos suertes analizadas, esta mostró

un porcentaje mayor de emisiones de óxidos nitrosos. En la FIGURA 29 pueden observarse las emisiones en toneladas de dióxido de carbono equivalente, registradas en cada una de las cámaras de muestreo. Las series T0, T20, T40 y T60 representan el tiempo transcurrido después de haber sido cerrada la cámara y son equivalentes a los 0, 20, 40 y 60 minutos transcurridos después de cerrar la cámara.

La figura permite apreciar una alta variación en la concentración de los gases al interior de las seis cámaras muestreadas. Llama la atención que los niveles más alto y más bajo no están necesariamente relacionados con el tiempo transcurrido entre muestra y muestra, así por ejemplo, la concentración de gases transcurridos sesenta minutos de inicio del muestreo, sólo es la más alta en la cámara 6, donde alcanza un valor de  $2,61 \times 10^{-6}$  Ton $CO_2eq$ , mientras que en las cámaras 1, 2 y 3, la concentración de gases aumenta hasta los 40 minutos y de ahí en adelante disminuye levemente.

En la cámara 5, la concentración de las emisiones se reduce en los primeros veinte minutos y luego empieza a aumentar, aunque sin alcanzar su valor inicial de concentración (termina con una concentración menor a la inicial al final del muestreo). Las FIGURAS 30 a 32 corresponden a los niveles de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, por cámara en cada momento de muestreo.

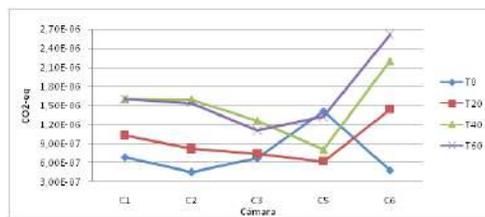


Figura 29. Emisiones de  $CO_2eq$  equivalente por cámara por tiempo de muestreo

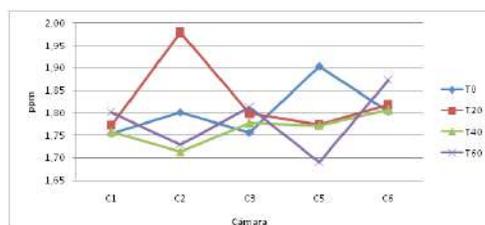
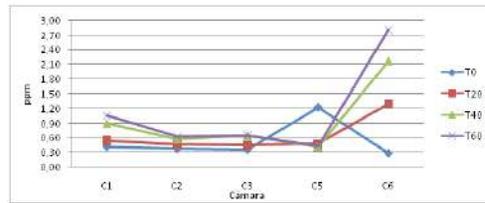
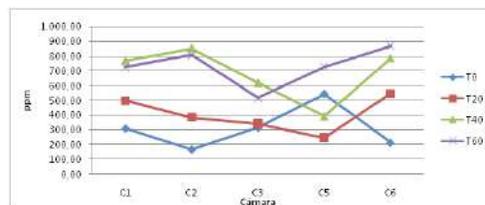


Figura 30. Emisiones de metano por cámara por tiempo de muestreo



**Figura 31. Emisiones de óxido nítrico por cámara por tiempo de muestreo**



**Figura 32. Emisiones de dióxido de carbono por cámara por tiempo de muestreo**

En la FIGURA 30 puede observarse que la concentración del metano al interior de las cámaras tiene un alto nivel de fluctuaciones. Su mayor concentración la alcanza en la cámara 2 a los 20 minutos de muestreo (1,98 ppm) y la menor en la cámara 5, transcurridos 60 minutos de muestreo (1,69 ppm). Solo en la cámara 6, la concentración al final del muestreo es mayor.

En cuanto al comportamiento del óxido nítrico, como se aprecia en la FIGURA 31, en cinco de las seis cámaras las menores concentraciones se alcanzan al inicio del muestreo y la más altas transcurridos 60 minutos. Asimismo, el flujo de emisiones más alto se presenta en la cámara 6, donde se alcanzan las concentraciones extremas de 0,29 ppm al inicio y 2,80 ppm al final, mientras que en la cámara 5 se observa, por una parte, un flujo aparentemente negativo de emisiones, y por otra que la concentración más alta se obtiene al inicio y la más baja al final.

Las emisiones de dióxido de carbono en esta suerte (FIGURA 32) muestran un nivel de emisiones relativamente constante en un rango de 166,32 a 867,84 ppm en las seis cámaras. En las cámaras 5 y 6, la concentración de  $CO_2$  es mayor transcurridos los 60 minutos del muestreo, mientras que en las cámaras 1, 2 y 3, el mayor nivel se alcanza transcurridos los primeros 40 minutos.

## DISCUSIÓN

### FUENTES DE EMISIÓN

#### EMISIONES POR COMBUSTIÓN

Las emisiones provenientes de la combustión móvil de los tractores empleados en las labores de preparación de suelo fueron estimadas de forma teórica y de forma experimental. En la estimación teórica se utilizaron los factores de emisión del diesel colombiano (Accefyn, 2003), para la estimación experimental se empleó un equipo medidor de  $CO_2$  marca Luthron que identifica la concentración de  $CO_2$  en ppm en el aire, cada 6.66 segundos.

De las nueve labores que hacen parte de los procesos de preparación de suelo aplicados en el ingenio, las que presentaron el mayor nivel de concentración de  $CO_2$  durante la operación del tractor, fueron las de: descepada, subsolada y aplicación de abonos. La descepada y la subsolada son las dos primeras labores que se llevan a cabo para preparar el suelo para la siembra de plantilla, por lo tanto demandan un mayor potencia de la máquina, al tener que preparar suelos compactados por el tránsito de los tractores empleados en la cosecha. La aplicación de abonos, por otra parte, es una labor en la que debe removerse el suelo a una profundidad de 25 a 35 cm, lo que también demanda alta potencia. Por lo tanto, puede afirmarse que los resultados obtenidos en las mediciones son los esperados, teniendo en cuenta la demanda de potencia de las actividades desarrolladas, pues cuando la labor demanda mayor fuerza de la maquinaria, el tractor debe trabajar a mayores rpm, lo que incrementa el consumo de combustible y con ello, el nivel de emisiones de  $CO_2$ .

Teniendo en cuenta las emisiones generadas por cada labor de preparación de suelo y la combinación de labores que hace parte de cada tipo de preparación de suelo, se calcularon las emisiones generadas por tipo de preparación. En la TABLA 10 se presentan las labores que hacen parte de cada tipo de preparación de suelo.

Cabe anotar que en la lista de preparación de las socas no se incluyó la aplicación de abonos, dado que esta es una labor que no se lleva a cabo en todas las preparaciones de soca: como se pudo observar en las socas analizadas, mientras la de manejo comercial recibió dos aplicaciones de abonos, la de manejo limpio no recibió ninguna.

**Tabla 10. Labores por tipo de preparación del suelo**

Tipo	Labor	Pases (#)	Emisión promedio medida (ppm)	Tiempo de ejecución (minutos)
Convencional 1	Descepada	2	321	60
	Subsolada	2	336	102
	Rastroarado	1	275	27
	Rastrillada	2	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total		2.462	466
Convencional 2	Descepada	2	321	60
	Subsolada	2	336	102
	Rastroarado	1	275	27
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total		2.170	421
Convencional 2	Descepada	2	321	60
	Subsolada	2	336	102
	Rastroarado	1	275	27
	Surcada	1	288	25
	Total		1.877	376
Liviana 1	Descepada	2	321	60
	Subsolada	1	336	102
	Rastroarado	1	292	45
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total		1.851	337
Liviana 2	Descepada	2	321	60
	Subsolada	1	283	30
	Rastroarado	1	275	27
	Rastrillada	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total		1.781	247
Liviana 3	Descepada	2	321	60
	Subsolada	1	283	30
	Rastroarado	1	292	45
	Surcada	1	288	25
	Total		1.505	220
Socas	Encalle de residuos	1	304	30
	Subsolada	2	336	102
	Cultivo-aporque	1	254	20
	Total		1.229	254

En la TABLA 11 se presentan las emisiones de  $CO_2$  por tipo de preparación de suelo, medidas experimentalmente y calculadas empleando la metodología del IPCC 2006. Para realizar dicho cálculo se utilizó el factor de emisión para el combustible diesel colombiano de 300539 mg  $CO_2/m^3$  de la UPME (Accefyn. 2003). En dicha tabla se puede observar que las preparaciones convencionales son las que mayor nivel de emisión presentan, dado que es en ellas donde se realizan pases dobles de subsolado y descepada, dos de las labores con mayor nivel de emisiones de  $CO_2$ .

**Tabla 11. Emisiones de  $CO_2$  por tipo de preparación de suelos**

Tipo	Promedio de emisiones (ppm/ha)	Emisiones de actividad medidas (TonCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Emisiones de CO <sub>2</sub> (TonCO <sub>2</sub> /Ha) (IPCC-Ecuación 3.2.4)
Convencional 1	2462	3,74E-09	7,17E-05
Convencional 2	2170	3,29E-09	6,65E-05
Convencional 3	1877	2,85E-09	6,14E-05
Liviana 1	1851	2,81E-09	5,34E-05
Liviana 2	1781	2,70E-09	5,13E-05
Liviana 3	1505	2,28E-09	4,46E-05
Soca	1229	1,86E-09	2,84E-05

Al comparar los resultados de las mediciones experimentales y los cálculos desarrollados usando la metodología del IPCC, se encontró que las experimentales reflejan menos del 1% de las emisiones calculadas, dado que los factores de emisión consideran la combustión completa del combustible quemado por los tractores, mientras que las mediciones experimentales a campo abierto tienen la interferencia de factores del entorno (viento, plantas, animales, vehículos) y son el reflejo de un punto específico de la hectárea medida. Sin embargo, el nivel de emisiones medidas sí guarda relación con la emisión calculada, en ambos casos, el tipo de preparación con mayor emisión de  $CO_2$  es la convencional, seguida por la convencional 2, la convencional 3, las preparaciones livianas y la soca, como se puede observar en las FIGURAS 33 y 34, que corresponden a las emisiones de  $CO_2$  calculadas teóricamente y medidas de forma experimental, respectivamente.

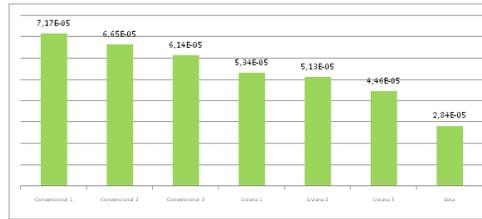


Figura 33. Emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas / tipo de preparación (TonCO<sub>2</sub>/Ha)

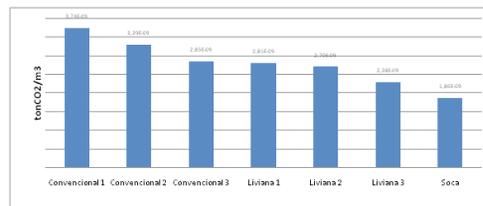


Figura 34. Emisiones de CO<sub>2</sub> medidas / tipo de preparación (TonCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>)

Al comparar las dos gráficas, es claro que las emisiones medidas experimentalmente para el tipo de preparación convencional 3 reflejan un nivel más cercano al del tipo de preparación liviana 1, que el nivel que se observa en las emisiones calculadas teóricamente, aunque conserva la posición secuencial en cuanto al nivel de emisiones en ambas metodologías de estimación.

#### EMISIONES DEL SUELO

Las emisiones generadas por el proceso de mineralización del suelo se calcularon mediante dos metodologías: el muestreo de las emisiones del suelo mediante la técnica de cámara cerrada; y el cálculo de las emisiones de N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> generadas a partir de la aplicación de abonos orgánicos y urea.

En la TABLA 12 se muestran los resultados de los gases que son emitidos por el suelo como resultado de su proceso de mineralización. De los tres tipos de suelo que fueron preparados, el que fue preparado para el levante de soca de manejo comercial reflejó el mayor nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>, equivalente, con un total de 4,70x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq, de las cuales el 88% está representado por dióxido de carbono, el 11% por óxido nitroso y el 1% por metano. Le sigue la implementada en el suelo con soca de manejo limpio, la cual tuvo una emisión total de 3,31x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq, compuesta en un 2% por metano, un 8% por óxido nitroso y un 90% por dióxido de carbono. Finalmente, el

**Tabla 12. Gases emitidos por la mineralización del suelo preparado / tipo de cultivo**

Tipo	Fuente	Concentraciones (TonCO <sub>2</sub> eq)			Total (TonCO <sub>2</sub> eq)
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	
Soca de manejo comercial	Mineralización del suelo	3,63E-07	5,19E-06	4,14E-05	4,70E-05
	Contribución por gas	1%	11%	88%	100%
Soca de manejo limpio	Mineralización del suelo	5,66E-07	2,70E-06	2,99E-05	3,31E-05
	Contribución por gas	2%	8%	90%	100%
Plantilla de manejo limpio	Mineralización del suelo	4,96E-07	7,33E-06	1,61E-05	2,39E-05
	Contribución por gas	2%	31%	67%	100%

suelo que menor cantidad de emisiones de carbono equivalente reflejó fue el preparado para la siembra de plantilla de manejo limpio, con una emisión total de 2,39x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq compuesta en un 2% por metano, 31% por óxido nitroso y 67% por dióxido de carbono.

En general, los resultados de las emisiones de los tres tipos de preparaciones de suelo analizados muestran que el gas que más se emite es dióxido de carbono, el cual, en la preparación de las socas fue superior al 80% y en la preparación de la plantilla superior al 60%. Como se puede observar, la aplicación de fertilizantes como urea, compost, lodos y vinaza, incrementa el nivel de emisiones del suelo, sin embargo, el tipo de suelo y la etapa de crecimiento del cultivo aparentemente inciden en el nivel de gases emitidos. En la plantilla de manejo limpio, las emisiones de óxido nitroso y metano son más altas que en la soca de manejo comercial, a pesar de no haber recibido ninguna aplicación en su proceso de preparación; no obstante, la soca de manejo comercial si tuvo una emisión de dióxido de carbono, bastante mayor a la de la plantilla.

## **GEI IDENTIFICADOS Y SU PARTICIPACIÓN EN LA HUELLA DE CARBONO**

### **HUELLA DE CARBONO MEDIDA**

Teniendo en cuenta las emisiones de gases medidas experimentalmente durante las labores de preparación de suelo y las muestras extraídas del proceso de mineralización del mismo en cada una de los tipos de cultivo, se desarrolló el cálculo de la huella de carbono generada por una hectárea de cultivo de caña de azúcar en sus procesos de preparación de suelo, inmediatamente después del corte de caña de azúcar y antes de la ejecución de las labores de levante.

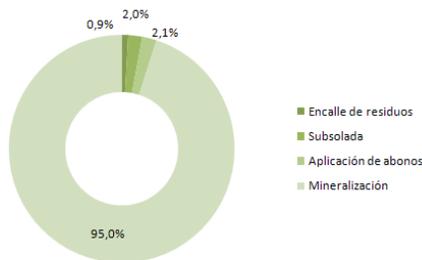
Para calcular la huella de carbono de cada tipo de preparación, se sumaron las emisiones promedio de cada una de las labores mecanizadas y la suma total de las emisiones medidas durante el muestreo en suelo, valores que representan las emisiones de la preparación del suelo en una hectárea de suelo, durante el periodo de tiempo específico en el que se tomaron las muestras. Como se puede observar en los resultados obtenidos (TABLA 13), las labores de preparación de suelo empleadas en la soca de manejo comercial arrojaron la mayor cantidad de emisiones de carbono equivalente, con un total de  $4,94 \times 10^{-5}$  TonCO<sub>2</sub>eq, de las cuales el 95% corresponde al proceso de mineralización del suelo; la siguiente huella en magnitud fue la del cultivo soca de manejo limpio, con una emisión de  $3,55 \times 10^{-5}$  TonCO<sub>2</sub>eq, representada en un 94% por las emisiones de mineralización del suelo; finalmente la preparación con menor nivel de emisiones fue la de plantilla de manejo limpio, la cual presentó emisiones por  $2,76 \times 10^{-5}$  TonCO<sub>2</sub>eq, con un 86% debido al proceso de mineralización del suelo y un 14% debido a la aplicación de una secuencia convencional 1 en las

**Tabla 13, Huella de carbono por tipo de cultivo**

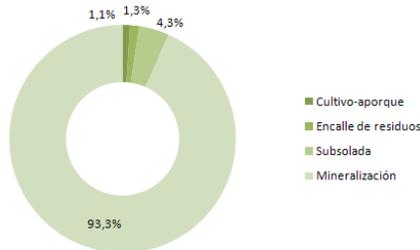
Tipo	Labor	TonCO <sub>2</sub> eq	Participación
Soca de manejo comercial	Encalle de residuos	4,606E-07	0,9%
	Subsolada	9,880E-07	2,0%
	Aplicación de abonos	1,020E-06	2,1%
	Mineralización	4,696E-05	95,0%
	Total	4,943E-05	100,0%
Soca de manejo limpio	Cultivo-aporque	3,847E-07	1,1%
	Encalle de residuos	4,606E-07	1,3%
	Subsolada	1,529E-06	4,3%
	Mineralización	3,314E-05	93,3%
	Total	3,551E-05	100%
Plantilla de manejo limpio	Rastroarado	4,179E-07	1,5%
	Surcada	4,369E-07	1,6%
	Rastrillada	8,873E-07	3,2%
	Decepada	9,741E-07	3,5%
	Subsolada	1,020E-06	3,7%
	Mineralización	2,392E-05	86,5%
	Total	2,766E-05	100%

**Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar**

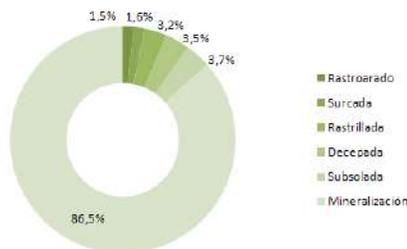
labores mecánicas. Este evidencia la diferencia en el nivel de emisiones debidas a la combustión móvil cuando se prepara el suelo para una plantilla, frente a las emisiones por combustión móvil para una soca, puesto que en el primer caso se requiere de una mayor cantidad de labores mecanizadas en la secuencia de preparación, lo que incrementa la cantidad de emisiones y puede variar según el número de pases de cada labor que se ejecuten. En las FIGURAS 35, 36 y 37, con esta misma información, se destaca la importante participación del proceso de mineralización del suelo en las emisiones totales.



**Figura 35. Soca de manejo comercial (TonCO<sub>2</sub>eq / labor)**



**Figura 36. Soca de manejo limpio (TonCO<sub>2</sub>eq / labor)**



**Figura 37. Plantilla de manejo limpio (TonCO<sub>2</sub>eq / labor)**

En la Tabla 14 se presenta la cantidad de GEI que corresponde los procesos de mineralización del suelo y combustión de la maquinaria agrícola empleada.

**Tabla 14. Emisiones medidas por gas**

Tipo	Fuente	Concentraciones (TonCO <sub>2</sub> eq)			Total
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	(TonCO <sub>2</sub> eq)
Soca de manejo comercial	Mineralización del suelo	3,63E-07	5,19E-06	4,14E-05	4,70E-05
	Combustión vehicular			2,468E-06	2,47E-06
	Total	3,63E-07	5,19E-06	4,39E-05	4,94E-05
	Participación	1%	10%	89%	100%
Soca de manejo limpio	Mineralización del suelo	5,66E-07	2,70E-06	2,99E-05	3,31E-05
	Combustión vehicular			2,37E-06	2,37E-06
	Total	5,66E-07	2,70E-06	3,23E-05	3,55E-05
	Participación	2%	8%	91%	100%
Plantilla de manejo limpio	Mineralización del suelo	4,96E-07	7,33E-06	1,61E-05	2,39E-05
	Combustión vehicular			3,74E-06	3,74E-06
	Total	4,96E-07	7,33E-06	1,98E-05	2,77E-05
	Participación	2%	26%	72%	100%

#### HUELLA DE CARBONO CALCULADA

La huella de carbono se calculó con base en los parámetros del IPCC 2006 (Waltron et al., 2006), considerando el consumo de combustible en la ejecución de las labores de preparación de suelo y las cantidades de urea y nitrógeno agregadas al suelo en la preparación que recibió aplicación de abonos.

Para calcular las emisiones de N<sub>2</sub>O se consideró un contenido de 1% de nitrógeno en el compost y de 0,4% en la vinaza, con base en información suministrada por el ingenio. En cuanto a las emisiones generadas por los lodos, se tomó en cuenta la composición química de los lodos de filtro presentada por Aguilar et al. (2010), según la cual su contenido de carbono es de 20% y su relación C/N de 38,40.

Según los resultados de dicho cálculo, la aplicación de estos abonos genera una emisión de 1,2 TonCO<sub>2</sub>eq. En la TABLA 15 se presenta el cálculo de las emisiones generadas a partir de la aplicación de vinaza, urea, compost y lodos

**Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar**

en la preparación de suelos para un cultivo de caña de azúcar tipo soca de manejo comercial, en ella se puede observar que de los fertilizantes aplicados en esta preparación del suelo, los fertilizantes con mayor nivel de emisiones fueron el compost y los lodos, con 0,67 y 0,42 TonCO<sub>2</sub>eq, respectivamente.

**Tabla 15. Cálculo de emisiones de suelos gestionados**

Ítem	Vinaza	Urea	Compost	Lodos
Cantidad aplicada / ha	9000 lt	100 kg	10 ton	12 ton
Contenido de N	0,01494 kg/m <sup>3</sup>		100 kg/ha	62,5/ha
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O (kg/ha)	0,000658934		1,571133815	0,981958634
Emisiones directas de CO <sub>2</sub> (kg/ha)		73,3313333		
Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O por deposición atmosférica y volatilización (kg/ha)	0,000131787		0,314226763	0,196391727
Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O por lixiviación (kg/ha)	0,00014826		0,353505108	0,220940693
Emisiones totales por fertilización (TonCO <sub>2</sub> eq)	2,80E-04	7,33E-02	6,67E-01	4,17E-01

Con los datos del cálculo de emisiones de los suelos gestionados (TABLA 15) y los datos de las emisiones por combustión móvil, calculados con base en el combustible consumido (TABLA 16), se calculó la huella de carbono para cada uno de los tipos de preparación de suelos.

**Tabla 16. Emisiones de CO<sub>2</sub>eq / labor de preparación de suelos**

Labor	Emisiones calculadas (TonCO <sub>2</sub> eq)	Combustible consumido (gl/ha)
Descepada	1,48E-05	13
Subsolada	1,98E-05	10
Rastroarado	3,00E-06	6
Rastrillada	3,84E-06	5
Surcada	7,93E-07	2
Cinzelada	3,99E-06	7
Aplicación de abonos	1,21E-06	3
Encalle de residuos	1,42E-06	3
Subsolado convencional	1,98E-05	10
Cultivo-aporque	7,59E-07	2

De acuerdo con los cálculos desarrollados (TABLA 17), el tipo de preparación de suelo que mayor huella de carbono generó fue la preparación de suelo para una soca de manejo comercial, con una emisión total de 1,16 TonCO<sub>2</sub>eq/ha, seguida por la preparación para la soca de manejo limpio, con una emisión de 2,84x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq/ha, y finalmente por la preparación de la plantilla de manejo limpio, con una emisión de 7,17x10<sup>-5</sup> TonCO<sub>2</sub>eq/ha.

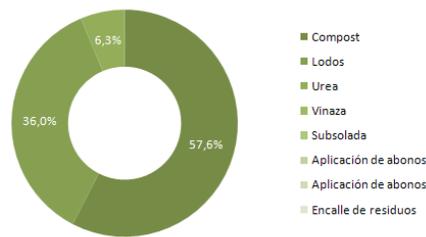
En la huella de carbono de la preparación de suelos de la soca de manejo comercial, se puede evidenciar que el 99,99% de las emisiones de carbono equivalente, corresponde a la aplicación de abonos nitrogenados (vinaza, compost, lodos) y urea. Dado que los otros dos tipos de preparación no incluían en su proceso la aplicación de fertilizantes, la huella de carbono de la preparación aplicada a la soca de manejo comercial es notoriamente más alta que la de los otros procesos de preparación. En cuanto a las preparaciones para cultivo

**Tabla 17. Huella de carbono calculada por tipo de cultivo**

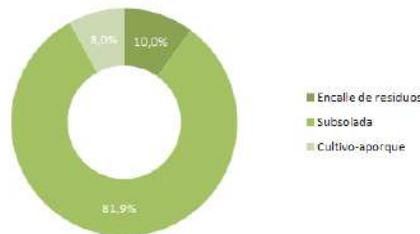
Tipo	Labor	TonCO <sub>2</sub> eq	Participación
Soca de manejo comercial	Compost	6,672E-01	57,6%
	Lodos	4,170E-01	36,0%
	Urea	7,333E-02	6,3%
	Vinaza	2,798E-04	0,0%
	Subsolada	2,324E-05	0,0%
	Aplicación de abonos	3,303E-06	0,0%
	Aplicación de abonos	3,303E-06	0,0%
	Encalle de residuos	2,848E-06	0,0%
	Total	1,158E+00	100,0%
Soca de manejo limpio	Encalle de residuos	2,848E-06	10,0%
	Subsolada	2,324E-05	81,9%
	Cultivo-aporque	2,278E-06	8,0%
	Total	2,837E-05	100%
Plantilla de manejo limpio	Decepada	2,962E-05	41%
	Subsolada	2,324E-05	32%
	Rastrillada	1,025E-05	14%
	Rastroarado	6,663E-06	9%
	Surcada	1,902E-06	3%
	Total	7,168E-05	100%

**Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación del suelo de un cultivo de caña de azúcar**

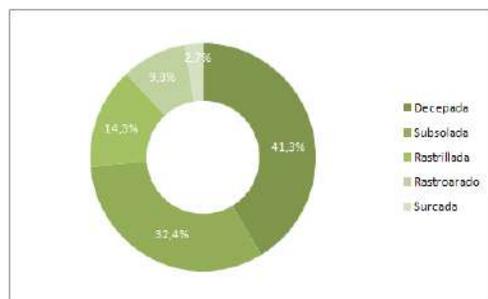
de manejo limpio, se puede evidenciar que la preparación de suelos para la siembra de plantilla tiene una huella de carbono mayor que la preparación para la soca, dado que esta tiene una mayor cantidad de labores mecanizadas en su proceso de preparación, lo que demanda un mayor consumo de combustible y genera, por lo tanto, una mayor cantidad de emisiones de carbono equivalente. En las FIGURAS 38, 39 y 40 se puede apreciar la contribución porcentual de cada fuente de emisión.



**Figura 38. Huella de carbono calculada para una soca de manejo comercial**



**Figura 39. Huella de carbono calculada para una soca de manejo limpio**



**Figura 40. Huella de carbono calculada para una plantilla de manejo limpio**

#### ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Las estimaciones de la huella de carbono de los procesos de preparación de suelos para cada uno de los tipos de cultivo analizados se hicieron para una hectárea específica de suelo, sobre terrenos ubicados en el Valle del Cauca, a una altura de 1.000 msnm en promedio.

Las categorías incluidas en el inventario de gases emitidos por cada uno de los procesos de preparación de suelos implementados fueron: uso de tierra, perteneciente al sector de agricultura, silvicultura y otros usos de tierra [AFOLU, *Agriculture, Forestry and Other Land Use*], y combustión móvil, perteneciente al sector de energía, según las directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI. De acuerdo con las categorías analizadas, los gases incluidos en el inventario fueron  $CO_2$ ,  $N_2O$  y  $CH_4$ .

Los datos de actividad para la categoría de uso de tierra fueron recopilados bajo la técnica de muestreo en cámara cerrada. En cada uno de los suelos preparados se tomaron 24 muestras del gas emitido y bajo la metodología de cromatografía de gases, se determinó la composición de la muestra en cuanto a  $CO_2$ ,  $N_2O$  y  $CH_4$ . Estos datos representan las emisiones del suelo durante un periodo de 45 a 60 minutos. Por cuestiones de presupuesto y tiempo, fueron tomados una única vez, por tanto, aunque representan la actividad mineral real del suelo, no son extrapolables para desarrollar otras predicciones. Una buena práctica para mejorar esta incertidumbre es el muestreo completo del comportamiento del suelo durante todo su periodo de cultivo, con esta información, ya sería posible determinar los flujos de emisión y la absorción de los gases analizados.

En cuanto a los datos de actividad de los tractores durante la ejecución de cada una de las labores de preparación, se debe tener en cuenta que las mediciones representan las condiciones reales de operación del tractor, en cuanto a consumo de combustible y emisión de gases, sin embargo, las mediciones de  $CO_2$  se desarrollaron en campo abierto, por tanto, las condiciones climáticas, el viento, la presencia de plantaciones y de otros vehículos en zonas aledañas, no fueron consideradas y constituyen una fuente de incertidumbre en los datos.

Para determinar la incertidumbre de los datos de actividad, se exploró la distribución de las mediciones obtenidas para cada una de las labores de preparación de suelos y las emisiones del suelo de cada una de las suertes preparadas, utilizando histogramas, acompañados de una función de

suavizamiento de Kernel (función empírica de los datos) y de la distribución normal que mejor se adapta a los datos, usando el aplicativo Stata 13.

Los histogramas obtenidos muestran que, en general, los datos no siguen una distribución normal. En consecuencia fue necesario estimar los intervalos de confianza utilizando el método de *bootstrap* (o *bootstrapping*) como lo recomienda el IPCC (Watson et al., 2006). Para cada una de las variables se tomaron 1000 muestras del 75% de los datos, es decir, para una variable de veinte observaciones (como los datos de emisiones de la suerte C) se tomaron mil muestras aleatorias, cada una con quince observaciones. A cada una de las muestras se les estimó la media y al conjunto de mil medias se le estimaron los intervalos de confianza de la forma convencional.

Debido al teorema del límite central, aunque las variables no sigan una distribución normal, las medias del muestreo repetido se aproximan a una distribución normal a medida que el muestreo tiende a infinito. Por esta razón, el intervalo sigue siendo simétrico en la media. Se podría haber corregido por sesgo y ello haría que el intervalo de confianza sea de diferente magnitud en cada una de las colas de la distribución, pero dado que este refinamiento no afecta de manera significativa los datos, se prefirió el intervalo de confianza simétrico.

En general, los intervalos de confianza estimados con *bootstrapping* son más grandes que los estimados de una distribución normal. En la TABLA 18 se muestran los intervalos de confianza estimados para cada una de las variables de los datos de actividad. Los intervalos de confianza muestran que hay una incertidumbre no despreciable en las emisiones del suelo de las suertes: A, soca de manejo comercial; B, soca de manejo limpio; y C, plantilla de manejo limpio.

En la misma tabla, se puede observar que de las labores mecanizadas de preparación de suelos, la que mayor nivel de incertidumbre presentó fue la subsolada, la cual tuvo una emisión promedio de 336ppm, con una incertidumbre de  $\pm 10,57\%$ , que corresponde, con un rango de probabilidad del 95%, a un intervalo de 300,49ppm a 371,50ppm. En cuanto a las muestras de mineralización del suelo, las emisiones de la suerte con soca de manejo comercial reflejaron una incertidumbre de  $\pm 41,49\%$  que, con un rango de probabilidad del 95%, corresponde a un intervalo de variación entre 1,14 grCO<sub>2</sub>eq y 2,77 grCO<sub>2</sub>eq.

**Tabla 18. Intervalos de confianza**

Variable	Mean	Intervalo de confianza (95%)		%
Decepada (ppm)	321	307,2028	334,7972	4,30
Subsolada (ppm)	336	300,4961	371,5039	10,57
Rastro-arado (ppm)	275,4667	266,2469	284,6865	3,35
Rastrillada (ppm)	292,4	284,6714	300,1285	2,64
Surcada (ppm)	287,9333	277,7513	298,1153	3,54
Cinzelada (ppm)	282,8	269,0916	296,5084	4,85
Aplicación de abonos (ppm)	325,6	317,4196	333,7804	2,51
Encalderesiduos (ppm)	303,6	292,4305	314,7695	3,68
Subsolado convencional (ppm)	336	299,5686	372,4314	10,84
Cultivo-aporque (ppm)	253,5333	238,6269	268,4398	5,88
Suerte A (grCO <sub>2</sub> eq)	1,956715	1,144869	2,768561	41,49
Suerte B (grCO <sub>2</sub> eq)	1,381023	1,059263	1,702783	23,30
Suerte C (grCO <sub>2</sub> eq)	1,196028	0,8430269	1,549029	29,51

**COMBINACIÓN DE INCERTIDUMBRES**

Para estimar la incertidumbre de la huella de carbono medida experimentalmente para cada uno de los tres procesos de preparación de suelos, se empleó el método de propagación de errores (ECUACIÓN 5), que corresponde a la ecuación 3.2 de las directrices del IPCC (Waldron et al., 2006), donde: las  $U_i$  hacen referencia a los porcentajes de incertidumbres de cada variable (TABLA 15) y las  $x_i$  corresponden a los promedios de cada una de las variables.

$$U_{Total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times X_1)^2 + (U_2 \times X_2)^2 + \dots + (U_n \times X_n)^2}}{|X_1 + X_2 + \dots + X_n|} \quad (5)$$

Empleando la ECUACIÓN 5, de acuerdo con la secuencia de labores que fue aplicada en cada uno de los tipos de cultivos preparados, se obtuvo la incertidumbre combinada de la huella de carbono calculada experimentalmente. En la TABLA 19 se puede observar que, con una incertidumbre de 4,48%, la huella de carbono de la soca de manejo limpio es la que presenta mayor nivel de incertidumbre, no obstante, en términos generales, el nivel de incertidumbre

de las huellas calculadas es relativamente pequeño, lo cual indica que son una buena aproximación a las emisiones reales para los tipos de cultivo descritos.

**Tabla 19. Incertidumbre combinada de la huella experimental**

Tipo	Labor	Valor
Soca de manejo comercial	Encalle de residuos	1247577,30
	Aplicación de abonos	669189,44
	Subsolada	12605269,15
	Mineralización	6590,94
	Numerador	3811,64
	Denominador	965,20
	Incertidumbre	3,95
Soca de manejo limpio	Encalle de residuos	1247577,30
	Subsolada	12605269,15
	Cultivo-aporque	2222007,61
	Mineralización	1035,29
	Numerador	4009,47
	Denominador	894,51
	Incertidumbre	4,48
Plantilla de manejo limpio	Decepada	1903627,28
	Subsolada	12605269,15
	Rastroarado	850047,12
	Rastrillada	597312,58
	Surcada	1036731,24
	Mineralización	1246,10
	Numerador	4122,41
	Denominador	1514,00
Incertidumbre	2,72	

### **ANÁLISIS COMPARATIVO: HUELLAS DE CARBONO MEDIDAY CALCULADA**

En los valores de huella de carbono obtenidos experimental o teóricamente es posible evidenciar que la mayor contribución a las emisiones de carbono equivalente está relacionada con los procesos de mineralización del suelo, los cuales generan emisiones de óxidos nitrosos y dióxido de carbono

principalmente. En el cálculo teórico sólo es posible evidenciar la participación del suelo en las emisiones de  $CO_{2eq}$ , cuando hay aplicación de fertilizantes nitrogenados y urea, por lo tanto, en las preparaciones de la soca y la plantilla de manejo limpio, estas emisiones no son consideradas porque durante su proceso de preparación, estos productos no son adicionados. En la TABLA 20 se presentan las dos huellas de carbono (calculada teóricamente y medida experimentalmente), separadas por fuente de emisión y con el porcentaje de participación de cada una de estas fuentes.

**Tabla 20. Huella de carbono (calculada vs medida)**

Tipo	Fuente	Total calculado		Total medido	
		Ton $CO_{2eq}$	%	Ton $CO_{2eq}$	%
Soca de manejo comercial	Mineralización del suelo	1,158E+00	99,9972	4.69612E-05	95,01
	Combustión vehicular	3.269E-05	0,0028	2.46825E-06	4,99
	Total	1.157814548	100	4.94294E-05	100
Soca de manejo limpio	Mineralización del suelo		0	3,31E-05	93,31
	Combustión vehicular	2,84E-05	100	2.37E-06	6,69
	Total	2,84E-05	100	3.55E-05	100
Plantilla de manejo limpio	Mineralización del suelo		0	2.39E-05	86,49
	Combustión vehicular	7,17E-05	100	3,74E-06	13,51
	Total	7,17E-05	100	2,77E-05	100

En la huella de carbono medida para la preparación de suelos de la soca de manejo comercial, es posible evidenciar que el proceso de mineralización genera el 95% de las emisiones, mientras que la combustión móvil tan solo representa el 5% de ellas. En la huella de carbono del proceso de preparación de la soca de manejo limpio, el 93% de la huella corresponde al proceso de mineralización del suelo y el 7% al proceso de combustión. Finalmente, en la huella de la preparación de la plantilla de manejo limpio, la mineralización del suelo representó el 86% de las emisiones y el proceso de combustión el 14%. En esta comparación de porcentajes, se puede evidenciar que el proceso de mineralización del suelo que más emite es el de la soca de manejo comercial, donde el 95% de la huella de carbono corresponde a esta fuente. Por otra parte, la preparación de suelos que tiene mayor proporción de emisiones por el proceso de combustión móvil, es la plantilla de manejo limpio, con un 14% de emisiones debidas a este proceso.

Por otra parte, en la huella de carbono calculada, las emisiones por mineralización de los fertilizantes aplicados en la suerte A, representan el 99,99% de las emisiones, las cuales no son consideradas en las emisiones producidas por las otras dos preparaciones de suelo, dado que la soca de manejo limpio y la plantilla de manejo limpio, no reciben aplicación de fertilizantes durante su proceso de preparación de suelos.

En este ejercicio de estimación de las huellas de carbono teórica y experimental de los procesos de preparación de suelos, se encuentra que las mediciones experimentales no son comparables con las emisiones calculadas para los procesos de preparación de suelo, dado que hacen referencia a momentos de emisión diferentes. Las emisiones por mineralización del suelo, en la huella de carbono experimental, presentan la emisión de gases durante un periodo de tiempo específico (el tiempo de muestreo), mientras que el cálculo teórico presenta el valor de la emisión de gases después de que su proceso de reacción química en el suelo está completo, es decir, considera las emisiones totales, independientemente del tiempo que tarden.

Al comparar las huellas de carbono de cada tipo de preparación de suelo medidas y las calculadas, es claro que la huella de carbono del proceso de preparación de suelos para una soca comercial fue la mayor (experimental o teóricamente), lo que guarda relación con el impacto de la mineralización del suelo sobre el nivel de emisiones de los procesos de preparación. La huella de carbono calculada para los procesos de preparación de la soca y la plantilla de manejo limpio, en cambio, se encuentran invertidas con respecto a la huella de carbono medida experimentalmente; dado que en la huella de carbono calculada para estos dos tipos de preparación de suelo no se tuvo en cuenta las emisiones del suelo durante su proceso de mineralización, el resultado solo reflejan el efecto de la cantidad de labores mecanizadas que se desarrollan en su preparación.

Analizando las fuentes de emisión de cada una de las huellas de carbono medidas frente a las calculadas, se puede encontrar que, tanto en las mediciones experimentales, como en los cálculos teóricos, el proceso de mineralización del suelo es el de mayor impacto. De acuerdo con los cálculos realizados, de los fertilizantes aplicados, el compost y los lodos son los que mayor nivel de emisiones generan, representan el 93% de las emisiones de carbono equivalente calculadas para la soca de manejo comercial. En cuanto a las preparaciones que no recibieron aplicación de abonos, se puede observar que las emisiones

por combustión móvil de las labores de descepada y subsolada son las más representativas con respecto a la huella de carbono total calculada para estos dos tipos de preparación de suelo. En la TABLA 21 se presentan las estimaciones de la huella de carbono para cada tipo de preparación de suelo, detallada por fuente de emisión, tanto medida experimentalmente, como calculada teóricamente.

**Tabla 21. Huellas de carbono calculada y medida con detalle por labor**

Tipo	Fuente	Calculada		Medida	
		TonCO <sub>2</sub> eq	%	TonCO <sub>2</sub> eq	%
Soca de manejo comercial	Compost	6,672E-01	57,62%		
	Lodos	4,170E-01	36,02%		
	Urea	7,333E-02	6,33%		
	Vinaza	2,798E-04	0,02%		
	Subsolada	2,324E-05	0,00%	9,880E-07	2,00%
	Aplicación de abonos	6,606E-06	0,00%	1,020E-06	2,06%
	Encalle de residuos	2,848E-06	0,00%	4,606E-07	0,93%
	Mineralización			4,696E-05	95,01%
	Total	1,158E+00	100%	4,943E-05	100,0%
Soca de manejo limpio	Encalle de residuos	2,848E-06	10,04%	4,606E-07	1,30%
	Subsolada	2,324E-05	81,93%	1,529E-06	4,31%
	Cultivo-aporque	2,278E-06	8,03%	3,847E-07	1,08%
	Mineralización		100%	3,314E-05	93,31%
	Total	2,837E-05		3,551E-05	100%
Plantilla de manejo limpio	Descepada	2,962E-05	41,33%	9,741E-07	3,80%
	Subsolada	2,324E-05	32,42%	1,020E-06	3,97%
	Rastrillada	1,025E-05	14,30%	8,873E-07	3,46%
	Rastroarado	6,663E-06	9,30%	4,179E-07	1,63%
	Surcada	1,902E-06	2,65%	4,369E-07	1,70%
	Mineralización			2,392E-05	93,21%
	Total	7,168E-05	100%	2,566E-05	100%

## OPORTUNIDADES DE REDUCCIÓN

Durante el proyecto se trabajó en la caracterización de las emisiones de dos fuentes emisoras de GEI: la combustión móvil y la mineralización del suelo,

concepto que corresponde al proceso microbiano por medio del cual el nitrógeno del suelo se convierte en formas inorgánicas. La combustión móvil tiene relación con el tipo de suelo preparado, el tipo de vehículo empleado en el desarrollo de las labores mecanizadas de preparación de suelo y el tipo de combustible con el que estos operan; la mineralización, con la cantidad de fertilizantes y materia orgánica aplicada, el tipo de fertilizante aplicado y las características específicas del suelo sobre el que se hace la aplicación.

De acuerdo con los resultados de la huella de carbono estimada para cada una de las hectáreas estudiadas, las emisiones relacionadas con la aplicación de material orgánico y mineral al suelo, son las que mayor impacto generan sobre la cantidad de GEI emitidos al ambiente. Por lo tanto –y teniendo en cuenta que la huella de carbono le permitirá a la empresa conocer su aporte de GEI y compararse con otras empresas de la misma industria, dichos factores deben ser un foco de atención para definir estrategias que permitan reducir el valor de la huella de carbono del proceso de preparación de suelos para cada uno de los tipos de cultivo.

La mayor huella de carbono fue generada por la soca de caña de azúcar de manejo comercial, la cual en su proceso de preparación de suelo recibió la aplicación de tres fuentes de materia orgánica: vinaza, compost y lodos; y un fertilizante sintético: urea. En los resultados de las muestras de gases tomadas con posterioridad a la ejecución de las labores de preparación, el suelo emitió un 88 % de  $CO_2$ , 11 % de  $N_2O$  y 1% de  $CH_4$ . De acuerdo con el material nitrogenado y la urea ( $CO(NH_2)_2$ ) aplicada al suelo, se esperaba que el mayor porcentaje de emisiones proviniera del  $CO_2$  y el  $N_2O$ , pues los procesos de desnitrificación, nitrificación y reducción del material orgánico y de la urea, generan emisiones de estos dos gases especialmente. Por lo tanto, se puede evidenciar que los resultados reflejan el impacto de las emisiones que son consecuencia de la aplicación de material orgánico y urea –como lo considera el IPCC en Waldron et al., 2006–, al obtenerse una mayor cantidad de emisiones de gases en dicha suerte, así como un mayor porcentaje de este, correspondiente a  $CO_2$  y  $N_2O$ .

La siguiente huella en magnitud fue la soca de manejo limpio, la cual no recibió ningún tipo de aplicación de materia orgánica, pero sí reflejó una emisión de  $CO_2$  (91%),  $N_2O$  (8%) y  $CH_4$  (2%). Esta suerte con cultivo tipo soca se encuentra en un periodo de transición a suelo orgánico, por lo tanto, en el último año no ha recibido fertilizantes minerales y su suelo ha estado en

proceso de mejoramiento, por medio de la aplicación de material orgánico, lo cual. Esto, como se puede evidenciar, incide en que la proporción de emisiones de  $N_2O$  sea muy cercano al registrado por la soca de manejo comercial.

Finalmente, como se dijo, la menor huella de carbono fue medida en la plantilla de manejo limpio, la cual emitió una menor cantidad de gases, sin embargo, en la distribución porcentual de los gases emitidos, a diferencia de las socas, tuvo un porcentaje de emisiones de  $N_2O$  del 31%, más de dos veces el porcentaje registrado por las socas. El alto nivel de emisiones de  $N_2O$  en esta suerte puede estar relacionado principalmente con la condición orgánica del suelo, el cual, en los últimos ocho años sólo ha recibido aplicaciones de material orgánico, el cual aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo y enriquece su capacidad para albergar actividad biológica (Pinzón, 2010). Adicionalmente, el cultivo, en su estado de plantilla, debe extraer del suelo la mayor cantidad posible de nutrientes para lograr el brote de las yemas, lo cual genera un proceso de mineralización más intenso (Carmo et al., 2013). En cuanto a los otros gases, el  $CH_4$  se mantuvo en una emisión del 2%, pero el  $CO_2$  disminuyó a 67%.

Con los resultados de las mediciones realizadas en el suelo de cada tipo de cultivo, es posible evidenciar que la aplicación de material orgánico y mineral en el proceso de preparación de suelos para el cultivo de caña de azúcar incrementa la cantidad de emisiones de GEI, sin embargo, la distribución porcentual de emisión de cada gas parece ser afectada también por factores como la calidad del suelo y la etapa de crecimiento de la planta.

Según Carmo et al. (2013), las emisiones de  $N_2O$  y  $CO_2$  se incrementan significativamente cuando los fertilizantes orgánicos se aplican junto con fertilizantes minerales, pero en especial cuando se utilizan residuos de cosecha. De acuerdo con los resultados de dicha investigación, cuando se adiciona urea con vinaza sobre un cultivo con plantilla de caña, las emisiones se incrementan alrededor del 340% con respecto a las emisiones de una aplicación sólo de urea. Igualmente, cuando se adicionan más de 14 ton/ha de residuos de caña sobre un cultivo de soca, las emisiones de  $CO_2eq$  se incrementan hasta siete veces cuando se adiciona esta misma cantidad de residuos sin aplicación de vinaza. A pesar de que el factor de emisión del suelo varía de un país a otro, la importancia del estudio de Carmo et al., es que presenta evidencia de que el uso de la vinaza y los residuos de caña de azúcar, como fertilizantes orgánicos del suelo, tiene una fuerte incidencia sobre las emisiones de  $N_2O$ , por lo que deben

ser utilizados en las cantidades adecuadas, de manera que no se incremente la huella de carbono generada durante el proceso de preparación de suelo.

Los resultados de la investigación de Carmo et al. (2013) y la alta cantidad de la materia orgánica que es aplicada al suelo en el proceso de preparación para el levante de la soca de caña de azúcar de manejo comercial, abren una oportunidad a futuras investigaciones en las que se pueda determinar la mezcla adecuada de vinaza, residuos de caña, urea, compost y lodo que generen una menor huella de carbono sin afectar la productividad del cultivo, por lo que es recomendable que el ingenio inicie la cuantificación de los residuos de caña que son dejados sobre cada hectárea de suelo.

En cuanto a los resultados de las emisiones de  $CO_{2eq}$  generadas por los procesos mecanizados de preparación de suelos, la huella de carbono con mayor participación de emisiones por combustión la tuvo el proceso de preparación de suelos para una plantilla de manejo limpio, con un 13.51% de sus emisiones, generadas por las labores mecanizadas de preparación convencional 1, uno de los tipos de preparación con mayor número de labores. Después de esta, la soca de manejo limpio y la soca de manejo comercial, tuvieron un nivel de emisiones del 6,69% y 4,99% respectivamente.

El 86% de los tipos de preparación considerados incluye en su secuencia de labores la descepada y el 71% la subsolada (ver las labores por tipo de preparación en la TABLA 10.), dos de las labores que mayor nivel de emisiones de gases registraron. El ingenio donde se realizó el estudio prepara el 88,7% de las hectáreas de administración propia con el tipo de preparación convencional 1, el 4,4% con convencional 2 y el 6.9% con liviana 1. Como se puede evidenciar, este asigna el tipo de preparación que mayor cantidad de emisiones genera, a la mayor cantidad de hectáreas preparadas, pues en su secuencia de labores, incluye dos pases de descepada y subsolada, labores que si bien mejoran las condiciones de los suelos muy compactos, podrían no ser necesarias con ese nivel de intensidad en todos los grupos de suelo.

La zonificación agroecológica representa una oportunidad para reducir el nivel de emisiones generadas por la combustión móvil de los tractores agrícolas, pues teniendo en cuenta las características específicas del suelo a preparar, se podrían reducir la cantidad de labores a incluir en los procesos de preparación de ese 88.7% de hectáreas que se prepara con el método convencional 1, haciendo uso de las herramientas de la agricultura específica por sitio.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el proyecto se identificó que la combustión móvil, la mineralización del suelo y el empleo de fertilizantes orgánicos y minerales son las fuentes que inciden en la emisión de GEI durante los procesos de preparación de suelos. De acuerdo con la huella de carbono medida experimentalmente, entre el 87% y el 95% de las emisiones de GEI resultan del proceso de mineralización del suelo. Por lo tanto, a pesar de que el uso de maquinaria agrícola contribuye con la emisión de GEI, el impacto más significativo proviene de las prácticas de fertilización.

De acuerdo con los resultados de las mediciones experimentales realizadas sobre el proceso de mineralización del suelo, la diferencia de emisiones entre una soca de manejo comercial que recibió aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales, y una soca de manejo limpio que no recibió ningún tipo de aplicación fue de 28%, lo cual ratifica que las prácticas de fertilización inciden significativamente sobre las emisiones de GEI y por tanto, constituyen una fuente de reducción de la huella de carbono.

De los procesos mecanizados ejecutados en la preparación de suelos, la descepada, la subsolada y la aplicación de abonos, con un 6 %, 10 % y 7 %, respectivamente, por encima de la emisión promedio de todos los tractores, fueron los de mayor consumo de combustible y los que mayor concentración de  $CO_2$  en el ambiente generaron.

En la huella de carbono medida experimentalmente sobre la soca de manejo comercial se encontró que del total de emisiones, el 89% corresponde a  $CO_2$ , el 10 % a  $N_2O$  y sólo el 1% a  $CH_4$ ; en la soca de manejo limpio se encontró que el 90 % correspondía a emisiones de  $CO_2$ , el 8 % a emisiones de  $N_2O$  y el 2% de  $CH_4$ ; y en la plantilla de manejo limpio se encontró que el 72% de las emisiones fueron de  $CO_2$ , el 26% fueron de  $N_2O$  y el 2% correspondieron a  $CH_4$ . Lo anterior permite concluir que el gas que más emite el suelo en su proceso de mineralización es el  $CO_2$ , seguido por el  $N_2O$ . Este último fue mayor en el suelo en renovación de plantilla que en las socas.

Al contrastar la huella de carbono calculada con la huella de carbono medida experimentalmente, se encontró que en la primera no se ve reflejada la incidencia de las emisiones del suelo cuando no se hace aplicación de fertilizantes, sin embargo, en la huella de carbono medida experimentalmente,

el proceso de mineralización de suelo representó más del 86% de las emisiones de GEI en los tres tipos de preparaciones de suelo evaluados.

En cuanto a las emisiones por combustión generadas por el tractor, se pudo observar que las mediciones experimentales reflejaron menos del 1% de las emisiones esperadas, según el cálculo teórico realizado utilizando el factor de emisión para el diesel colombiano, resultado que es esperable, si se tiene en cuenta que fueron mediciones experimentales realizadas en campo abierto donde hay incidencia de factores no controlados como la cantidad y dirección del viento (que dispersan el  $CO_2$  emitido) y la absorción de  $CO_2$  de plantaciones aledañas. Al respecto queda la inquietud acerca de si las emisiones estimadas por medio del cálculo teórico están sobreestimando las emisiones reales o si las emisiones generadas por los tractores realmente son tan altas que, utilizando sólo un equipo de muestreo y bajo condiciones ambientales, se puede identificar la presencia de ese 1% en el ambiente.

Con base en las conclusiones del proyecto, a continuación se presentan las recomendaciones para tomar ventaja de los hallazgos y poder efectuar acciones de mejoramiento y reducción de la huella de carbono generada en la etapa de preparación de suelo del cultivo de caña de azúcar.

Teniendo en cuenta que el 86% de los tipos de preparaciones de suelo incluye en su secuencia de labores a la descepada y a la subsolada, se recomienda reevaluar la aplicación de los tipos de preparación de suelo convencionales, tomando como referencia la zonificación agroecológica a la que pertenece cada suerte, de manera que labores como la descepada y la subsolada sean aplicadas sólo en los suelos en los que resulte definitivamente indispensable para el crecimiento de la planta.

Dado que el tipo de combustible, el desempeño del motor y su tecnología, inciden en el nivel de emisiones de GEI de los tractores, se recomienda establecer procesos de negociación con los proveedores para emplear vehículos que trabajen con biocombustibles, y tengan mayor número de marchas, de manera que operen a menos revoluciones por minuto, consuman menos combustible y, en consecuencia, emitan menos  $CO_2$ .

Respecto de las emisiones medidas sobre la operación del tractor, se recomienda aumentar la cantidad de instrumentos y puntos de medición, para así mejorar el contraste de las mediciones tomadas en condiciones normales de operación, a pesar de la interferencia de factores como el clima y el viento.

Teniendo en cuenta la incidencia que tiene la aplicación de materia orgánica al suelo sobre el nivel de emisiones de GEI, se recomienda cuantificar los residuos de caña que son dejados en el suelo para el encalle de residuos, de manera que sea una aplicación controlada y acorde con las necesidades del suelo.

Con base en los resultados de las emisiones medidas y las investigaciones desarrolladas por otros autores, se recomienda realizar el diseño de un experimento para evaluar la cantidad óptima de cada uno de los abonos, de manera que no se aplique más de la cantidad que realmente necesita el suelo, pues el exceso de materia orgánica incrementa las emisiones de  $N_2O$ .

Finalmente, teniendo en cuenta que la información de los tratamientos aplicados al suelo durante toda su vida productiva incide en la generación de emisiones, y que esta es la principal fuente para el cálculo acertado y preciso de la huella de carbono, se recomienda sistematizar o llevar un registro centralizado del manejo que se le da a cada suerte cultivada, de manera que se cuente con un registro exacto de las fechas de ejecución de cada una de las labores o aplicaciones, las cantidades utilizadas y las condiciones que generó cada tratamiento. Esto facilitaría el acceso a la información, haciendo menos dispendiosa su recolección, pues actualmente, los registros dependen de los ayudantes y mayordomos de las suertes, quienes a veces olvidan hacer el registro en el momento en el que se desarrolla la labor, por lo que tiempo después, cuando se solicita la información, hacen el registro empleando la memoria, lo cual incrementa el nivel de incertidumbre en la calidad de la información. La sistematización de la información, además de reducir la incertidumbre y mejorar la disponibilidad de la información, promovería la futura automatización del cálculo de la huella de carbono.

De los tratamientos mencionados, en este proyecto tan solo se alcanzaron a cubrir los procesos empleados en la preparación de suelos para preparar una soca de manejo comercial, una soca de manejo limpio y una plantilla de manejo limpio. Sin embargo, todavía son objeto de investigación los procesos que ocurren en el suelo cuando se hace la renovación de una soca y durante la fertilización para el levante, la aplicación de herbicidas para el control de maleza y la aplicación de madurantes de preparación para el corte. Con una investigación sobre dichas actividades, se completaría el ciclo efectuado en campo para la siembra de caña de azúcar y se podrían generar estrategias que conduzcan a reducciones significativas de las emisiones y a modelaciones dinámicas que permitan evaluar dichas estrategias.

En cuanto a las emisiones por la combustión móvil de los tractores empleados en las labores, los resultados encontrados dejan la inquietud y abren la puerta a una nueva investigación con la que se pueda conocer a fondo lo que realmente sucede con las emisiones de  $CO_2$  en el ambiente, pues así como aparentemente son considerablemente más bajas que las calculadas teóricamente, podría darse también que fueran tan altas que, a pesar a la interferencia de factores como el clima, el viento y las plantaciones aledañas, hubiese un 1% que no se logra disolver y se alcanza a medir en el ambiente.

## REFERENCIAS

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales [Accefyn]. (2003). *Factores de emisión de los combustibles colombianos*. UPME
- Aguilar, N., Rodríguez L, D. A., & Castillo, A. (2010). Azúcar, co-productos y sub-productos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Revista Virtual-Pro*, 106(11). <https://www.virtualpro.co/biblioteca/azucar-coproductos-y-subproductos-en-la-diversificacion-de-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar>
- Arapatsakos, C. & Gemtos, T. (2008). Tractor engine and gas emissions. *Transactions on Environment and Development*, 4(10), 897-906.
- Benavides, H. & León, G. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático* [nota técnica IDEAM–METEO/008-2007]. IDEAM.
- Carmo, J., Filoso, S., Zotelli, L., de Sousa Neto, E., Pitombo, L., Duarte-Neto, P., Vargas, V., Andrade, C., Gava, G., Rossetto, R., Cantarella, H., Neto, A., & Martinelli, L. (2013). Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy*, 5(3), 267-280.
- de Figueiredo, E. B., Panosso, A. R., Romão, R., & La Scala, J. N. (2010). Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. *Carbon Balance & Management*, 5, 3-9. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-3>
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. ... & R. Van Dorland. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, In: *Climate change 2007: The physical science basis* [cap. 2]. IPCC
- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N. & Olmos, X. (2010). *Huella de carbono y exportaciones de alimentos: guía práctica*. CEPAL.
- Goldemberg, J. (2009). Biomass and energy. *Química Nova*, 32(3) 582-587.
- Larsen, H. N., & Hertwich, E. G. (2009). The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action. *Environmental Science & Policy*, 12(7), 791-798. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2009.07.010>

- Lubo, C. (2014). *Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar del Valle del Cauca* [tesis de maestría, Universidad Icesi]. [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/77754/1/lubo\\_calculo\\_huella\\_2014.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/77754/1/lubo_calculo_huella_2014.pdf)
- Madero, E., Lora, R., Valenzuela, I., Torrente, A., Castro, H. E., & Gómez, M. I. (2010). *Ciencia del suelo: principios básicos*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (1997). *Protocolo de Kioto*. ONU.
- Pinzón-Pinto, A. (2010). *Edafología*. EAE.
- Porras, V.J. (1995). Labores de cultivo, en: *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 179-189). Cenicaña.
- Rojas, J. L., & Concha, A. M. (2011). *Diseño de experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO2 generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar* [tesis de maestría, Universidad Icesi]. [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/item/5610/1/dise%C3%B1o\\_experimento\\_calculo.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/item/5610/1/dise%C3%B1o_experimento_calculo.pdf)
- Salazar-Sosa, E., Beltrán-Morales, A., Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J. A., Cueto-Wong, J. A., Vázquez-Vázquez, C., & Peña-Cabriales, J.J. Mineralización de nitrógeno en el suelo y producción de maíz forrajero con tres sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana*, 21, 569-575.
- Tudela, F. (2005). Prefacio, en: *Estándar corporativo de contabilidad y reporte* (p. 3). WBCSD – WRI – Semarnat.
- Van Rikxoort, H. (2011). *The potential of mesoamerican coffee production systems to mitigate climate change* [bachelor thesis - Wageningen University and Research Center. <https://edepot.wur.nl/248023>
- Viglizzo, E., Frank, F. C., Carreño, L. V., Jobbágy, E. G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., & Ricard, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17(2), 959-973.
- Waldron, C., Harnisch, J., Lucon, O., Mckibbon, R., Saile, S., Wagner, F., & Walsh, M. (2006). Capítulo 3: Combustión móvil. En: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 3.1–3.78, vol. 2). IGES..
- Yuttitham, M., Gheewala, S. H., & Chidthaisong, A. (2011). Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in Eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 19(17/18), 2119-2127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.017>

# MODELACIÓN DINÁMICA DE LA HUELLA DE CARBONO GENERADA EN LAS LABORES DE PREPARACIÓN DEL SUELO Y LEVANTE DE UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Lina Marcela Rodríguez Pérez, MSc.

Andrés López Astudillo, Ph.D

## **Citación**

Rodríguez, L. M. & López, A. (2019). Modelación dinámica de la huella de carbono generada en las labores de preparación del suelo y levante de un cultivo de caña de azúcar. En J. I. Claros (Ed.), *Bitácoras de la maestría: vol. 2. Huella de carbono – Dinámica de sistemas – Calidad* (pp. 95-132). Universidad Icesi.



---

## RESUMEN

---

La agricultura es una de las principales responsables de la emisión de Gases de Efecto Invernadero [GEI] a la atmósfera. La producción de caña de azúcar, en particular, contribuye significativamente con las emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e hidrofluorocarbonos (HFC) hacia la atmósfera, en un 50, 30, 19 y 1%, respectivamente. En esta investigación, se da a conocer una visión sistémica del comportamiento de la huella de carbono generada durante las labores de campo de un cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca (Colombia), teniendo en cuenta: las emisiones generadas por la combustión fósil de la maquinaria agrícola utilizada en la labranza mecánica; y las emisiones provenientes del suelo, originadas en la descomposición de los compuestos agroquímicos aplicados al cultivo.

Por medio de análisis de sensibilidad, se plantean cuatro escenarios de simulación: modificando la fracción de conversión de área comercial hacia orgánica; con diferentes tipos de preparación de suelo (convencionales y livianos); con fraccionamiento en dos aplicaciones, a treinta y sesenta días de germinación de la planta, de la dosis de agroquímicos utilizados para el levante del cultivo; y modificando esas dosis, con otras recomendadas según las características del suelo y el ciclo de cosecha. Esto se realizó con el fin de obtener propuestas de reducción de emisiones de GEI que facilite la toma de decisiones sobre prácticas agrícolas en campo. Al extrapolar la simulación a todas las hectáreas del ingenio en estudio, la fertilización ureica o amoniacal más la fertilización nitrogenada aportaron el 96% de las emisiones totales de GEI generadas por las labores agrícolas mecánicas de preparación de suelos y levante del cultivo. Al cierre, la investigación propone la adopción de prácticas agrícolas eficientes (económica y ambientalmente), para reducir el impacto ambiental en términos de la huella de carbono.

## INTRODUCCIÓN

Desde el fin de la era pre-industrial, las concentraciones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero [GEI] se han incrementado significativamente, debido a las actividades antropogénicas generalmente basadas en el uso de combustibles fósiles y a los cambios constantes en el uso de suelos. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC] (Gitai et al., 2002), durante los siglos XX y XXI, se ha presentado un aumento significativo en la temperatura promedio de la superficie terrestre de 0,7 °C. El IPCC estima que para finales del siglo XXI se presentará un ascenso de la temperatura en un rango de entre 1,4 y 5,8 °C, y un aumento en el nivel del mar desde 0,09 hasta 0,88 metros, junto con fenómenos climáticos intensos, tales como El Niño y La Niña. Se estima que para 2100 la concentración de  $CO_2$  será de 540 a 970 ppm, lo que contrasta con las 280 ppm emitidas en la era pre-industrial y las cerca de 368 ppm emitidas durante el año 2000.

La agricultura intensiva se caracteriza por una tasa de barbecho baja y un alto uso de capital, labores agrícolas, pesticidas, herbicidas y fertilizantes químicos en relación con la superficie terrestre, sus prácticas generan uno de los principales impactos ambientales, debido a: el uso frecuente de labores mecanizadas; la aplicación de diversos tipos de productos químicos que afectan significativamente los hábitats naturales de los animales salvajes y contaminan los suelos y las fuentes de agua; la compactación de los suelos, que puede reducir el rendimiento de los cultivos hasta en un 50% debido a la reducción de la aireación, el aumento de la resistencia de la raíz a la penetración, el inadecuado drenaje interno y una insuficiente disponibilidad de nutrientes en las plantas (Wolkowski & Lowery, 2008); y la reducción de la biodiversidad debido a su expansión. Como indica el International Trading Center [ITC] (2012, p. 15)

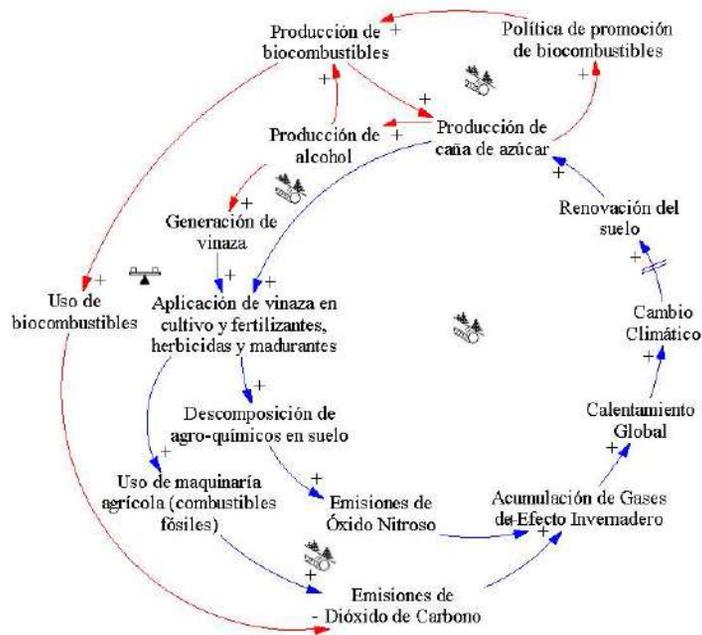
... la agricultura contribuye al cambio climático porque emite a la atmósfera cantidades significativas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ). Actividades como el cultivo, la producción de los insumos utilizados durante el cultivo (por ejemplo, los fertilizantes químicos), el procesamiento, el almacenamiento, el envasado y la distribución de productos agrícolas, emiten, todas ellas, GEI. El sector agrícola también está sufriendo directamente el efecto de los cambios que se están produciendo en nuestro clima, entre ellos, la frecuencia, cada vez mayor, de fenómenos

meteorológicos extremos tales como tormentas, inundaciones y sequías, que acortan el periodo de crecimiento y merman los rendimientos.

El cultivo de caña de azúcar es el monocultivo más importante del Valle del Cauca, requiere del uso intensivo de maquinaria agrícola y de la aplicación de agroquímicos que garanticen su adecuado desarrollo y el nivel de productividad deseado. Estas actividades generan emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global en un territorio vulnerable por su ubicación geográfica. El desconocimiento del alcance de la huella de carbono generada por el sector cañicultor en el mediano y largo plazo, contribuye a la continuidad de ejecución de prácticas agrícolas indiscriminadas sin medida alguna de su impacto ambiental.

Con fin de aportar a la construcción y aplicación de modelos dinámicos que permitan evaluar sistémicamente el comportamiento de la huella de carbono en el área de campo del sector azucarero en el Valle del Cauca, esta investigación se dirigió a modelar el comportamiento de la huella de carbono resultante de los procesos de preparación de suelo y levante de un cultivo de caña de azúcar a través de la dinámica de sistemas, y para ello se propuso: desarrollar una descripción metodológica de modelación dinámica de la huella de carbono ajustada a las labores de campo de un cultivo de caña de azúcar; modelar el comportamiento de las emisiones de  $CO_2$  por combustión fósil, el comportamiento de las emisiones de  $CO_2$  por descomposición de Urea, y el comportamiento de las emisiones de  $N_2O$  por descomposición de agro-químicos, durante las labores de preparación de suelos y levante de un cultivo de caña de azúcar; y evaluar oportunidades de reducción de la huella de carbono a nivel local, considerando los resultados cuantitativos de la investigación y las recomendaciones de expertos sobre prácticas agrícolas con menor impacto ambiental.

Se determinaron las relaciones de causa y efecto existentes entre las emisiones de GEI generadas por las fuentes de emisión identificadas en campo, las cuales se pueden observar en el diagrama causal que presenta dos ciclos reforzadores de efectos colaterales (FIGURA 1), elaborado a partir de la estructura de pensamiento sistémico (Sterman, 2000). En la FIGURA 1 se puede identificar que con el propósito de cumplir y superar la meta de producción establecida, el ingenio realiza ajustes en la programación de las labores agrícolas y en la forma de aplicación de las dosis de fertilizantes requeridas por el cultivo. Estas decisiones son tomadas teniendo en cuenta las condiciones climáticas del día



**Figura 1. Diagrama causal del problema local - caso de estudio**

y la disponibilidad de maquinaria, mano de obra e insumos principalmente; sin embargo, su ejecución genera consecuencias negativas para el medio ambiente, puesto que la toma de decisiones rápidas conlleva a la puesta en marcha de prácticas agrícolas homogéneas sobre diferentes condiciones de cultivo, para así intensificar la producción y maximizar su desarrollo. Esto, en el largo plazo, implica un aumento y una mayor concentración de los GEI en la atmósfera. Así mismo, la contribución de estas decisiones al calentamiento global afecta significativamente a la agricultura, la cual se ve afectada por factores climáticos (inundaciones, sequías) que se generan a partir del fenómeno de cambio climático, por el cual ya no es posible realizar predicciones del comportamiento climático en diferentes periodos del año. Colombia, por su ubicación geográfica, presenta un alto grado de vulnerabilidad con respecto a la variabilidad climática, el cual afecta considerablemente el periodo de crecimiento del cultivo, los niveles de rendimiento y, con ello, el nivel de producción y la adquisición de los fertilizantes orgánicos y sintéticos requeridos para aumentar la productividad del cultivo.

Es necesario aclarar que los ciclos resaltados en rojo (FIGURA 1) no se tienen en cuenta para la solución del problema, puesto que, aun cuando el alcohol es un derivado de la caña de azúcar que permite incrementar la producción de biocombustibles para contrarrestar las emisiones de  $CO_2$  por combustión fósil, esta acción refuerza la producción de caña de azúcar y por ello incrementa el uso de vinazas y residuos derivados de la caña para fertilizar el cultivo, lo que fortalece el problema base por incrementando del nivel de emisiones de  $N_2O$  que se deriva de la descomposición de los agro-químicos utilizados en el suelo.

Este análisis de la problemática a nivel local hace necesario evaluar la importancia de calcular y modelar escenarios de huella de carbono en un cultivo de caña de azúcar en alineación con la planeación estratégica del ingenio en estudio, que desea determinar el impacto ambiental generado en campo, para establecer planes de mitigación que le permitan, a futuro: obtener certificaciones ambientales; adquirir tecnologías más eficientes y bajas en carbono, que además optimicen el desarrollo del cultivo e incrementen los niveles de productividad; tener la oportunidad de expandir sus mercados a nivel internacional y participar activamente en ellos, ajustándose a sus normatividad; y, a nivel local, detectar ineficiencias en sus procesos y reducir costos en los insumos y en el uso de recursos no renovables, obteniendo beneficios ambientales, económicos y sociales, que en el largo plazo garanticen su competitividad en el mercado.

## ANTECEDENTES

En cuanto al panorama externo, durante la revisión de estado del arte inicial del proyecto, se encontraron estudios de investigación que presentan resultados de modelos ecológicos, hidrogeológicos, atmosféricos y agrícolas, por medio de lenguajes analógicos, matemáticos y numéricos, más no modelos enfocados en modelación dinámica (López et al., 2014).

Respecto del sector agrícola, en los sistemas de ganado se describieron algunos modelos de emisiones de  $CH_4$  por desperdicios sólidos, aplicados en fincas lecheras de países desarrollados (Schils et al., 2007; Olesen et al., 2006; Horng et al., 2004). Asimismo, en los suelos tropicales de China, Estados Unidos y Australia, se analizó el comportamiento de la huella de carbono en diferentes tipos de labranza, específicamente en los cultivos de arroz, trigo, maíz y caña de azúcar (Pannkuk et al., 1998; Wang et al., 2006; Li et al., 2010).

Küstermann et al. (2010), utilizando el software *Repro*, modelaron el desarrollo de cultivos agrícolas orgánicos y convencionales, con el fin de soportar el balance de energía, flujo de carbono y emisiones de GEI, y concluyeron que el mejoramiento de la gestión en la práctica agrícola convencional conlleva a reducir las pérdidas de nitrógeno hasta los niveles más bajos obtenidos en las prácticas orgánicas.

Brown et al. (2005) estudiaron en un cultivo de caña de azúcar, las emisiones de  $N_2O$  generadas por la descomposición de los fertilizantes nitrogenados en suelos gestionados.

Cabe mencionar que ninguno de los trabajos revisados tuvo en cuenta la quema de desperdicios y combustibles fósiles usados en las industrias del respectivo sector.

Al interior de la Universidad Icesi, el grupo de investigación *Icubo* de la Facultad de Ingeniería desarrolla, desde 2011, un proyecto de investigación para el cálculo de la huella de carbono en un cultivo de caña de azúcar de la región en estudio, específicamente para un ingenio de producción de caña comercial y orgánica.

La medición de la huella de carbono inició con la investigación realizada por Concha y Rojas (2011), quienes obtuvieron el cálculo teórico de la huella de carbono generada por las fuentes móviles utilizadas durante las labores de campo, considerando tres tipos mecanizados de labranza tradicional –convencional 1, liviana 2 y liviana 3–, y de labranza reducida en el cultivo de caña, y concluyeron que bajo el tipo de labranza reducida es posible obtener una disminución de más del 50% del  $CO_2$  generado en comparación con las labores de preparación liviana, lo que además representa un menor consumo de combustible y, en consecuencia, una disminución significativa de los costos de preparación de tierra disponible para el cultivo.

Posteriormente, la pasantía de un estudiante de Ingeniería Industrial permitió registrar completamente los procesos productivos en la labor de campo y elaborar una herramienta inicial de medición de la huella de carbono, y desarrollar luego el proyecto de estimación de la huella de carbono para una hectárea cultivada con caña de azúcar orgánica (Ballesteros & Sotelo, 2013), a partir del cual se pudo concluir que el tipo de fertilizante con mayor índice de toneladas por hectárea de  $CO_2$ -eq es el compostaje, con un 97.25%, respecto de la vinaza y el *GreenLife*, y que el proceso que mayor impacto tiene, medido

en toneladas por hectárea de dióxido de carbono equivalente [ $CO_2$ -eq] en referencia al consumo de energía es la aplicación de Vinaza (97.26%).

En 2013, en el marco del programa Jóvenes Investigadores de Colciencias, se realizó el levantamiento y la medición de la huella de carbono en los subprocesos de la etapa de campo (Lubo, 2013); y en 2014, se desarrolló un proyecto para el cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación de suelo, para un cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca (Lubo, 2014), el cual permitió concluir que las secuencias livianas de preparación de suelo, con una huella de carbono de 0,45 ton de  $CO_2$ -eq/ha, representan una oportunidad de reducción de las emisiones de alrededor del 31% con respecto a las preparaciones convencionales del suelo.

Desde 2014, en el programa de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi se está llevando a cabo el análisis estadístico de los datos de emisiones de GEI provenientes de las fuentes de emisión en aire y suelo identificadas durante todo el ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar, sin tener en cuenta la fase de cosecha de la caña de azúcar, es decir: durante la preparación del suelo, la fertilización y el control de las malezas. Igualmente, se está desarrollando, de forma experimental, el cálculo y análisis de los flujos de GEI provenientes de estas fuentes de emisión, y el desarrollo de diagramas causales, arquetipos y modelos de simulación con escenarios para evaluar el comportamiento de la huella de carbono durante las labores agrícolas, a través de la dinámica de sistemas.

## MARCO TEÓRICO

### HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono es un indicador del inventario total de GEI presentes en la atmósfera, puede ser calculada para un producto o servicio, para todo un proceso productivo, incluso hasta llegar el consumidor final, incluyendo la gestión integral de los residuos generados por este proceso, y puede ser medido de forma directa o indirecta.

De acuerdo con el Protocolo de Kyoto (ONU, 1997), se deben considerar seis GEI: dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ). Los GEI se expresan en toneladas de  $CO_2$  equivalentes.

Las principales fuentes de emisión de los gases de efecto invernadero hacia la atmósfera están relacionadas con el uso de abonos y fertilizantes, la gestión del estiércol y el cambio en el uso de los suelos (Frohmann et al., 2012). Sin embargo, éstas varían dependiendo del sector, la empresa y el producto. En el sector agrícola, la mayoría de las emisiones provienen de los procesos realizados en los cultivos de producción de caña de azúcar, arroz, maíz y café, entre otros.

Existen dos tipos de emisiones, directas e Indirectas, las primeras provienen de fuentes propias de una organización –o controladas por ella–, las otras ocurren como consecuencia de las actividades de la organización que reporta, pero provienen de fuentes que no son de su propiedad o control. De acuerdo con Frohmann et al., (2012), existen tres tipos de niveles o campos de cobertura para la medición de la huella de carbono de un producto u organización: el primero lo conforman las emisiones directas, es decir aquellas que provienen de fuentes que son propiedad de la organización o controladas por ella; el segundo, las emisiones indirectas asociadas con la energía que consume la organización; y el tercero, las emisiones indirectas relacionadas con los insumos que la organización utiliza en sus actividades, y con lo que sucede con sus productos una vez que salen al mercado. Así, se toma en cuenta todo el ciclo de vida del producto.

La modelación en esta investigación se desarrolló con base en el alcance 1, planteado por The Greenhouse Gas Protocol (2001), el cual considera dos fuentes principales identificadas en la fase de campo: la combustión fósil proveniente de la maquinaria agrícola utilizada, tanto para las labores de adecuación y preparación del suelo– como fertilización, control de maleza y corte mecanizado–; y la descomposición de los agroquímicos aplicados sobre el suelo para el levante del cultivo.

El nivel de emisiones de  $CO_2$  depende principalmente de: la potencia del motor del tractor utilizado, la tasa de consumo de combustible relacionada con el tiempo de ejecución de la labor, el número de pases requeridos –según el tipo de preparación del suelo, convencional o liviano–, y la descomposición del fertilizante (urea) aplicado sobre el cultivo. Por su parte, el nivel de emisiones de  $N_2O$  es atribuible principalmente a: la descomposición de los fertilizantes y agroquímicos nitrogenados en los suelos cultivados, debido al proceso microbial de desnitrificación –que ocurre en condiciones anaeróbicas–, y de nitrificación –que se produce en condiciones aerobias–. Las prácticas agrícolas intensivas aumentan la concentración de sustratos de nitrógeno (N) y afectan la

estructura del suelo. La compactación del suelo generada y la reducción de su porosidad restringen el paso del oxígeno y generan un estado anaeróbico en el suelo, el cual produce altas tasas de desnitrificación y con ello aumenta el nivel de emisiones de  $N_2O$  (Bessou et al., 2011).

En esta investigación no se incluyeron los siguientes cálculos:

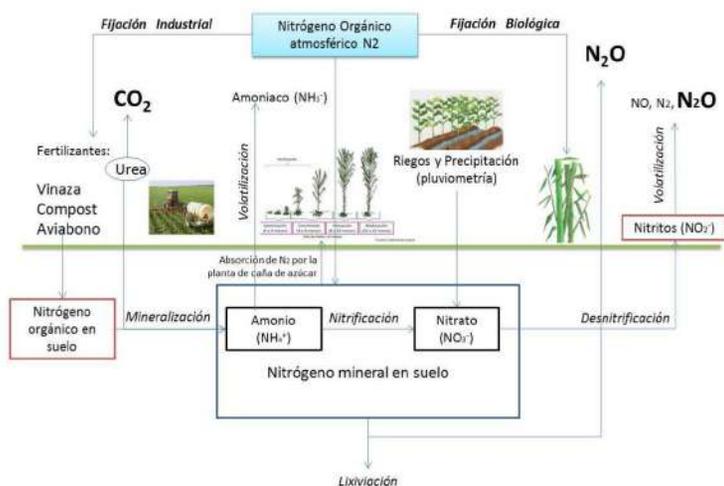
- las emisiones de  $CH_4$ , porque dependen principalmente de los procesos de combustión de la biomasa (quema de caña de azúcar) y fermentación entérica por el manejo de ganado, fuentes que se encuentran por fuera del alcance de estudio;
- las emisiones producidas por el personal de trabajo (corteros de caña, operarios de maquinaria y contratistas, entre otros), dado que su nivel de emisión de  $CO_2$  dentro de la hectárea de cultivo que se está evaluando no es significativa en comparación con el impacto ambiental generado por las labores agrícolas;
- las emisiones provenientes de las labores ejecutadas fuera de la hectárea de cultivo evaluada, como las actividades de topografía del suelo y el transporte de la maquinaria entre suertes;
- las emisiones relacionadas con el mantenimiento de los equipos; y
- las emisiones provenientes del uso de herbicidas e insecticidas aplicados para el control de malezas, porque a pesar de su efecto tóxico y contaminante, su nivel es insignificante (González & Guerra, 2015)

#### **CICLO DEL NITRÓGENO Y EMISIONES PROVENIENTES DE SUELOS GESTIONADOS**

El nitrógeno es un nutriente esencial para el desarrollo de cualquier tipo de vegetal, se encuentra dentro de un sistema cíclico de intercambios entre la atmósfera, los suelos y los seres vivos. La atmósfera es considerada la mayor fuente de reserva para este elemento, contiene un 79% de nitrógeno sobre el total de los gases (FAO, 2006). Dada su importancia, los seres humanos han incorporado este nutriente en suelo de manera orgánica, transformado en nitrógeno mineral (proceso de mineralización) para ser absorbidos por los organismos vivos y obtener altos rendimientos en los cultivos.

La amonificación es la primera etapa en la mineralización del nitrógeno orgánico hacia inorgánico, en ella se genera una descomposición enzimática de aminas y se produce amonio ( $NH_4^+$ ) (Chesworth, 2008). Cuando se aplica

un fertilizante amoniacal sobre el cultivo, por ejemplo urea, se incrementan las emisiones de  $N_2O$  debido al aporte exclusivo de nitrato, y se da un proceso de volatilización en forma de amoniaco ( $NH_3$ ), el cual puede desplazarse largas distancias en la atmósfera y reaccionar formando partículas (aerosoles) como sulfato amónico, así como la liberación de emisiones de  $CO_2$  producto de la descomposición de este fertilizante en suelo (FAO, 2015). Le sigue la etapa de nitrificación, en ella el amonio, por medio de un proceso aerobio en el que actúan bacterias nitrificantes, se convierte en nitrato ( $NO_3^-$ ), el cual queda sujeto a lixiviación –debido a la no retención de arcillas–, que se incrementa con la presencia de lluvias y el riego, dado que el suelo tiene una capacidad máxima de retención de agua que al ser superada tiende a percolarse y lixiviar. Esto, además de generar emisiones de  $N_2O$ , conlleva a una reducción de la eficiencia en el uso del nitrógeno y causa una serie de problemas medioambientales y de salubridad por su grado de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. Finalmente, mediante un proceso de desnitrificación en condiciones anaeróbicas se forman nitritos y ocurre un proceso de volatilización en el que se generan pérdidas gaseosas en términos de  $NO$ ,  $N_2$  y  $N_2O$  (FAO, 2006). La FIGURA 2 corresponde al sistema que resume el efecto de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados en el sistema suelo-planta y la generación de emisiones provenientes de estos suelos gestionados.



**Figura 2. Ciclo del nitrógeno y emisiones de GEI provenientes de los suelos gestionados (FAO, 2006)**

## CÁLCULO DE EMISIONES SEGÚN LAS DIRECTRICES DEL IPCC

Las directrices del IPCC proporcionan una guía sobre las buenas prácticas en la elaboración de un inventario nacional de GEI; contienen cinco volúmenes, divididos por sectores, y un volumen adicional sobre orientación general del cálculo de huella de carbono en todos los sectores. En la presente investigación, se consideró el tercer capítulo del segundo volumen: “Combustión móvil” (Waldron et al., 2006), y el onceavo capítulo del cuarto volumen: “Emisiones de  $N_2O$  de los suelos gestionados y emisiones de  $CO_2$  derivadas de las aplicación de cal y urea” (De Klein et al., 2006), como se detalla a continuación.

Para el cálculo teórico de las emisiones de  $CO_2$  generadas por la combustión móvil de la maquinaria agrícola utilizada en las labores de campo, se adaptó la ecuación propuesta por Waldron et al., (2006), teniendo en cuenta el factor de emisión del combustible diesel colombiano establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (Accefyn, 2003) (ver ECUACIÓN 1), donde:  $EF_j$  es el factor de emisión del combustible  $j$ ;  $PC_j$  es el poder calorífico del combustible  $j$ ; y  $PCG_{CO_2}$  es el potencial de calentamiento global del  $CO_2$ .

$$\text{Emisiones de } CO_2 \text{ por combustión} = \sum_j (\text{Combustible}_j \times EF_j \times PC_j) \times PCG_{CO_2} \quad (1)$$

Para el cálculo teórico de las emisiones de  $CO_2$  derivadas de la aplicación de urea y de las emisiones de  $N_2O$  generadas por la descomposición de los fertilizantes nitrogenados aplicados en suelo (emisiones por suelos gestionados), se adaptaron las ecuaciones recomendadas por De Klein et al., (2006).

El cálculo de las emisiones totales de  $CO_2$  derivadas de la aplicación de urea depende de la cantidad de urea aplicada en el área estudiada sobre el cultivo de caña de azúcar por el factor de emisión de  $CO_2$  propuesto por el IPCC (De Klein et al., 2006), en términos de tonelada de carbono por tonelada de urea aplicada, como se indica en la ECUACIÓN 2, donde:  $M$  es la cantidad por hectárea de fertilización con urea;  $FE_{CO_2}$  es el factor de emisión de  $CO_2$ ; y  $PCG_{CO_2}$  es el potencial de calentamiento global del  $CO_2$ .

$$\text{Emisiones de } CO_2 \text{ por urea} = \sum_j M \times FE_{CO_2} \times PCG_{CO_2} \quad (2)$$

La ecuación de emisiones totales de  $N_2O$  provenientes de los procesos de volatilización y lixiviación en ocurridos en el suelo (emisiones de  $N_2O$  por agroquímicos) se presenta en la ECUACIÓN 3, donde:  $N_j$  es el contenido de nitrógeno que aporta cada insumo;  $EFV$  es el factor de emisión de la volatilización de  $N_2O$ ;  $EFL$  es el factor de emisión de la lixiviación de  $N_2O$ ;  $\%V$  es el porcentaje de volatilización según el insumo aplicado;  $\%L$  es el porcentaje de lixiviación según el insumo aplicado; y  $PCG_{N_2O}$  es el potencial de calentamiento global del  $N_2O$ .

$$\text{Emisiones totales de } N_2O = \left[ \sum_j (N_j \times (EFV \times \%V \times EFL \times \%L)) \right] \times PCG_{N_2O} \quad (3)$$

## TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

La Teoría General de Sistemas [TGS] fue propuesta por el biólogo alemán Ludwig von Bertalanffy en 1954, representa un método de investigación holístico e integrador, en donde prevalecen las relaciones y conjuntos entre los componentes de un sistema, visto éste como un todo (Arnold & Osorio, 1998). Sus objetivos son: desarrollar una terminología general que permita describir las características, funciones y comportamientos sistémicos; desarrollar un conjunto de leyes aplicables a todos estos comportamientos; y promover una formalización (matemática) de estas leyes. Por medio de la TGS se reconoce la importancia de: estudiar los subsistemas de forma sinérgica y recursiva; evaluar las interrelaciones recíprocas entre éstos, de forma dinámica; comprender los posibles estados futuros del sistema en su totalidad; y obtener una comprensión sistémica y aproximada a la realidad del fenómeno en consideración. La TGS es el origen del Pensamiento Sistémico (PS) y una base fundamental en la modelación de sistemas en diferentes ámbitos.

## DIAGRAMA CAUSAL O DE INFLUENCIAS

Este diagrama representa la estructura de retroalimentación de los sistemas por medio de una relación causal entre los elementos que lo conforman. La estructura de su modelo se compone de flechas acompañadas de un signo (+ o -) que indica el tipo de influencia que ejerce una variable sobre otra: un signo “+” se usa cuando el cambio en la variable origen genera un cambio en el

mismo sentido en la variable destino; un signo “-” se usa cuando el efecto se da en sentido contrario. La retroalimentación del sistema se produce a causa de una cadena cerrada de relaciones causales, comúnmente conocida como bucle.

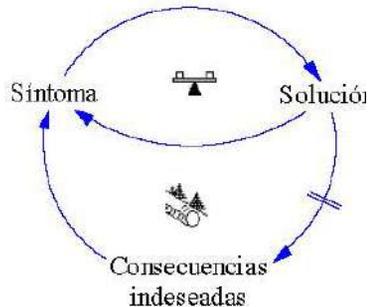
Los bucles pueden ser positivos o negativos: los positivos conllevan a un ciclo reforzador, ocasionan una situación inestable por su comportamiento dinámico de crecimiento, evolución y posible colapso del sistema; los bucles negativos tienden a estabilizar el sistema al dirigirlo hacia un objetivo determinado, por ello conducen a un ciclo compensador y generan fuerzas de resistencia que limitan el crecimiento. Un bucle de retroalimentación es positivo si el número de relaciones positivas es par o todas las relaciones son positivas, mientras que un bucle de retroalimentación es negativo si el número de relaciones negativas es impar.

En todo diagrama causal coexisten bucles positivos y negativos, la interacción entre ellos es la que finalmente determina el comportamiento global del sistema. De esta forma, es posible identificar las razones estructurales de oscilación, equilibrio, crecimiento o decaimiento y tomar decisiones para modificar los bucles causales que lo alteran. Un factor importante a considerar, tanto en los ciclos reforzadores, como en los compensadores es la demora, hay puntos donde la cadena de influencia tarde bastante tiempo en manifestarse. En los ciclos reforzadores las demoras hacen que el crecimiento no llegue con la rapidez esperada, mientras que en los ciclos compensadores pueden cambiar la conducta del sistema.

### **ARQUETIPO SISTÉMICO**

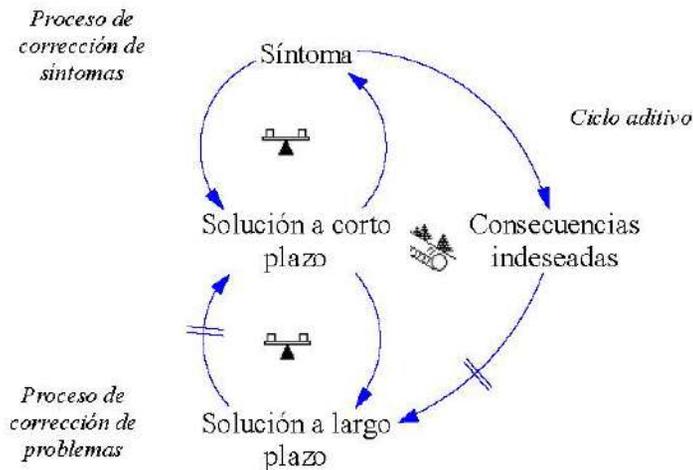
Un arquetipo sistémico es una estructura causal genérica que posee comportamientos repetitivos en diferentes contextos, los cuales permiten resolver situaciones problemáticas organizacionales. Cada arquetipo se representa mediante diagramas de ciclo causales que poseen ciclos de retroalimentación (Senge, 1995), como se describió en la sección anterior.

Un arquetipo de soluciones contraproducentes tiene como tema central la toma de decisiones rápida para aliviar los síntomas (ciclo compensador) y las consecuencias indeseadas a largo plazo que estas implican (ciclo reforzador). Estos efectos negativos pueden tardar en manifestarse, pero son acumulativos a través del tiempo y pueden afectar el objetivo que se intenta cumplir, como se presenta en la FIGURA 3.



**Figura 3. Plantilla del arquetipo soluciones contraproducentes (Senge, 1995)**

Un arquetipo de desplazamiento de carga inicia con un síntoma que conlleva a la intervención de los actores del sistema para dar una solución inmediata que elimine este síntoma. Este actuar desvía el foco de atención en el problema fundamental, lo que ocasiona una reaparición de síntomas, por lo que sus efectos colaterales en el largo plazo agravan la situación inicial. La plantilla presenta dos ciclos compensadores: un ciclo superior, que se refiere a una solución rápida para atacar el síntoma; y un ciclo inferior, que contiene acciones de fondo, complejas, que permitan abordar el problema real. Adicionalmente aparecen ciclos reforzadores que degradan el sistema y establecen un patrón de adicción que refuerza el problema, como se presenta en la FIGURA 4.



**Figura 4. Plantilla del arquetipo de desplazamiento de carga (Senge, 1995)**

Un arquetipo de límites del crecimiento presenta dos ciclos de retroalimentación: en el primero, se experimenta una fase de crecimiento causada por unos o varios ciclos reforzadores; en el segundo, después de un tiempo se alcanza el límite debido a una restricción de recursos, lo que ocasiona un colapso acelerado y una serie de acciones decrecientes que ocasionan un ciclo compensador, como se observa en la FIGURA 5.

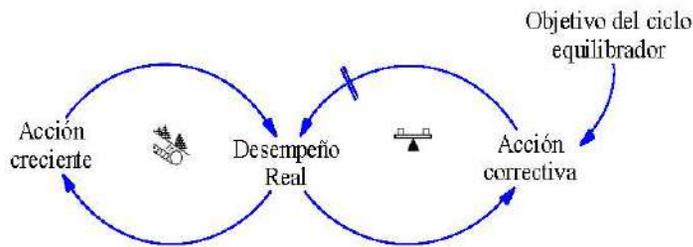


Figura 5. Plantilla del arquetipo límites del crecimiento (Senge, 1995)

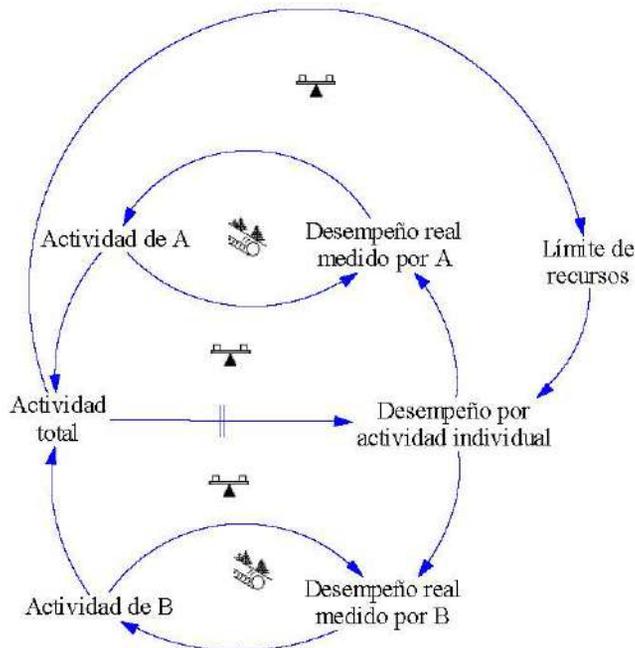


Figura 6. Plantilla del arquetipo tragedia del terreno común (Senge, 1995)

Un arquetipo de tragedia del terreno común está conformado por dos arquetipos de límites del crecimiento vinculados, los cuales tienen un límite finito en común. Se puede evidenciar una ganancia individual y un descenso en la productividad media de todo el sistema, lo cual conduce a un crecimiento individualista acelerado y a un agotamiento de los recursos disponibles (ciclo reforzador trágico), como se observa en la FIGURA 6.

### DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas es una metodología de modelación y simulación del comportamiento temporal de las variables en entornos complejos desarrollada Jay Forrester (1961), permite visualizar los estados de un sistema a través del tiempo y comprender las causas estructurales de su comportamiento. Se utiliza principalmente en ámbitos empresariales y económicos (modelos de crecimiento, modelos de ciclos coyunturales y formación de expectativas) y en relación con la sostenibilidad y el medio ambiente (dinámica poblacional, epidemias, efectos de la agricultura intensiva, industria y contaminación).

Los diagramas de Forrester –diagramas de flujo–, son un elemento característico de la dinámica de sistemas. Por medio de la formulación e introducción de ecuaciones lineales y no lineales en el diagrama causal, se puede: validar el modelo, observar la evolución de las variables en diferentes periodos de tiempo y realizar análisis de sensibilidad. Su estructura está

**Tabla 1. Simbología de los componentes de un diagrama de Forrester (“Vensim,” n.d.)**

Nombre	Símbolo
Relación de información	
Relación de material	
Flujo	
Variable de nivel	
Demora	
Nube	

compuesta por: canales de información y de materiales, flujos, variables de estado o niveles, variables auxiliares, variables exógenas, parámetros, demoras y nubes (fuentes y sumideros).

En esta investigación, la simbología de los elementos de los diagramas de Forrester son los de Vensim (TABLA 1), el software usado en ella para el modelado. No se incluye una representación simbólica para las variables auxiliares y exógenas, pues ellas no la tienen en este software.

#### MODELACIÓN POBLACIONAL O DEMOGRÁFICA

En este tipo de modelación se utilizan cadenas de envejecimiento (*aging chains*) para representar situaciones, las cuales permiten desagregar una estructura de Forrester o de niveles y flujos en múltiples categorías o cohortes, donde cada una de ellas representa una variable de nivel con un número de flujos entrantes y salientes, con demoras significativas de manera frecuente y tasas de transición entre éstas (FIGURA 7).

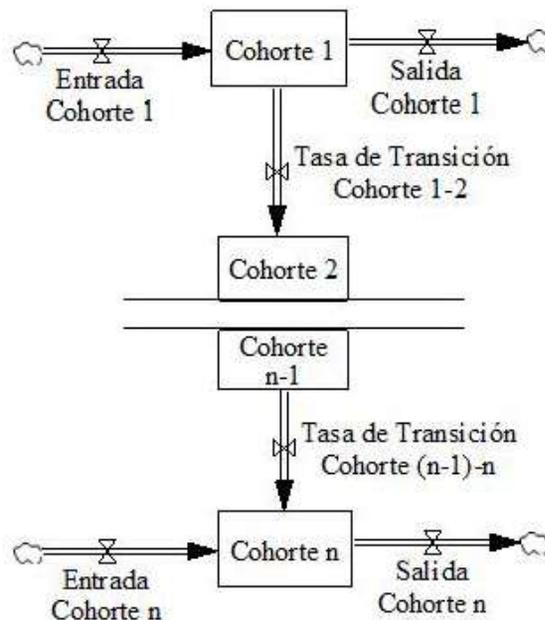


Figura 7. Estructura general de una cadena de envejecimiento (Sterman, 2000)

## MODELACIÓN DE SISTEMAS AMBIENTALES

Esta modelación es útil para: estudiar la complejidad de los sistemas ambientales, comprender las relaciones de causa efecto entre variables auxiliares y exógenas, y predecir el comportamiento de estas variables en un entorno de simulación cambiante, sin alterar el medio en estudio. La modelación ambiental es multidisciplinar, por medio de diferentes análisis de sensibilidad y aportes de expertos en el tema, puede dar lugar a la formación de políticas públicas de gran impacto sobre el ambiente y la economía.

Dada su complejidad, es necesario establecer límites de estudio y condiciones iniciales sobre las cuales se está trabajando. En algunos casos es preferible realizar un análisis micro del sistema que permita involucrar variables que sólo generan una dinámica a este nivel, dada la velocidad de las reacciones o transformaciones que ocurren en un lapso de tiempo relativamente corto (Deaton & Winebrake, 2012).

La verificación y validación de los modelos naturales por medio numéricos es imposible (Oreskes et al., 1994), debido a que este tipo de sistemas son abiertos y tienen en cuenta una gran variedad de variables que aplican a cada caso en particular. Por esta razón, es necesario delimitar muy bien el campo de acción teniendo en cuenta la capacidad limitada del modelo y lograr comprobar los resultados de una mano experta involucrada en el sistema modelado, de la cual se ha obtenido información en campo.

## MÉTODO

El proyecto se desarrolló en cuatro fases: investigación, descripción metodológica, modelación y análisis de resultados.

En la fase de investigación se realizó una revisión literaria de 55 artículos publicados en reconocidas revistas académicas internacionales sobre modelos de dinámica de sistemas enfocados en la evaluación del comportamiento de la huella de carbono en diferentes sectores, principalmente agricultura y energía –los de mayor representatividad en las emisiones de GEI en Colombia (López et al., 2014)–, y se encontró que no existe suficiente información sobre modelación dinámica de las emisiones generadas en el sector de la agricultura, específicamente en el subsector azucarero. Lo anterior evidenció la oportunidad de abordar la complejidad de esta problemática desde un enfoque de dinámica

de sistemas, el cual permitiría una mejor toma de decisiones estratégicas en la agroindustria azucarera desde los puntos de vista práctico y metodológico.

En la fase de descripción metodológica se definió la estructura que permitiera abordar el problema de investigación, considerando las cinco etapas del proceso de modelación dinámica propuesto por Sterman (2000), como se observa en la FIGURA 8. La fase inició con la articulación del problema de investigación, el desarrollo de las hipótesis dinámicas y la formulación de los diagramas causales, como los requerimientos fundamentales para definir de manera formal el modelo dinámico de simulación, para luego preparar un modelo de Forrester (flujos y niveles) y validarlo, a nivel cualitativo –por medio de la colaboración conjunta del personal académico experto en modelación dinámica, con conocimiento y experiencia en el cálculo de la huella de carbono en el sector azucarero, con el personal experto en las labores agrícolas requeridas en campo para la producción de caña de azúcar–, a través del análisis de sensibilidad, y así obtener escenarios de simulación de las emisiones generadas en un cultivo de caña comercial, en un cultivo en periodo de transición a orgánico y en un cultivo certificado como orgánico, y modificar las prácticas agrícolas para obtener una reducción en el nivel de emisiones de  $CO_2$  y  $N_2O$  a corto y largo plazo.

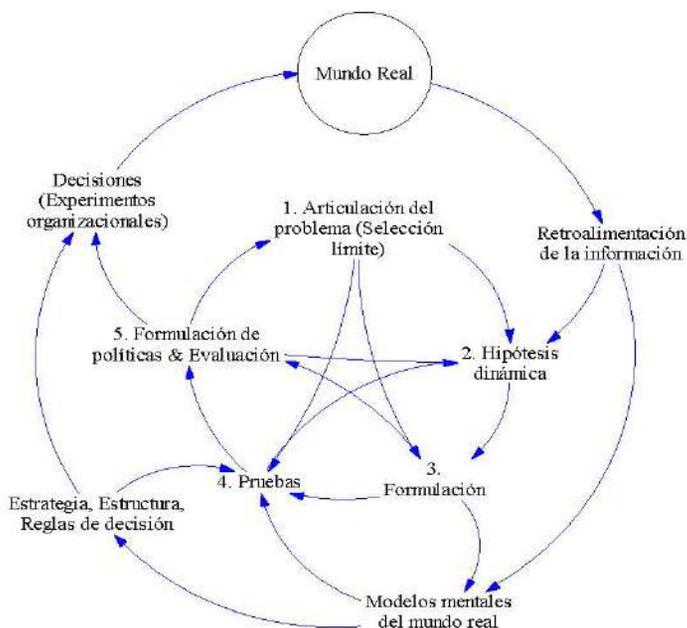


Figura 8. Proceso de modelación dinámica (Sterman, 2000)

La fase de modelación comprende la formulación del modelo propuesto, con base en la teoría de la dinámica poblacional o demográfica bajo la naturaleza de investigación descriptiva–analítica o explicativa, de acuerdo con el proceso de modelación dinámico propuesto por Sterman (2000). Para su desarrollo se utilizó el software Vensim® PLE.

Las ecuaciones que alimentaron el modelo se obtuvieron a partir del cálculo teórico de las emisiones de  $CO_2$  provenientes de la combustión móvil (Waldron et al., 2006) y del cálculo teórico de las emisiones de  $N_2O$  de los suelos gestionados y emisiones de  $CO_2$  derivadas de la aplicación de cal y urea (De Klein et al., 2006). Las ecuaciones establecidas por las directrices del IPCC (Waldron et al., 2006; De Klein et al., 2006) fueron adaptadas al caso de estudio teniendo en cuenta sus condiciones y restricciones.

Se desarrollaron cuatro análisis de sensibilidad: modificación de la fracción de área anual comercial que se convierte en orgánica; evaluación de los seis tipos de preparación del suelo establecidos por el ingenio; fraccionamiento de las dosis de aplicación de agro-químicos sobre los tres tipos de cultivos de caña de azúcar evaluados, en dos periodos de tiempo de máximo dos meses de germinación de la caña; y modificación de las dosis, según las recomendaciones para las características del suelo estudiadas y los ciclos de cosecha del cultivo.

Finalmente, en la fase de análisis de resultados, este se realizó con base en información cualitativa y cuantitativa, recopilada durante este estudio. En primer lugar, se realizó un análisis por medio de diagramas causales y arquetipos sistémicos, que permitieron mostrar una relación causal entre las actividades agrícolas y el fenómeno de cambio climático. Posteriormente, se realizaron reuniones con expertos en temas de desarrollo sostenible a nivel ambiental, los cuales contribuyeron con la validación del modelo y presentaron recomendaciones sobre prácticas agrícolas sostenibles ambientalmente que el sector azucarero debe implementar para la reducción de su huella de carbono, de acuerdo con la planeación estratégica de sus organizaciones. En segundo lugar, se propuso elaborar un poster para la comunidad científica y el gremio cañicultor con el fin de exponer un análisis integral cualitativo a partir de los resultados cuantitativos obtenidos en los escenarios de simulación del comportamiento de la huella de carbono generada por las labores de campo en el cultivo de caña de azúcar, así como la posibilidad de implementar mejores prácticas agrícolas que les permiten a los ingenios ser más competitivos no sólo en el ámbito ambiental, sino también en el contexto social y económico.

## RESULTADOS

### METODOLOGÍA PARA MODELACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO

Previo al inicio de la investigación, se realizó una revisión de 55 artículos sobre modelación dinámica enfocada en evaluar el comportamiento de la huella de carbono en los sectores con mayor nivel de emisiones de GEI: agricultura y energía. El detalle de los resultados de esta revisión se puede consultar en López et al. (2014), donde se especifica que:

... desde la era pre-industrial, la emisión de gases de efecto invernadero ha aumentado en alrededor de 70%, debido a las actividades antropogénicas. La dinámica de sistemas representa una herramienta fundamental, que permite adoptar un enfoque sistémico – complejo en los procesos de investigación de modelación del comportamiento de los gases en diferentes sectores. Este artículo revisa varios casos de estudio, principalmente en los sectores de agricultura y energía. Gracias a estos modelos, es posible identificar escenarios alternativos del indicador «huella de carbono» con el propósito de soportar decisiones estratégicas en ambientes virtuales seguros, que representen bajos niveles de riesgo, costo y tiempo. Esta revisión hace énfasis en la importancia de modelar el comportamiento de la huella de carbono como un sistema dinámico complejo, específicamente enfocado en el sector de la agricultura, el cual contribuye con el 38,1% de las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. Concluye con un trabajo futuro de investigación para la estimación del comportamiento de los gases de efecto invernadero en un sistema de cultivo de caña de azúcar, una de las mayores agroindustrias de Colombia.

Se desarrolló una propuesta metodológica para determinar la huella de carbono en los cultivos de caña de azúcar, que partió de las cinco etapas del proceso de modelación dinámica propuesto por Sterman (2000) y se dividió en cuatro fases de análisis: investigación, diseño de los modelos, validación y análisis de resultados. El trabajo realizado en la etapa de revisión permitió fundamentar el desarrollo de las hipótesis dinámicas del problema de investigación y la formulación de los diagramas causales, como requisitos fundamentales para definir de manera formal los modelos de simulación propuestos.

La descripción metodológica se encuentra documentada en López et al. (2016), donde se indica que:

... la agricultura contribuye al cambio climático al emitir a la atmósfera aproximadamente el 13.5% de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el hombre. Esto se presenta como consecuencia tanto de las labores agrícolas mecánicas –responsables de la emisión de dióxido de carbono–, como de la descomposición de los fertilizantes, herbicidas y madurantes aplicados al cultivo – los cuales emiten óxido nitroso principalmente–. El sector agrícola también sufre directamente el efecto del cambio climático, lo cual se refleja en fenómenos meteorológicos como tormentas, inundaciones y sequías, los cuales acortan el periodo de crecimiento de la planta y merman los rendimientos del cultivo. Este artículo describe la metodología identificada en el proyecto para modelar la huella de carbono generada durante la preparación y el levante del cultivo de la caña de azúcar, desde el punto de vista de la dinámica de sistemas, la cual representa una base para la formulación de modelos de simulación de mayor complejidad que permitan evaluar el comportamiento de las emisiones de GEI en el corto y largo plazo y contribuir así, como guía en la ejecución de proyectos externos. La propuesta metodológica tiene el potencial de contribuir al direccionamiento de futuras fases de la investigación actual aplicada en el sector azucarero.

## **MODELACIÓN DE EMISIONES POR COMBUSTIÓN FÓSIL**

De acuerdo con las labores mecánicas ejecutadas en el campo del ingenio azucarero en estudio para la preparación de suelos y el levante del cultivo, se desarrolló un modelo de simulación a veinticinco años, con dos análisis de sensibilidad: por cambio en la fracción de área comercial hacia orgánica y por cambio en los tipos de preparación de suelos, lo que permitió concluir que, tal como se había planteado en López et al. (2016), las prácticas agrícolas de preparación del suelo en el cultivo de cosecha tipo soca genera un menor nivel de emisiones en comparación con las prácticas de preparación del suelo a nivel de plantilla. Asimismo, durante la preparación de las plantillas, los tipos de preparación de suelos livianos representan un menor nivel de emisiones de GEI que los convencionales. Igualmente, si se tiene en cuenta la preparación

de suelos recomendada por zonificación agroecológica, se pueden obtener oportunidades de mejora en los niveles ambiental y económico.

El desarrollo de este modelo dinámico, los análisis de sensibilidad propuestos inicialmente, las limitaciones del estudio, la validez frente a estudios previos y la extrapolación de los resultados a nivel del ingenio, son detallados por Rodríguez et al. (2017), quienes explican que su estudio:

... consistió en evaluar el comportamiento de las emisiones de  $CO_2$  por combustión fósil de la maquinaria agrícola utilizada durante las labores de preparación de suelos y levante de un cultivo de caña de azúcar correspondiente a un ingenio azucarero del departamento de Valle del Cauca, como caso de estudio a nivel local. Como metodología de investigación se desarrolló un modelo de simulación desde un enfoque de dinámica de sistemas. Los principales resultados revelan que las labores mecánicas de preparación de suelos representan un 73% de las emisiones totales de  $CO_2$  con respecto a las labores mecánicas de levante de cultivo consideradas en este estudio, como son fertilización y control de malezas. Por medio de los análisis de sensibilidad desarrollados, al considerar una conversión total del área comercial a orgánica para los próximos 25 años, no se observan cambios significativos en el nivel de emisiones acumuladas de  $CO_2$  (reducción de 2,3%). Sin embargo, al cambiar el tipo de preparación de suelo de Convencional 1 a Liviana 3, éste se reduce en un 22,65%, obteniendo así una huella de carbono de 70103,8 t de  $CO_2$ -eq y un nivel de ahorro económico del 64% con respecto a consumo de combustible Diesel. Finalmente, esta investigación muestra que la adopción de prácticas agrícolas específicas por zona agroecológica representa una oportunidad de reducción de emisiones de  $CO_2$  en el largo plazo.

## MODELACIÓN DE EMISIONES POR FERTILIZACIÓN

Como estaba previsto, se desarrolló un modelo de emisiones por descomposición de los fertilizantes nitrogenados (*i.e.*, vinaza, compost, aviabono) y amoniacales o ureicos (urea) aplicados sobre los tres tipos de cultivos estudiados que interactúan en un ciclo de nitrógeno que interrelaciona el sistema suelo-planta. Este modelo se proyectó a cinco años y contó con dos análisis de sensibilidad. El primero consistió en el fraccionamiento de las dosis actuales de fertilización

para ser aplicadas a los treinta y sesenta días después del corte o después de la siembra, y por reducción de la aplicación de dosis, según la cantidad de materia orgánica contenida en el suelo (principal característica evaluada) y el ciclo de cosecha del cultivo (plantilla o soca), con el fin de evaluar el nivel de reducción de las emisiones de GEI sin afectar la eficiencia del cultivo. Estos análisis revelaron, en primera instancia, que los cultivos en proceso de transición de comercial hacia orgánico y los cultivos orgánicos emiten menos GEI que los cultivos comerciales; sin embargo, este resultado no depende de los tipos de fertilizantes (sintéticos u orgánicos), porque la fertilización orgánica genera un mayor nivel de emisiones de  $N_2O$  por su alto contenido de nitrógeno, mientras que la fertilización sintética (con urea) genera emisiones de  $CO_2$  en su proceso de mineralización. Del primer análisis de sensibilidad formulado a nivel de hipótesis no se obtuvo una respuesta positiva en términos de reducción de emisiones de GEI a mediano y largo plazo, sin embargo, al considerar las dosis de fertilización recomendadas para un suelo franco-arcilloso, bien drenado y con un contenido medio y alto de materia orgánica, además del respectivo ciclo de cosecha, surgieron significativas oportunidades de reducción de emisiones.

El desarrollo de este modelo dinámico, los análisis de sensibilidad propuestos, las limitaciones del estudio, la validez frente a estudios previos y la extrapolación de los resultados a nivel del ingenio son detallados por Rodríguez et al. (2018), cuyo trabajo:

... muestra los resultados de un modelo de dinámica de sistemas que permitió evaluar el comportamiento de la huella de carbono a 5 años, proveniente de la aplicación de fertilizantes ureicos y nitrogenados en un cultivo de caña de azúcar ubicado en el Valle del Cauca. Como metodología de investigación se utilizó la dinámica del Ciclo del Nitrógeno y las Directrices del IPCC. Los principales resultados evidencian que los tipos de cultivo en transición y orgánicos presentan un menor nivel de emisiones de GEI con respecto a los comerciales, con una reducción del 67% y 22% respectivamente. Por medio de los análisis de sensibilidad desarrollados, 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 13% (socas) y 26,5% (plantillas). Finalmente, se concluye sobre la importancia de adoptar estrategias de fertilización a nivel de productividad y reducción del impacto ambiental.

## **OPORTUNIDADES DE MEJORA EN EL SECTOR AZUCARERO**

Se desarrolló un análisis cualitativo a partir de los resultados de simulación provenientes de las dos fuentes de emisión estudiadas y de la información brindada por expertos sobre prácticas agrícolas sostenibles ambientalmente que el sector azucarero debe implementar para la reducción de su huella de carbono y adaptación al cambio climático, de acuerdo con la planeación estratégica de sus organizaciones.

López et al. (2015) presentan un detalle del análisis sistémico de esta situación a nivel global y local (sector estudiado). Este grupo de autores, usando diagramas causales y arquetipos sistémicos, analiza el nivel de afectación de la agricultura sobre el fenómeno de cambio climático y viceversa, teniendo en cuenta tanto la problemática alrededor de la huella de carbono como la degradación ambiental por el uso indiscriminado de los recursos naturales para beneficio particular de cada sector; y presenta oportunidades de reducción de la huella de carbono y adaptación al cambio climático en el sector azucarero, desde un enfoque de desarrollo sostenible.

En dicho póster, López et al., (2015) afirman que Colombia:

... es un país abundante en biodiversidad, recursos naturales y tierras fértiles (cuyo) sector agrícola representa el 2,26% del PIB (...) de acuerdo con estadísticas de Asocaña, el cultivo de la caña de azúcar es responsable del 4% del PIB agrícola a nivel nacional. Este sector satisface gran parte de la demanda alimentaria del país y tiene una gran participación en los mercados internacionales de café, banano, azúcar ...

Asimismo, citando al Ministerio de Ambiente (2015), agregan que el sector de la agricultura, silvicultura y uso del suelo representa la mayor fuente de emisiones de GEI, con un aporte del 39% de las emisiones a nivel nacional. Dicen además que, aunque Colombia es considerado “pulmón del mundo” – por su aporte inferior al 1% de las emisiones de GEI del mundo (Frohmann et al., 2010)–, sus:

... hábitos, políticas y modelos de desarrollo no se encuentran alineados con la conservación de estos recursos naturales limitados en un territorio vulnerable por su ubicación geográfica y con ecosistemas complejos y en vía de extinción.

Las actividades en campo desarrolladas por los ingenios azucareros durante la preparación del suelo y el levante y la cosecha de la caña de azúcar, amenazan a la biodiversidad, por:

- la degradación de hábitats que genera la pérdida de la cobertura vegetal y la extensión del monocultivo, degradación que también cubre la erosión, salinización y pérdida de fertilidad de los suelos por el uso intensivo de maquinaria agrícola, agroquímicos y herbicidas, respectivamente, así como la contaminación química y biológica que degrada los recursos hídricos y contribuye a la propagación de parásitos y plagas;
- la sobreexplotación del suelo por una mayor productividad agrícola, a expensas de la pérdida irreversible de los ecosistemas (deseccación de humedales, destrucción de bosques cerca de los ríos, pérdidas de corredores ecológicos y arrasamiento de áreas boscosas); y
- la introducción de especies invasoras, como es el caso de la liberación de moscas para el control de larvas en los cultivos y de avispas para el control de los huevos del gusano barrenador *Diatraea Indigenella*.

Finalmente, como amenaza antrópica se tiene el cambio climático, al cual ha contribuido notablemente la agricultura gracias a su significativo nivel de emisiones de GEI hacia la atmósfera. Este fenómeno, a su vez, ha afectado el rendimiento de los cultivos y la diversidad biológica, al generar cambios drásticos en los ambientes físicos que impiden el adecuado crecimiento de la planta y la supervivencia de algunas especies, y pone en riesgo la seguridad alimentaria, la inocuidad de los alimentos y la salud de la comunidad por su impacto negativo en la disponibilidad, el acceso y utilización de alimentos y la exposición a nuevas plagas y enfermedades que surgen sólo en determinadas temperaturas y condiciones de humedad.

Se propone abordar una perspectiva ecocéntrica, basada en el desarrollo sustentable a partir del cuidado y la conservación del medio ambiente, incorporando el pensamiento de la sostenibilidad ecológica dentro de la teoría gerencial de cada organización (Borland et al., 2014). De acuerdo con esta filosofía, se identificaron algunas oportunidades de mitigación desde un enfoque

de desarrollo sostenible, con una consciencia sobre los límites del crecimiento económico y la importancia de crear calidad de vida a mediano y largo plazo para las sociedades, teniendo en cuenta el daño medioambiental irreversible que las actividades antropogénicas han generado cientos de décadas atrás.

De acuerdo con la evaluación de la situación por medio del uso de arquetipos sistémicos, se evidencia una competencia entre el crecimiento agrícola, el crecimiento urbano y el área requerida para producir el agua suficiente para abastecer la demanda del hombre, disponibilidad que a su vez se está viendo afectada por el cambio climático. Se recomienda planear la distribución del área total de crecimiento para cubrir la demanda de agua y mitigar el cambio climático, sin afectar el crecimiento agrícola y urbano.

Por otro lado, las oportunidades de mitigación de emisiones y adaptación al cambio climático están relacionadas con el cambio en los sistemas de labranza de los suelos agrícolas, un manejo eficiente y racional de los fertilizantes y la implementación de Mecanismos de Desarrollo Limpio [MDL] y políticas de desarrollo sostenible.

En primer lugar, vale la pena mencionar que los sistemas de labranza convencionales conducen a la liberación de carbono orgánico del suelo por pérdida de materia orgánica en él. Un cambio en las prácticas agrícolas hacia los sistemas de labranza mínima, cero o conservación, no sólo reducen las tasas de liberación de carbono, sino que permiten secuestrar cantidades adicionales de él, mediante la retención de los residuos del suelo, y reducir las emisiones de  $CO_2$  por combustión fósil, dado que se requiere un menor número de pasadas e implementos para perturbar el suelo.

En segundo lugar, se propone un uso eficiente de los fertilizantes utilizados en campo y su fraccionamiento durante la etapa de germinación de la planta de caña de azúcar, lo que permite mantener las condiciones nutricionales del suelo, a la vez que se reducen las emisiones de  $N_2O$  por deficiencias en la captura de nitrógeno, cuando el sistema se encuentra desbalanceado.

En tercer lugar, se promueve la formulación de proyectos enmarcados en el enfoque del Mecanismo de Desarrollo Limpio [MDL] que se estableció bajo el Protocolo de Kyoto (ONU, 1997), diseñado para ayudar a los países en desarrollo a alcanzar un desarrollo sostenible mediante la venta de bonos de carbono a países industrializados. Colombia se ha convertido en un mercado apetecido por empresas internacionales, dado que sus bosques ocupan aproximadamente

el 54% del territorio nacional, lo que representa un gran potencial de captura de  $CO_2$  y con ello de producción de bonos de carbono.

Minambiente debería proponer actividades de mitigación mediante proyectos de reducción y captura de GEI a nivel sectorial y regional, lo que permitirá trazar unos límites de emisión y dejar un margen de permisos de emisión para ser vendidos a organizaciones internacionales que por diversas razones no pueden emitir menos de lo establecido. Aunque en Colombia aún no se sanciona legalmente la emisión de la tonelada adicional de  $CO_2$  equivalente ni existe un marco regulatorio en el que se indique un límite de emisión, se puede participar voluntariamente en este mercado internacional de bonos de carbono y así estar preparados para restricciones ambientales futuras.

Aunque existen políticas de desarrollo sostenible a nivel nacional (Florián et al., 2017) que buscan compensar la degradación ambiental, cuando ellas se implementan de forma aislada, se promueven ciclos contraproducentes como el de incrementar la demanda de caña de azúcar para reemplazar el uso de combustibles fósiles por biocombustibles, sin mejorar las prácticas agrícolas de este cultivo. A pesar de que estas acciones permiten reducir las emisiones de  $CO_2$  generadas por la quema de combustibles fósiles, el incremento en la producción de caña aumenta las emisiones de  $N_2O$ , lo que representa un mayor impacto en la atmósfera debido a que el potencial de calentamiento global del  $N_2O$  es 298 veces superior al del  $CO_2$ . No existe una medida clara sobre el nivel de emisiones que genera la producción de agrocombustibles en comparación con las emisiones por combustión fósil para establecer regulaciones al respecto.

Finalmente, se recomienda realizar estudios, como el de las prácticas climáticamente inteligentes (Steenwerth et al., 2014), en el que se presentan las prácticas agrosilvopastoriles como una alternativa de producción sostenible que incrementa la productividad de alimento por área, favoreciendo la mitigación del cambio climático a través de la captura de carbono en suelo y biomasa.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto contribuyó a reducir la escasez de literatura sobre modelación dinámica y simulación de escenarios a futuro de las emisiones generadas en el sector de la agricultura, específicamente en el sector azucarero, que se evidencio al momento de construir el estado del arte para el proyecto.

El primer modelo de simulación por combustión fósil permite concluir que las actividades mecanizadas de preparación de suelos aportan el 73% en las emisiones totales de  $CO_2$  respecto de las labores de levante del cultivo consideradas en este estudio (fertilización y control de malezas). Asimismo, la incorporación de fertilizantes representa el 63% de las emisiones en comparación con las actividades de aplicación de fertilizantes, abonos y herbicidas, y cultivo-aporque para el control de malezas.

Dada la mayor representatividad de las labores de preparación de suelos en las emisiones globales, se desarrollaron análisis de sensibilidad que permitieron concluir que las emisiones generadas por la combustión fósil de la maquinaria agrícola no depende del tipo de cultivo ni de la fracción del área comercial que inicia su proceso de transición a orgánica. Sin embargo, estas emisiones se ven afectadas por el tipo de preparación de suelo escogido, el cual se caracteriza por el número de pases y la tasa de consumo de combustible aplicada durante el tiempo de ejecución de la labor.

En conclusión, el desarrollo de este primer modelo permitió deducir que los métodos de labranza representan una fuente de reducción de emisiones de  $CO_2$ , al considerar los tipos de preparación de suelo adecuados para cada zona agroecológica, clasificados según la Guía de Recomendaciones Técnicas [GRT] bajo el enfoque de Agricultura Específica Por Sitio [AEPS] (Cenicaña, 2015). Para las zonas agroecológicas representativas del ingenio 6H1 y 11H1, se obtiene un nivel significativo de reducción de emisiones (20% y 31%), si se adoptan los tipos de labranza Liviana 1 y Liviana 3, respectivamente.

El desarrollo del segundo modelo de simulación por fertilización permitió evidenciar que 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 sólo aporta emisiones de  $N_2O$  por fertilización nitrogenada, sino también emisiones de  $CO_2$  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 de los fertilizantes orgánicos, como la vinaza, el compost y el aviabono, dado que estos últimos poseen un nivel elevado de fracción nitrogenada que aporta  $N_2O$  y que, a pesar de que este gas persiste en la atmósfera la mitad del tiempo de permanencia del  $CO_2$ , tiene un potencial de calentamiento global 298 veces mayor, y por tanto, un mayor impacto ambiental en términos de huella de carbono.

Con respecto a los análisis de sensibilidad desarrollados, se obtuvo que para 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 treinta y sesenta días de germinación del cultivo, sin tener en cuenta las características del cultivo y su ciclo de cosecha. Dado que los 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 treinta o sesenta días después de la siembra o corte, respectivamente, los cuales están sincronizados con el periodo de mayor absorción de nutrientes por parte del cultivo.

Por otro lado, dado que la base de la modelación consiste en el comportamiento dinámico del ciclo del nitrógeno –y que según las aplicaciones de fertilizantes realizadas en diferentes edades de la caña hace que varíe la concentración de nitrógeno contenido en suelo y el nivel de emisiones de GEI–, es posible replicar este modelo hacia otros tipos de cultivo, considerando el mismo comportamiento del N en suelo, pero variando los factores relacionados con las condiciones de la planta en estudio.

En el análisis realizado (López et al., 2015), se pueden evidenciar diferentes opciones de mitigación de GEI y adaptación al cambio climático, las cuales deben enfocarse de forma específica por sector. En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] ha realizado una gestión importante de cuantificación de las emisiones de GEI por sector a nivel nacional, en los años 1990 y 1994, en coordinación con el Panel de Convención sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas [UNFCCC]. Si bien este trabajo permite contribuir con un indicador de huella de carbono en el área de campo, su información no es suficiente y se requiere contar con más proyectos que permitan cuantificar las emisiones de GEI generadas por sectores económicos, con el fin de actualizar el inventario nacional de GEI mencionado; igualmente, se requiere evaluar nuevas metodologías de estimación, dado que las directrices del IPCC tienden a sobreestimar los datos, debido al nivel de aplicación de los factores de emisión y de las ecuaciones a cualquier tipo de sector. Para un país en vía de desarrollo, como Colombia, tener un nivel de mediciones actualizadas y de libre acceso, con análisis holístico del sistema agropecuario, representa la oportunidad de adquirir compromisos internacionales de limitación o disminución de emisiones de GEI y participar voluntariamente en el mercado internacional de bonos de carbono.

Conocidos los alcances de este estudio y la importancia de desarrollar modelos dinámicos de simulación del comportamiento de las emisiones de GEI generadas en los cultivos de caña de azúcar, que permitan administrar de forma eficiente los recursos y desarrollar prácticas agrícolas más limpias y sostenibles en el tiempo, se recomienda validar las siguientes hipótesis dinámicas en proyectos externos de investigación:

- la etapa de preparación de suelos y levante del cultivo el nivel de emisiones de GEI es mayor con respecto a las siguientes etapas de mantenimiento del mismo, debido a la concentración de labores requeridas en los primeros meses de ciclo de vida del cultivo;
- las variables meteorológicas y climatológicas, como temperatura, precipitación y presión atmosférica, afectan el nivel de emisiones de GEI acumulado en la atmósfera;
- las cantidades aplicadas de fertilizantes y el uso intensivo de las labores agrícolas dependen de las condiciones climáticas, las características del cultivo y su productividad; y
- la planta de caña de azúcar absorbe  $CO_2$  presente en la atmósfera a un nivel que varía según el ciclo de vida del cultivo (germinación, formación, crecimiento o maduración).

Asimismo, se recomienda desarrollar modelos de simulación que permitan establecer metas de reducción del nivel de emisiones de GEI en la atmósfera, de común acuerdo con asociaciones internacionales sobre cambio climático, con el fin de realizar análisis de sensibilidad que permitan modificar las metas establecidas y establecer niveles máximos de emisión para el sector agrícola, sin afectar la productividad del cultivo. Esto le permitirá a los ingenios establecer planes de reducción de las emisiones en el largo plazo y evaluar periódicamente el impacto de sus actividades agrícolas sobre el cultivo.

A nivel más específico, respecto del modelo de emisiones de  $CO_2$  por combustión móvil, se recomienda considerar, en futuros proyectos: el cálculo experimental de las emisiones; las variables exógenas, climatológicas y meteorológicas; y la incidencia en el nivel de emisiones de factores como la dirección y velocidad del viento y la presencia de otros vehículos cercanos durante los muestreos de GEI obtenidos en campo. Se recomienda también determinar el comportamiento del flujo de gases de las emisiones de  $CO_2$  considerando, no sólo las fuentes de emisión, sino también la absorción de los gases por parte del cultivo de caña de

azúcar, y tener en cuenta las emisiones generadas durante el transporte de los materiales entre las diferentes suertes.

Respecto del modelo de emisiones de  $CO_2$  por descomposición de urea y emisiones de  $N_2O$  por descomposición de fertilizantes nitrogenados, se recomienda, no sólo tener en cuenta el ciclo del nitrógeno para evaluar el nivel de emisiones de GEI que generan los suelos gestionados, sino también: el nivel de eficiencia y aprovechamiento del nitrógeno por parte del cultivo al aplicarse de manera fraccionada; la contaminación ambiental que genera el proceso de lixiviación de nutrientes; y la degradación del suelo y afectación de la productividad del cultivo a causa de una mayor compactación del suelo por el uso de labranzas convencionales y la renovación no constante de suelos, evidenciada en algunos casos, en donde los ingenios de producción netamente orgánica desean acumular un nivel de residuos en suelo (después de la cosecha), que también es susceptible de evaluación de su nivel de emisiones de GEI.

Se recomienda tener en cuenta los niveles de pluviometría y el riego aplicado al cultivo, dado su grado de influencia en el nivel de lixiviación y en el aumento de las emisiones de  $N_2O$  producto de un mayor lavado de nutrientes del suelo. Adicionalmente, así como se estimaron ahorros económicos con la modificación de los tipos de labranza mecanizada, como futuro alcance se recomienda evaluar los costos de fertilización por medio de la aplicación fraccionada de fertilizantes propuesta en el artículo de este modelo, como oportunidad de reducción de las emisiones de GEI. Es posible que se incremente el costo por fertilización porque requiere de un mayor número de horas de mano de obra y un mayor movimiento de la maquinaria, sin embargo, habría que evaluar el conflicto de interés que se presenta entre un menor impacto ambiental a cambio de un mayor costo de fertilización.

Finalmente, se recomienda abarcar los siguientes procesos de la cadena de valor (cosecha, producción de azúcar y transporte dentro de la organización y en relación con los clientes y proveedores), y abarcar las otras fuentes de emisión, especialmente las provenientes de la maquinaria de los contratistas y de la energía eléctrica, con el fin de alcanzar una huella de carbono de tercer nivel y establecer estrategias más específicas y efectivas para el sector azucarero.

## REFERENCIAS

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales [Accefyn]. (2003). *Factores de emisión de los combustibles colombianos*. UPME
- Arnold, M. & Osorio, F. (1998). Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas. *Cinta Moebio*, 3, 40-49.
- Ballesteros, K., & Sotelo, K. (2013). *Estimación de la huella de carbono para una hectárea cultivada con caña de azúcar desde una perspectiva orgánica* [tesis de grado, Universidad Icesi]. [http://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/handle/10906/76626](http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/76626)
- Bessou, C., Ferchaud, F., Gabrielle, B., & Mary, B. (2011). Biofuels, greenhouse gases and climate change: A review. *Agronomy for Sustainable Development (EDP Sciences)*, 31(1). <https://doi.org/10.1051/agro/2009039>
- Borland, H., Ambrosini, V., Lindgreen, A., & Vanhamme, J. (2014). Building theory at the intersection of ecological sustainability and strategic management. *Journal of Business Ethics*, 135(2), 293–307. <http://doi.org/10.1007/s10551-014-2471-6>
- Brown, L., Scholefield, D., Jewkes, E. C., Lockyer, D. R., & del Prado, A. (2005). NGAUGE: A decision support system to optimise N fertilisation of British grassland for economic and environmental goals. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109(1-2), 20–39. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.02.021>
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia [Cenicaña]. (2015). *Agricultura específica por sitio*. Cenicaña.
- Chesworth, W. (Ed.). (2008). *Encyclopedia of soil science*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9>
- Concha, A. M., & Rojas, J. L. (2011). *Diseño de Experimento para el cálculo teórico de emisiones de CO2 generadas por cuatro tipos de preparación del suelo para un cultivo de caña de azúcar* [tesis de maestría, Universidad Icesi].
- De Klein, C., Novoa, R., Ogle, S., Smith, K., Rochette, P., & Wirth, T. (2006). Capítulo 11: Emisiones de N<sub>2</sub>O de los suelos gestionados y emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la aplicación de Cal y Urea. En *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 11.1–11.56, vol. 4). IGES.
- Deaton, M., & Winebrake, J. J. (2012). *Dynamic modeling of environmental systems*. Springer-Verlag.
- Florián, M., Pabón, G., Pérez, P., Rojas, M., & Suárez, R. (Eds.). (2017). *Política nacional de cambio climático: documento para tomadores de decisiones*. MinAmbiente.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2006). *Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management*. FAO.
- Forrester, J. (1961). *Industrial dynamics*. MIT.
- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N. & Olmos, X. (2010). *Huella de carbono y exportaciones de alimentos: guía práctica*. CEPAL.

- Frohmann, A., Herreros, S., Mulder, N. & Olmos, X. (2012). *¿Cómo se mide la huella de carbono? Huella de carbono y exportaciones de alimentos: guía práctica*. CEPAL.
- Gitai, H., Suarez, A., Watson, R. T., & Dokken, D.J.. (2002). *Climate change and biodiversity*. IPCC
- González, O., & Guerra, A. (2015). *La huella de carbono del azúcar de Guatemala, Zafra 2013-2014*. <http://icc.org.gt/wp-content/uploads/2016/08/La-Huella-de-Carbono-del-Az%C3%BAcar-de-Guatemala-2013-2014.pdf>
- Hornig, J.-J., Lee, R. F., & Liao, K. Y. (2004). *Using STELLA system dynamic model to analyze greenhouse gases' emission from solid waste management in Taiwan*. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/826141>
- International Trading Center [ITC]. (2012). *Normas de la huella de carbono de productos agrícolas* [documento técnico ID:42721]. ITC.
- Küstermann, B., Christen, O., & Hülsbergen, K.-J. (2010). Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(1-2), 70–80. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.014>
- Li, H., Qiu, J., Wang, L., Tang, H., Li, C., & Van Ranst, E. (2010). Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat–maize rotation system in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(1-2), 24–33. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.003>
- López, A., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., & Sierra, B. E. (2014). Evaluating carbon footprint behavior in the agriculture and energy sectors : A review. *Sistemas & Telemática*, 12(31), 35–53.
- López, A., Lubo, C. M., Rodríguez, L. M., & Sierra, B. (2015). *Evaluación sistémica de los efectos de la actividad agrícola sobre el cambio climático: caso caña de azúcar* [documento inédito presentado durante la VIII Jornada de Divulgación de la Investigación en Icesi.
- López, A., Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Arenas, F., & Sierra, B. (2016). Propuesta metodológica de modelación dinámica de la huella de carbono en las labores de campo de un cultivo de caña de azúcar. *Ingeniería y Región*, 15, 37-47. <https://doi.org/10.25054/22161325.1177>
- Lubo, C. M. (2013). *Desarrollo de un modelo de medición de la huella de carbono para los procesos de campo del cultivo de caña, replicable a otros ingenios azucareros del Valle del Cauca*. Universidad Icesi.
- Lubo, C. M. (2014). *Cálculo de la huella de carbono en los procesos de preparación de suelo para un cultivo de caña de azúcar del Valle del Cauca*. Universidad Icesi.
- Olesen, J. E., Schelde, K., Weiske, A., Weisbjerg, M. R., Asman, W. A. H., & Djurhuus, J. (2006). Modelling greenhouse gas emissions from European conventional and organic dairy farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(2-3), 207–220. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.022>
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences. *Science*, 263(5147), 641–646.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (1997). *Protocolo de Kioto*. ONU.

## Modelación dinámica de la huella de carbono generada en las labores de preparación del suelo y levante de un cultivo de caña de azúcar

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015). *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*. FAO
- Pannkuk, C., Stöckle, C., & Papendick, R. (1998). Validation of CropSyst for winter and spring wheat under different tillage and residue management practices in a wheat-fallow region. *Agric. Syst*, 57, 121–134.
- Rodríguez, L. M. (2016). *Modelación dinámica de la huella de carbono generada durante las labores de preparación de suelo y levante de un cultivo de caña de azúcar ubicado en el Valle del Cauca* [tesis de maestría, Universidad Icesi].
- Rodríguez, L. M., López, A., Lubo, C. M., Abadía, J., Orozco, O A., Sandoval J. S., & Arenas, F. (2018). Evaluación de las emisiones de GEI por fertilización del cultivo de caña de azúcar, desde un enfoque en dinámica de sistemas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 1-17. <http://dx.doi.org/10.14482/inde.36.1.10936>
- Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Sierra, B., Arenas, F., & Lopez, A. (2017). Modelación dinámica del comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> por combustión fósil durante la preparación de suelos y levante de un cultivo de caña de azúcar. *Ingeniería y Competitividad*, 19(1), 66-76. <https://doi.org/10.25100/iyc.v19i1.2131>
- Schils, R. L. M., Olesen, J. E., del Prado, A., & Soussana, J. F. (2007). A review of farm level modelling approaches for mitigating greenhouse gas emissions from ruminant livestock systems. *Livestock Science*, 112(3), 240–251. <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.005>
- Senge, P. (1995). *La quinta disciplina en la práctica*. Granica.
- Steenwerth, K., Hodson, A., Bloom, A. J., Carter, M. R., Cattaneo, A., Chartres, C. J., ... Jackson, L. E. (2014). Climate-smart agriculture global research agenda: Scientific basis for action. *Agriculture & Food Security*, 3(1), 11. <http://doi.org/10.1186/2048-7010-3-11>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.
- The Green House Gas Protocol*. (2001). <http://ghgprotocol.org/about-us>
- Vensim* (n.d.). <http://vensim.com/>
- Waldron, C., Harnisch, J., Lucon, O., Mckibbin, R., Saile, S., Wagner, F., & Walsh, M. (2006). Capítulo 3: Combustión móvil. En *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 3.1–3.78, vol. 2). IGES.
- Wang, Z.-M., Zhang, B., Li, X.-Y., Song, K.-S., Liu, D.-W., & Zhang, S.-Q. (2006). Using CropSyst to simulate spring wheat growth in black soil zone of Northeast China. *Pedosphere*, 16(3), 354–361. [http://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60063-5](http://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60063-5)
- Wolkowski, R., & Lowery, B. (2008). *Soil compaction: Causes, concerns, and cures*. <https://soils.wisc.edu/extension/pubs/A3367.pdf>



# INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DE CALIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO: ESTUDIO DE CASO EN UN PROCESO DE COMERCIO EXTERIOR

Aura Patricia Jiménez Escobar, MSc.

Andrés López Astudillo, Ph.D

## **Citación**

Jiménez, A. & López, A. (2019). Integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro: estudio de caso en un proceso de comercio exterior. En J. I. Claros (Ed.), *Bitácoras de la maestría: vol. 2. Huella de carbono – Dinámica de sistemas – Calidad*, (pp. 133-200). Universidad Icesi.



---

# RESUMEN

---

A través de un estudio de caso desarrollado en el Valle del Cauca en 2018, en una de las cincuenta empresas más exitosas del país, se presenta cómo la integración de la gestión de la calidad en la cadena de suministro contribuye a la competitividad empresarial, desde las variables de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento, en los procesos de comercio exterior, considerando variables externas (agentes de la cadena). La revisión bibliográfica facilitó construir las herramientas de evaluación (matrices de madurez) donde se consideran seis niveles, cada uno asociado a desarrollos y avances según el progreso, desde un nivel incipiente, hasta uno de máximo desarrollo. Como dominios, se definen estrategia, controles, procesos, tecnología y recursos humanos. Como complemento al diligenciamiento asistido de las matrices, se consultó la opinión de expertos de varios niveles jerárquicos en las organizaciones que conforman la cadena de suministro. Se concluye que la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro contribuye a la competitividad empresarial en los procesos de comercio exterior al mejorar los procesos de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento entre las entidades participantes por la oportunidad que brinda en la toma de decisiones, asimismo, se identifica la necesidad de avanzar hacia mayores niveles de madurez en las prácticas colaborativas, incrementar los niveles de visibilidad –apuntando a compartir información en tiempo real– y hacia una gestión del conocimiento con mayor atención a las lecciones aprendidas. La integración de la gestión de la calidad en la cadena de suministro requiere de empresas maduras y desarrolladas, con proveedores y aliados de negocio dispuestos a integrarse vertical y horizontalmente, para ser más competitivos. Este resultado sirve como base para que futuras investigaciones amplíen el radio, incluyendo un mayor número de empresas y otros agentes de la red con alta incidencia en las operaciones de comercio exterior, lo que seguramente llevará a proponer esquemas de integración para ganar competitividad en la región.

## INTRODUCCIÓN

En un mundo globalizado, donde las organizaciones tienen acceso a diferentes mercados, la configuración de la cadena de suministro permite que los productos lleguen en el momento preciso, en la cantidad indicada y con las condiciones que el mercado exige; esas mismas circunstancias demandan que los productos cumplan con las condiciones de calidad inherentes a él, lo que da origen a nuevas, mejores y más sofisticadas cadenas de suministro; en ellas, el servicio a través de la red y los entes de gobierno juegan un papel preponderante.

En ese sentido, esta investigación se encaminó a identificar qué elementos y variables logran integrar la gestión de calidad [QM, *Quality Management*] y la gestión de la cadena de suministro [SCM, *Supplies Chain Management*] en una gestión de calidad en la cadena de suministro [SCQM, *Supply Chain Quality Management*] que facilita los procesos del comercio exterior en las empresas orientadas hacia la internacionalización, lo que permite alcanzar mayores niveles de competitividad derivados de una mayor integración y sus efectos en términos de reducción de costos de las operaciones, aprovechamiento de los acuerdos comerciales, mitigación de riesgos y desarrollo del talento humano.

El proyecto definió como su objetivo “Evaluar la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro en los procesos de comercio exterior”, y como unidad de análisis una organización empresarial del Valle del Cauca. Asimismo, formuló como objetivos específicos: estructurar la integración de la QM y la SCM en SCQM para los procesos de comercio exterior; evaluar las variables internas de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento, tanto en los procesos de comercio exterior, considerando la calidad y cadena de suministro, como en las entidades asociadas al comercio exterior que influyen sobre la SCQM; y evaluar el impacto de la integración en la SCQM respecto a los procesos de comercio exterior.

La evaluación en el Valle del Cauca permite conocer resultados de la integración entre gestión de calidad y gestión de cadena de suministro, donde se involucra, además de la relación proveedor cliente, a las entidades que participan en los procesos de comercio exterior, las cuales provienen de los sectores público y privado, y son nacionales y extranjeras, todas con desarrollos variados en sus sistemas de gestión, pero partícipes de un sistema que puede o no favorecer los procesos de comercio exterior de la empresa (López et al., 2017).

La gestión de la calidad en la cadena de suministro se considera un elemento clave para mejorar los niveles de competitividad y el desempeño en las organizaciones (Kuei et al., 2001; Foster, 2008; Rashid & Aslam, 2012; Fernandes et al., 2017) y aunque existen estudios que sustentan la afirmación planteada, aún no son suficientes y en Colombia son incipientes.

... los investigadores académicos necesitan un enfoque más centrado en la evaluación de las cuestiones de gestión de la calidad dentro de los contextos internos y externos de la cadena de suministro (Robinson & Molhotra, 2005).

Los hallazgos sugieren que la gestión de calidad facilita el aprendizaje cooperativo y mejora los procesos de aprendizaje interorganizacionales y, a nivel de la cadena de suministro, mejora la satisfacción y el desempeño (Mellat-Parast, 2013). En Colombia, gestión de calidad y gestión de cadena de suministro han sido temas abordados de forma independiente y aislada por los diferentes grupos de investigación, mientras que gestión de calidad en la cadena de suministro es un campo de investigación naciente.

Entre los estudios encontrados, un análisis de los proveedores y los inconvenientes que se presentan en la planta de producción de una empresa, desde la SCQM, permite realizar una alineación de la estrategia de la organización con los demás eslabones de la cadena de suministro, situación que redundará en planes de acción colaborativos entre proveedor y cliente, validando con ello que la SCQM mejora la productividad. Según Chávez y Figueroa (2014)

... una estrategia de cooperación con los proveedores deja como resultado una mejora de la productividad y reducción del riesgo a lo largo de la cadena de suministro al evitar inconvenientes en los procesos de manufactura debido a los materiales.

Tenorio y Zarmatí (2013), por su parte, concluyen que existen diferencias significativas en términos de la relación de calidad y calidad técnica de los productos. Respecto al desarrollo de la SCQM encuentran una inequidad en la implementación y presentan dos consecuencias según el estado de avance de las empresas: aquellas en estado menos avanzado, puede que se sientan motivadas por el líder del sector e intenten homogenizar la cadena; las otras, es probable que se sientan intimidadas por las empresas en posición competitiva y que la cadena pase a ser manejada por una o pocas empresas. Con lo anterior se

puede inferir que la SCQM produce diferencia a nivel empresarial que puede llevar a posiciones más competitivas a las organizaciones.

## CONTEXTO

Bogotá, Antioquia y el Valle del Cauca son responsables de buena parte de la dinámica económica colombiana. La suma de sus PIB corresponde a la mitad del PIB del país (DANE, 2019). El Valle, si bien es el menos activo de los tres (alrededor del 10% del PIB del país), tiene una participación superior al promedio nacional y creciente (DANE, 2019), algo importante si se considera que el crecimiento del PIB es un indicador de avances en los índices de competitividad.

Avanzar, no solo se logra por los esfuerzos individuales del sector empresarial en el mejoramiento de la calidad y en la estructuración de las cadenas de suministro, en ello contribuyen decididamente el establecimiento de políticas regulatorias favorables, el desarrollo de infraestructura y la modernización de las entidades facilitadoras del desarrollo empresarial y sus procesos para el comercio exterior.

El crecimiento del PIB del país en los últimos quince años –tal como sucede con las exportaciones no tradicionales y el número de empresas certificadas en ISO 9001– es producto, por una parte, de políticas de gobierno orientadas al impulso empresarial, la creación de organismos promotores del comercio internacional –como Pro Colombia–, la firma de acuerdos comerciales, la modernización de las entidades de gobierno, y por otra de la respuesta del sector empresarial que se refleja en el ajuste de sus procesos y productos a las exigencias del mundo.

El Banco Mundial (2018) establece como dimensiones del desempeño: la eficiencia del proceso del despacho de aduana; la calidad de la infraestructura relacionada con el comercio y el transporte; la facilidad de acordar embarques a precios competitivos; la calidad de los servicios logísticos; la capacidad de seguir y rastrear los envíos; y la frecuencia con la cual los embarques llegan al consignatario en el tiempo programado. Tanto el Fondo Monetario Internacional, como el Banco Mundial reconocen que Colombia ganando terreno, aunque muy lentamente, en materia de competitividad y desarrollo logístico.

Colombia se ha desarrollado por regiones, la cercanía a los puertos y la concentración poblacional han tenido un fuerte impacto en el desarrollo industrial. El Valle del Cauca ha estimulado el desarrollo de la infraestructura, es el tercer departamento en número de zonas francas, lo que facilita su acceso a los mercados internacionales, atrae inversión extranjera, genera un importante número de empleos e incrementa las operaciones para su internacionalización.

En materia de infraestructura portuaria los últimos diez años reflejan un avance significativo, se ha impulsado al Puerto de Buenaventura como puerta al mundo y conexión con el Pacífico y se han concentrando en el Valle del Cauca cinco terminales marítimos. En 2009 el Puerto de Buenaventura solo operaba en los terminales marítimos de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura y del Grupo Portuario, ese año inició su operación el terminal privado de Cementos Argos, en 2010 hizo lo propio el Terminal Especializada de Contenedores de Buenaventura –vendido en 2016 a la Compañía de Puertos Asociados S.A., Compas–, y en 2016 la Sociedad Puerto Industrial Aguadulce. La capacidad portuaria de Buenaventura seguirá expandiéndose en los próximos años con la entrada de: Puerto Estero de San Antonio, Delta del Rio Dagua, Puerto Solo y Puerto Maderero.

Los desarrollos en materia de infraestructura han impulsado el crecimiento del comercio exterior de las empresas, el gobierno nacional ha establecido nuevos tratados comerciales, que además de ofrecer mayores oportunidades en el mercado mundial, retan y exigen a las empresas a conocer la diversidad cultural, social y política de otras naciones, y al gobierno a trabajar con las entidades involucradas en el comercio internacional para promover un mayor desarrollo en infraestructura y mejorar la calidad de los procesos de exportación e importación, aumentando la eficiencia en los procesos y alineando la normatividad al mundo.

En los procesos de comercio exterior es necesaria la participación de un sin número de grupos de interés y agentes, cualquier omisión en una validación, embalaje, documentación, retención, firmas, puede significar, no sólo pérdidas económicas para la empresa, sino pérdida del prestigio y del reconocimiento adquirido. En contraste, las organizaciones conforman complejas redes capaces de satisfacer las necesidades del consumidor final con altos niveles de calidad. En el mundo actual la competencia no se da entre empresas sino entre cadenas de suministro, por lo que si estas no están soportadas con niveles de calidad a través de toda la red, pueden terminar involucradas en serias dificultades por cualquier falla en el sistema.

## MARCO TEÓRICO

### GESTIÓN DE CALIDAD

La calidad, a lo largo de la historia ha buscado mejorar la competitividad de las empresas, aunque el nivel de desarrollo en cada una de las áreas de las organizaciones no sea el mismo ni el nivel de calidad de empresas pertenecientes a un sector o cadena de suministro sea igual. Hoy no solo se trata de llevar un producto o prestar un servicio con calidad, sino también de responsabilidad social, sostenibilidad y calidad percibida, de preservar la imagen de calidad a través del bienestar que se ofrece a los colaboradores, a los aliados del negocio y a la sociedad. Weckenmann et al. (2015) afirman que

... cuando las organizaciones quieren satisfacer las necesidades de los clientes tienen que actuar más allá del producto real, por tanto, tienen que implementar una política de empleados justos a nivel mundial y considerar los desafíos ambientales, como la escasez de recursos para conservar su imagen (...) muchas empresas tienen que afrontar ahora los desafíos de las colaboraciones globales en desarrollo de compra, fabrica y ventas para resistir la creciente presión competitiva.

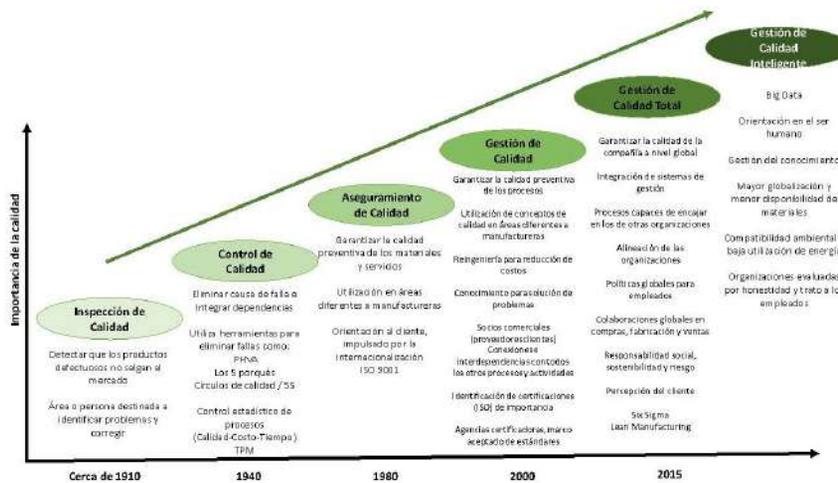
Los métodos de gestión permiten mejorar la competitividad del mercado, la capacidad de operación y el crecimiento sostenible (Xiaofen, 2013); herramientas como: círculos de control de calidad [QCC, *Quality Control Circles*], 5S, mantenimiento productivo total [TPM, *Total Productive Maintenance*], gestión de cero defectos, gestión por objetivos [MBO, *Management By Objectives*], gestión de rendimiento excelente, reingeniería de procesos del negocio, gestión eficiente, Six Sigma y Lean Six Sigma han permitido mejoras significativas en la gestión de la calidad.

Crosby (1979) con su matriz de madurez de gestión de la calidad; Garvin (1988) y sus dimensiones de calidad; El SGMM Team (2011) con su definición de dominios como agrupaciones lógicas de capacidades y características relacionadas con una red inteligente; y la ISO 9001:2015 con la formulación de los principios de gestión de calidad, representan contribuciones destacadas al desarrollo de la evaluación para medir calidad.

Los conceptos de calidad y gestión de calidad avanzan constantemente, la FIGURA 1 muestra la evolución a lo largo de la historia, en un recorrido

**Integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro:  
estudio de caso en un proceso de comercio exterior**

que inicia con una simple estrategia de evitar que los productos defectuosos lleguen al mercado –con personal con baja formación reservado a seguir instrucciones sin ningún desarrollo tecnificado, desconociendo la relevancia de los indicadores de gestión–, hasta nuestros días, donde la gestión de calidad inteligente se garantiza a través de un modelo de gestión de calidad integral y sistémico donde la organización debe ser capaz de integrar elementos de estrategia, responsabilidad social, innovación, liderazgo, procesos, personas, clientes, mercados y resultados.



**Figura 1. Evolución de la gestión de calidad (Cubillos & Rozo, 2009; Weckenmann et al., 2015; Icontec, 2015)**

Las organizaciones requieren sistemas integrados capaces de encajar en los procesos desarrollados por los aliados para un mayor crecimiento y rendimiento organizacional en un mundo con mayor nivel de globalización y clientes con mayores exigencias. Los sistemas de gestión requieren de una estructura de alto nivel (HLS, *High Level Structure*), es decir de sistemas que permitan la alineación de las organizaciones con diferentes sistemas de gestión y su integración, evitando el desperdicio de tiempo, esfuerzo y recursos.

Hasta los años sesenta, en Colombia no existía un concepto unificado de calidad, cada empresa tenía sus propios estándares, lo que impedía el posicionamiento de la industria local en el exterior. Tras el derrocamiento del

general Rojas Pinilla en 1957, con una situación económica difícil y con la necesidad de renovar la estructura económica país para evitar ser absorbidos por los mercados internacionales, las industrias metalúrgica, plástica y farmacéutica conformaron gremios –Fedemetal, Acoplásticos y Afidro, respectivamente–, con la idea de proteger sus empresas y establecer normas para la fabricación de productos con las mejores especificaciones de calidad. En 1963 nace el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec), un poco más de cincuenta años después del surgimiento de este tipo de organismos en los países industrializados. Las normas ISO son una garantía reconocida mundialmente, su aceptación en Colombia ha sido alta, más aún en la última década, donde el número de empresas certificadas aumentó en un 90%, periodo que coincide con la entrada en vigencia de un mayor número de acuerdos internacionales.

## GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

En el mundo empresarial, la distribución física de las mercancías ha tenido diferentes nombres, significados y enfoques, acordes con los desarrollos tecnológicos y las exigencias normativas y tendencias de un mundo cada vez más globalizado. En la FIGURA 2 se presenta su evolución, desde sus inicios, cuando Crowell concibe logística como la simple distribución física de productos, con énfasis en el cuidado de los costos (Servera-Frances, 2010), hasta nuestros

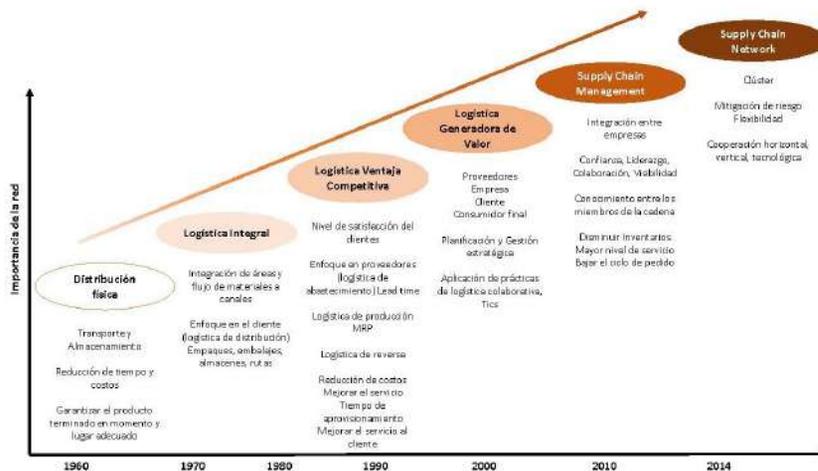


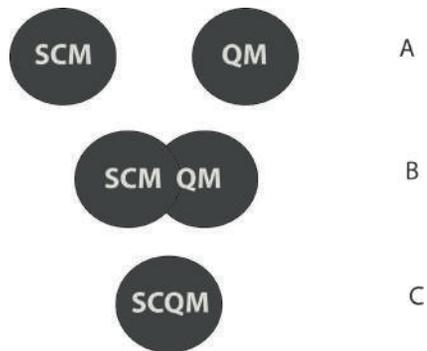
Figura 2. Evolución de la gestión de la cadena de suministro (Servera-Frances, 2010; Fernandes et al., 2017; Zeng & Xiao, 2014)

días, donde se define como una red de suministro-producto-distribución, con proveedores, fabricantes y distribuidores interdependientes en los aspectos de estrategia, recursos, capacidad e información (Zeng & Xiao, 2014).

Las organizaciones han ganado un espacio en el entorno empresarial a través de sus cadenas de suministro, “la competencia en el futuro no será compañía contra compañía sino cadena de suministro contra cadena de suministro, indican Rice y Hoppe (2001). Para afrontar los nuevos retos se necesita liderazgo, confianza y colaboración entre los miembros de la cadena. Con la internacionalización de las economías, las cadenas de suministro se globalizaron, se hicieron más complejas y contaron con la participación de un gran número de actores. La gestión de calidad ha realizado un trabajo muy importante al interior de las organizaciones, integrando incluso proveedores y clientes con el propósito de ganar competitividad. La reducción de las barreras del comercio entre países y el estímulo a los intercambios comerciales con los países socios han motivado el diseño de cadenas de suministro enfocadas en la reducción del costo total –adquisición, flete, aduanas y aranceles, almacenamiento y mantenimiento de inventario– (Tang, 2017).

## **GESTIÓN DE CALIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO**

Según Robinson y Malhotra (2005) la integración de SCM y QM a través de la SCQM es necesaria. De acuerdo con Rashid y Aslam (2012), sin esta interrelación no es posible lograr mejor calidad y por lo tanto los resultados no serán los esperados por los socios de las organizaciones. En la FIGURA 3 se muestra cómo se da la integración entre SCM y QM. En la etapa A, QM y SCM se presentan de forma independiente en la organización, mientras QM promueve la confianza entre proveedores y clientes mediante la implementación de sistemas de gestión que certifican procesos y garantizan la colaboración entre los miembros de la cadena, para alcanzar un producto que satisface las exigencias del mercado, SCM garantiza operaciones eficientes desde los proveedores y hacia los clientes, operaciones logísticas que permiten bajar costos y mejorar los tiempos de entrega y el nivel de servicio. En esta etapa las diferentes áreas organizacionales responsables en sus procesos se presentan distantes e independientes; en la etapa B se presenta un grado de integración entre estos dos sistemas de gestión (calidad y cadena de suministro); y en la etapa C, como efecto de los mercados globales y de clientes más exigentes, se considera la necesidad de su integración total.



**Figura 3. Integración de la gestión de calidad y la gestión de la cadena de suministro (Rashid & Aslam, 2012)**

Awan (citado por Rashid y Aslam, 2012) afirma que “la gestión de la calidad está positivamente relacionada con la mejora de la calidad del producto, la satisfacción del cliente, la cuota de mercado y la ventaja competitiva”. El concepto de cadena de suministro ha buscado mejorar el nivel de servicio al aumentar la disponibilidad de los bienes para el consumidor final y disminuir los tiempos de ciclo de pedido con el cliente (Fernandes et al., 2017). Cada uno de estos conceptos conlleva, por un lado, elementos de la gestión de calidad, que involucra procesos de certificación para cumplir necesidades y expectativas del cliente, y por otro, operaciones a la búsqueda de una integración con proveedores y clientes, ambos en búsqueda de mayor competitividad empresarial.

La calidad permite garantizar un producto que satisface las necesidades y expectativas de los clientes. A través de las certificaciones, las empresas encuentran una herramienta para vincularse en un mundo global, garantizando así, la existencia de gestión, pero no la eficiencia del sistema. En tanto, la cadena de suministro gestiona alianzas para garantizar el flujo a través de la red en forma eficiente mediante la colaboración, la visibilidad y el conocimiento. Por lo tanto, es inminente que calidad y cadena de suministro se unan para lograr niveles superiores de competitividad que exige el mundo de hoy.

Lin et al. (2013), al definir SCQM, destacan la importancia de alinear, no solo estrategias, sino procesos y controles que permitan comprometer a todos los miembros de la red en el logro de un buen resultado:

... aquella parte que se ocupa de diseñar, vincular y gestionar las actividades estratégicas y tácticas de un sistema de cadena de

suministro para evitar desviaciones, garantizar la responsabilidad de los socios del canal, crear una optimización del nivel del sistema además de construir redes de suministro competentes.

Las investigaciones de Rashid y Aslam (2012), Robinson y Malhotra (2005), Kuei et al., (2001), Poleskina (2016) y Quang et al. (2016) se han planteado como beneficios de la SCQM, aspectos como la mejora del desempeño organizacional, la creación de valor, el mayor nivel de servicio a los clientes, los mayores beneficios para los participantes de la cadena, la excelencia empresarial, la mejor calidad operativa y la mejor calidad del producto.

La integración de la calidad a la cadena de valor se puede ver de acuerdo con la posición del consumidor en ella. Si cada uno de los participantes es un consumidor, entonces mercadeo percibe las necesidades del cliente y del consumidor final y las trasmite a diseño para determinar otros materiales; a su vez, compras determina proveedores y seguramente evalúa materiales, mientras producción define especificaciones técnicas (tolerancias) y máquinas para entrega a distribución, y evalúa las condiciones de almacenamiento y transporte; y cada uno valida las exigencias normativas que le darán participación al producto en el comercio global. Todo esto amplía el panorama, ya no solo la calidad se asocia al flujo del producto, sino también a las diferentes entidades involucradas en la cadena de suministro (Evans & Lindsay, 2005).

Considerando lo dicho, el rendimiento de las empresas mejora en la medida en que la competitividad de cada uno de los participantes de la cadena de suministro logre eficiencia en la operación y calidad en el producto y servicio. Para Fernandes et al. (2017) la calidad de los productos depende, no solo del proceso de calidad del fabricante, sino del proceso de calidad de sus proveedores. Mellat-Parast (2013), por su parte, concluye “comprender los problemas de calidad en las cadenas de suministro estratégicas es fundamental para el éxito de la empresa y la sostenibilidad de la asociación”. Es necesario entonces, integrar estas herramientas que han demostrado individualmente su contribución, con la competitividad de las organizaciones en SCQM.

La revisión de los trabajos de Lin et al. (2013), Kuei et al. (2001) y Fernandes et al. (2017) permite concluir que los factores críticos de la SCQM son: comunicación y asociación; liderazgo; estrategia; prácticas de calidad y mejoramiento continuo e innovación; gestión de procesos; selección de proveedores; participación de los proveedores interesados; enfoque en el cliente y en el mercado; información y análisis; y desarrollo y gestión de recursos humanos.

## COLABORACIÓN, VISIBILIDAD Y GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO

En los noventa, el enfoque dado hacia la satisfacción del consumidor final y las desalineaciones internas llevaron al nacimiento de la filosofía de respuesta eficiente al consumidor [ECR, *Efficient Consumer Response*], enfocada en integrar aspectos comerciales y logísticos al interior de la organización, y en la relación entre minoristas y proveedores, planteando y desarrollando herramientas facilitadoras de la colaboración y la visibilidad, principalmente, tales como: códigos de barras; identificación por radiofrecuencia [RFID, *Radio Frequency Identification*]; intercambio electrónico de documentos [EDI, *Electronic Data Interchange*]; punto de venta [POS, *Point Of Sale*]; abastecimiento continuo; gestión de inventario; y planeación colaborativa, pronóstico y reabastecimiento [CPFR, *Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*] (Reyes & Bhutta, 2005). Asimismo, el modelo de referencia de operaciones en la cadena de suministro [SCOR, *Supply Chain Operations Reference*] surge como respuesta a la alineación de objetivos con el mismo propósito: el cliente; propone crear una visión común para la gestión y coordinación de los cinco procesos principales de la cadena de suministro: planeación, abastecimiento, transformación, entrega y flujo inverso); a nivel interno busca estrechar lazos a lo largo del proceso y a nivel externo destaca el flujo de bienes y servicios relacionados del proveedor del proveedor al consumidor del consumidor (Minculete & Olar, 2018).

La colaboración se presenta como una necesidad para garantizar el éxito en los procesos de la cadena de suministro dada la contribución de los diferentes participantes e incluso como herramienta clave para mejorar la competitividad, la excelencia empresarial y el desarrollo organizacional (Fernandes et al., 2017). Por otra parte, Klueber y O'Keefe (2013) consideran el desarrollo de la visibilidad a través de las relaciones que se construyen en el tiempo, partiendo incluso con procedimientos informales que a la postre generan confianza y compromiso, mientras que Büyüközkan y Arsenyan (2012) proponen compartir información como un pilar importante de colaboración para el desarrollo de un producto.

En la medida en que se comparten cifras, datos y características con proveedores o clientes, se logra un mayor nivel de visibilidad, lo que a su vez permite anticipar una crisis, minimizar riesgos y evitar desabastecimientos; esta variable implica desarrollos fuertes en tecnología para compartir a lo largo de la cadena de suministro. La visibilidad también se interpreta como la

transparencia del intercambio de información entre los miembros de la cadena de suministro.

La visibilidad ha sido un concepto estudiado desde la administración, Crumpton (2010) la considera clave para la gerencia, en la medida en que abre oportunidades al comprender los detalles de la operación y permite reorientar la dirección estratégica y planificar nuevos objetivos. Asimismo, el concepto japonés *Gemba* (lugar de trabajo, el lugar real donde ocurren las cosas) es una forma de visibilizar lo que sucede en la base, para desde la dirección impulsar propuestas de mejoramiento, alcanzando una mayor motivación y disposición de los colaboradores para mejores resultados.

La visibilidad es necesaria en las organizaciones donde la globalización ha generado mayores nodos en las cadenas de suministro, constantes cambios de las economías y esfuerzos permanentes por ganar mercado. El concepto visibilidad va desde el intercambio de información, la identificación de entidades con información compartida en tiempo real y la información disponible para quienes la requieran en la toma de decisiones oportunas. La clasificación de la información conlleva a un beneficio mutuo en el rendimiento para plantear la visibilidad a través de la importancia dada en el desarrollo de la infraestructura tecnológica como elemento facilitador, considerando a las autoridades (gobierno) como un alto influenciador para su desarrollo.

Las cadenas de suministro, por su complejidad, presentan información que corresponde a la negociación realizada entre organizaciones –la que apoya la operación y la asociada a la normatividad–, como son las certificaciones, las especificaciones técnicas y las exigencias normativas, clasificadas por Klueber y O’Keefe (2013) como información de la negociación, logística y normatividad.

Cada clase de información vincula acciones (Caridi et al., 2014), así: transacción, a la información comunicada cuando se produce un evento (*e.g.*, pagos, pedidos, órdenes); estado, a la situación de algún recurso o proceso (*e.g.*, estado de la orden, calidad, nivel de inventario); datos maestros, a las características del producto o servicio (*e.g.*, embalaje, personalización del producto); y planes operacionales, a los planes futuros de la compañía (*e.g.*, apertura de mercados, proveedores, plantas, productos, producción).

Para alcanzar grandes resultados se necesita una infraestructura tecnológica que permita la sincronización entre los diferentes participantes dentro y fuera de la organización, con datos estratégicos u operativos. Dada su alta dependencia

para alcanzar un mejor desarrollo del producto, el aprovechamiento de la capacidad, la calidad del producto, los mejores costos de manufactura y haber trabajado en proyectos conjuntos facilitados por la colaboración y visibilidad, los socios intentan formalizar y sistematizar los procesos a través del desarrollo tecnológico.

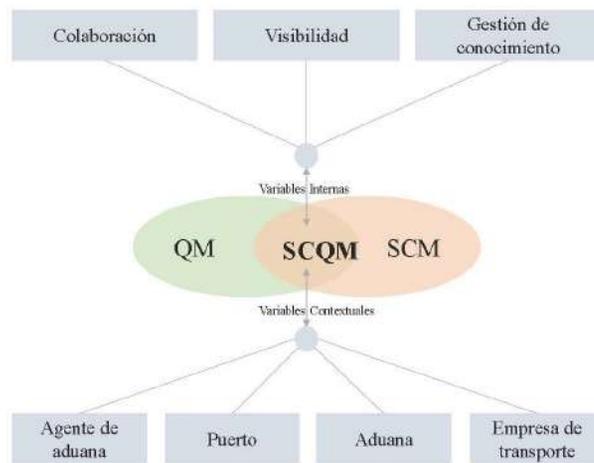
La gestión del conocimiento es una forma de organización para administrarlo, crear valores y mejorar la ventaja competitiva o el rendimiento de la empresa; considera la utilización de técnicas de gestión de la información dentro y fuera de ella, tales como la recopilación, la transferencia y la seguridad (Wibowo & Waluyo, 2015). La gestión del conocimiento es la respuesta a ciertas tendencias del mercado como son: el mayor conocimiento en la producción de bienes y servicios, la innovación, la obsolescencia rápida del conocimiento, la preferencia por los productos inteligentes la personalización de los productos (Saracho, 2009). Es decir, al contribuir con la mejora de las intra e inter relaciones en toda la cadena de suministro, la alineación de la estrategia de dicha cadena y el refuerzo de la transferencia de conocimiento en el desarrollo de productos facilitan la gestión de calidad. En la medida en que se aprenda de las experiencias, se conozca el cliente y las particularidades que implica cada uno de los mercados a los que la empresa llega, la organización podrá sacar un mayor provecho y su cadena de suministro podrá volverla más competitiva.

## METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló con un enfoque de investigación cualitativa, modelo de investigación que considera cuatro etapas: preparatoria, una etapa reflexiva, de diseño; trabajo de campo, donde se recogen los datos; analítica, donde se reducen y procesan los datos y se obtiene un resultado; e informática, donde se prepara el reporte de la investigación. En esta sección se hace énfasis en el diseño de los instrumentos, por ello, para una mayor ilustración de este aspecto se recomienda revisar el trabajo de Jiménez (2018).

En la etapa preparatoria se definieron los pilares de la investigación (FIGURA 4) y se diseñaron las herramientas de trabajo. La investigación tiene como unidad de análisis a una empresa reconocida por su liderazgo y trayectoria en la región, –que cuenta con plantas de producción en diferentes países y un buen nivel de operaciones de importación y exportación–, junto con las entidades asociadas a su cadena de suministro. En la FIGURA 4 se refleja la integración de la gestión

de calidad y la gestión de la cadena de suministro en la gestión de calidad en la cadena de suministro, cómo esta es impactada por las variables internas de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento, y la alta intervención de las variables contextuales: agente de aduana, puerto, aduana y empresa de transporte, que han sido seleccionadas para evaluar cómo se ven favorecidos los procesos de comercio exterior según el grado de integración.



**Figura 4. Pilares de investigación**

Para evaluar la QM se diseñó una matriz basada en los modelos de madurez que proceden de la ingeniería del software (SGMM Team, 2011), en ella se definen los nombres de los niveles de acuerdo con su desarrollo en el tiempo. El nivel más básico, incipiente, corresponde a la inspección de calidad, donde la preocupación de la empresa es no llevar productos defectuosos al mercado, y el más alto a la gestión de calidad inteligente, nivel donde la QM está asociada a generar conocimiento en y hacia los socios comerciales, con fuerte incidencia de los temas ambientales. En la matriz se adoptan los dominios: estrategia, control, procesos, tecnología y recursos humanos [RR.HH]. La TABLA 1 corresponde a la matriz de evaluación de la madurez de la QM e incluye las características consideradas para la evaluación en cada uno de los niveles, respecto de cada dominio. Para efectos de valoración, el nivel global de una organización corresponde al del dominio donde tenga el menor nivel de madurez, esto porque se espera un avance paralelo en los diferentes dominios.

**Tabla 1. Matriz de evaluación del nivel de madurez de la calidad de la QM**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	Recurso humano
Gestión de calidad inteligente	Generar conocimiento para la compañía y sus socios comerciales.	Evaluación de la honestidad y el buen trato con los colaboradores y la sociedad, y el impacto ambiental / Certificación OEA.	Compatibilidad ambiental y baja utilización de energía / Integración a los procesos de los elementos de estrategia, responsabilidad social e innovación.	La tecnología permite el manejo big data así como la integración con el gobierno y otras entidades.	Bienestar al ser humano / Sostenibilidad (colaboradores, sociedad).
Gestión de calidad total	Garantizar la calidad como parte esencial de la compañía a nivel global.	Certificaciones ISO orientadas a la preservación, inocuidad alimentaria, confiabilidad e integridad de datos / Alineación de los socios comerciales para colaboración global en compras, fabricación, ventas y servicios / Integración de sistemas de gestión dentro de la organización / Políticas globales para empleados / Responsabilidad social / Inicios en sostenibilidad / Mitigación de riesgo / BASC e indicadores que apuntan a la estrategia organizacional involucrando a los aliados comerciales.	Alineación de los socios comerciales para lograr colaboraciones globales en compras, fabricación, ventas y servicios.	Integración de los sistemas de gestión al interior de la organización.	Políticas globales para empleados / Responsabilidad social / Inicios en sostenibilidad / Mitigación de riesgo / Cuenta con un director de calidad y la política de calidad es clara en toda la organización.
Gestión de calidad	Calidad para disminuir costos en la organización.	Promoción de nuevas certificaciones ISO diferentes a la 9001 como tema estratégico / Aumento del número de proveedores certificados.	Procesos claramente definidos e involucra áreas diferentes de la organización.	Conexiones con otros departamentos y algunos socios comerciales.	La organización conoce de cerca sobre calidad y la importancia de la prevención / Acercamiento con agencias certificadoras / Cuenta con una gerencia.
Aseguramiento de calidad	Garantizar la calidad desde los materiales y servicios.	Definen indicadores con proveedores y clientes / Inicia certificación de proveedores y alcanza la ISO9001.	Procesos definidos y orientados al cliente, desde manufactura hasta el cliente / Se considera el mercado internacional.	Sistema de información especializado para el manejo de calidad.	Área con rol para garantizar calidad.
Control de calidad	Eliminar las causas de falla / orientación al cliente.	Control estadístico de procesos / PHVA / 5 por qué / Círculos de calidad / Indicadores por proceso.	Se integran algunas dependencias involucrándolas en procesos.	Software no especializado utilizado como herramienta de control.	Diseña propuestas para mejorar calidad, bajar costos y mejorar tiempos.
Inspección	Los defectos no deben llegar al mercado.	Indicadores de gestión no asociados a procesos.	Procesos en su mayoría sin estandarizar, realizados según las actividades establecidas por el jefe, el personal o un líder	Poco desarrollo tecnológico	Se siguen instrucciones sobre su rol.

Por su parte, el instrumento de evaluación de la gestión en la cadena de suministro [SCM] se diseñó a partir de la evolución del concepto de logística en el tiempo. Se mantienen los dominios usados en la QM para así realizar la evaluación bajo los mismos parámetros. En la TABLA 2 (ver página siguiente) se aprecia la matriz desarrollada, la cual mide, a través de los niveles y dominios, de acuerdo con las características definidas en ella, el grado de madurez de la calidad en la cadena de suministro.

Para facilitar la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro se construyó la TABLA 3, en ella se conservan los dominios planteados en las matrices anteriores y se muestran los nombres que se adoptan para los respectivos niveles, los cuales corresponden a los propuestos por el SGMM Team (2011). En la construcción de la matriz de madurez de la calidad en la SCQM (TABLA 4), se consideraron las características desarrolladas en cada nivel en QM y SCM, las que sumadas dan como resultado su integración en la SCQM. Tal como ocurre en las matrices anteriores, para alcanzar un nivel de madurez, el modelo requiere haber superado los niveles inferiores en todos los dominios.

Para las variables internas de colaboración, visibilidad y gestión del conocimiento, establecidas para determinar la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro, se construyó la matriz de madurez de la TABLA 5, donde se establecen como dominios las variables internas: colaboración, visibilidad y gestión del conocimiento, y como niveles: pionero, óptimo, íntegro, impulso, inicio e incipiente, donde el menor grado de madurez está representado en incipiente y el mayor en pionero. Tal como en los casos anteriores, el nivel global corresponde al menor alcanzado en los dominios.

**Tabla 3. Equivalencia de niveles para la gestión de la calidad en la cadena de suministro**

Niveles QM	Niveles SCM	Niveles SCQM	Equivalencia
Inspección	Distribución física	Incipiente	Inspección + Distribución física
Control de calidad	Logística integral	Inicio	Control de calidad + Logística integradora
Aseguramiento de calidad	Logística ventaja competitiva	Impulso	Aseguramiento de calidad + Logística ventaja competitiva
Gestión de calidad	Logística generadora de valor	Íntegro	Gestión de calidad + Logística generadora de valor
Gestión total de calidad	Gestión de la cadena de suministro	Óptimo	Gestión total de calidad + Gestión de la cadena de suministro
Gestión de calidad inteligente	Red de cadenas de suministro	Pionero	Gestión de calidad inteligente + Red de cadenas de suministro

**Tabla 2. Matriz de evaluación del nivel de madurez de la calidad de la SCM**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	Recurso humano
Redes de cadenas de suministroo	Establecer clúster que garanticen sostenibilidad / Integración entre empresas	Permiten ser flexibles ante la volatilidad facilitando la integración / Disminuir ciclo de pedido, bajar inventarios y flexibles.	Consideran la cooperación tecnológica a nivel horizontal, vertical / Entrega y recibo ágiles / La colaboración y visibilidad se extiende a otros participantes de la red.	Integración tecnológica para mitigar el riesgo / Integración con los sistemas de clientes y proveedores ampliando la colaboración y visibilidad / ERP.	Normatividad que facilita la integración entre los miembros del clúster / Alta dirección involucrada e impulsa programas de capacitación para todos en la red.
Logística generadora de valor	Nivel de colaboración avanzado con proveedores y clientes.	Contratos para afianzar las relaciones, alianzas a largo plazo (más 3 años).	Enfoque de procesos en prácticas colaborativas y de visibilidad.	Compartir información con algunos proveedores y clientes // MRPII / CRM / VMI.	Es importante que la profesionalización esté presente en los socios comerciales.
Logística venta competitiva	Nivel de colaboración básico con proveedores y clientes.	Tiempo (lead time).	Procesos estandarizados, involucra abastecimiento y devoluciones / Desarrollo de prácticas colaborativas con clientes o proveedores (entrega certificada, cross docking).	EDI / Factura electrónica / Planificación de: producción e inventario (MRPI); recursos de producción (MRPII) y recursos empresariales (ERP).	Profesionalización del personal.
Logística integral	Orientada al cliente.	Indicadores con los clientes y prestadores de servicio / Bajar los niveles de inventario y mejorar el nivel de servicio.	Procesos definidos con enfoque a los canales de distribución integrando con algunas áreas de la organización.	Establecimiento de rutas / Gestión de inventarios / Uso de código de barras / RFID.	Tercerización / Paletización, empaques y embalajes para el aprovechamiento.
Distribución física	Garantizar la entrega.	Contar con inventario / Características y condiciones del vehículo.	Procesos manuales y no estandarizados enfocados principalmente al transporte y distribución, no hay coordinación con otros departamentos o entidades.	Seguimiento a vehículos mediante celular y puestos de control o GPS y control de inventarios en Excel	Personal con bajo nivel de formación / Activos representados en bodegas o vehículos

## Integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro: estudio de caso en un proceso de comercio exterior

**Tabla 4. Matriz de evaluación del nivel de madurez de la calidad para la SCQM**

	Estategia	Controles	Procesos	Tecnología	Recurso humano
Pionero	Construcción de conocimiento con los socios comerciales para la sostenibilidad de todos.	Sellos de reconocimiento mundial del compromiso organizacional, y como facilitadores de la flexibilidad e integración (incluye sellos de igualdad de género) / El impacto ambiental es un elemento clave / Certificación OEA como herramienta integradora global.	Integrados con socios comerciales en estrategias de responsabilidad social e innovación, a través de la cooperación horizontal y vertical en busca de la baja utilización de energía.	Integración tecnológica para mitigar el riesgo en todos los miembros de la red, incluso se integra entidades de gobierno para el crecimiento de la región.	Normatividad que facilita la integración entre los miembros del clúster a través de la sostenibilidad y el bienestar del ser humano.
Óptimo	Integración entre empresas que garanticen la calidad a lo largo de toda la red de suministro a nivel global.	Alta dispersión de los miembros de la red / Alta coordinación en la internacionalización por indicadores que apuntan a la estrategia organizacional de todos / Enfoque especial en reducir el ciclo de pedido y los inventarios y en ser flexibles / Certificaciones ISO: preservación, inocuidad alimentaria, confidencialidad e integridad de datos.	La colaboración y visibilidad se extiende a otros participantes de la red global para lograr alineación en compras, fabricación, ventas y servicios.	Integración de la información en un único sistema de gestión al interior de la organización, la visibilidad y colaboración está presente con clientes y proveedores.	Alta dirección impulsando programas de formación para todos los participantes de la red, alineando políticas globales de responsabilidad social, sostenibilidad y mitigación de riesgo.
Integro	Colaboración avanzada en calidad con proveedores y clientes para disminuir costos.	Myor número de proveedores certificados que permiten alianzas a largo plazo (3 años) / Promoción de nuevas certificaciones ISO en la organización.	Trabajo con socios comerciales para la alineación organizacional a nivel global a través de prácticas colaborativas y de visibilidad.	Integración de los sistemas de gestión en la organización para facilitar el compartir información con proveedores y clientes / Inventario de gestión de proveedores VMI.	Gerencia de gestión de calidad para la cadena de suministro / Profesionalización en los socios comerciales como elemento clave de prevención de riesgos.
Impulso	Colaboración con proveedores y clientes como garantía de calidad.	Certificación de proveedores como garantía de oportunidad en los materiales y servicios / Se trabaja bajo la ISO9001	Procesos estandarizados en toda la organización / Desarrollo de prácticas colaborativas con clientes y proveedores (entrega certificada, cross docking).	Integración al interior de la organización a través de: Sistema de información para el manejo de calidad, sistemas de planificación MRPI o MRPII o ERP / Integración externa a través de EDI y factura electrónica.	Profesionalización del personal para garantizar la calidad a nivel de las operaciones de la empresa.
Inicio	Orientada al cliente.	Uso de herramientas para el control de proceso, con definición de indicadores de gestión de los clientes y prestadores de servicio / Reducir los costos es vital.	Procesos definidos con enfoque a los canales de distribución que integra áreas de la organización.	Utilización de software para la gestión de los inventarios, establecimiento de rutas y herramienta de control / Algún uso para el código de barras o la RFID.	Trabajo conjunto con aliados y e interno para mejorar calidad, costos y tiempos.
Incipiente	Garantizar la entrega sin defectos.	El inventario y la disponibilidad del modo de transporte es la prioridad, sin indicadores asociados a procesos.	Mayoría de procesos sin estandarizar / Operaciones de almacenamiento y distribución, realizadas de acuerdo con el personal o indicación del líder, sin coordinación con otros departamentos o entidades.	Seguimiento a vehículos con el celular, puestos de control o GPS / Bajo aprovechamiento de la tecnología para garantizar las operaciones.	Los recursos se representan en bodegas o vehículos / El personal tiene limitada formación, sigue instrucciones.

**Tabla 5. Matriz de evaluación del nivel de madurez de las variables internas**

	Colaboración	Visibilidad	Gestión del conocimiento
<b>Pionero</b>	Se comparte información en tiempo real / Se desarrollan planes estratégicos para operaciones locales con proveedores, clientes y participantes de la cadena de suministro (Incluyendo entes de gobierno) / El propósito es garantizar la calidad del producto, cumplimiento de los tiempos de entrega, costos de calidad y flexibilidad global.	Integración en tiempo real a varios niveles con proveedores, clientes, así como con diferentes participantes de la cadena de suministro incluido entes de gobierno, disponibilidad de información / El propósito es la innovación y la mejora de la calidad en tiempo real a través de la red abierta que se ha construido / Proveedor del proveedor, cliente del cliente.	Crea conocimiento en tiempo real en diversas situaciones entre los participantes de la red / Búsqueda activa a nivel global de mantener y proteger el conocimiento / Las organizaciones participantes tienen claridad sobre el capital intelectual (humano, estructural y relacional) que poseen.
<b>Óptimo</b>	La colaboración se da al compartir planes operacionales regionales que permiten anticiparse y tomar decisiones conjuntas / El propósito es lograr adquisiciones, alcanzar la apertura de nuevos centros de distribución, canales de distribución, planes de producción, plantas con la garantía de calidad del producto, cumplimiento de los tiempos de entrega, costos de calidad y flexibilidad regional.	Integración para nuevas opciones de suministro global, se cuenta con diferentes nodos que operan coordinados con la red central / Visibilidad con proveedores, clientes y otras plantas que manufacturan / Se comparte información del negocio para innovación conectada.	La creación de conocimiento es para intercambiarlo a través de la participación de los socios comerciales
<b>Íntegro</b>	La colaboración se da al compartir planes operacionales locales / El propósito es alcanzar mejores resultados en los planes de compras, producción, comercialización y demanda, y así mejorar tiempos de entrega, costos de calidad y flexibilidad local.	La visibilidad busca integrar información logística, mediante el establecimiento de relaciones entre socios comerciales / El propósito es disminuir costos por riesgo / La integración es útil, oportuna, confiable y precisa / Participación con visibilidad a dos niveles, es decir varios proveedores y clientes con la empresa, conlleva a innovación por área.	Creación de conocimiento para el procesamiento inteligente / Base para establecer conexiones (redes), lo que hace necesario definir niveles de gobernabilidad.
<b>Impulso</b>	La colaboración se da al compartir datos maestros (perfiles de clientes útiles para personalización, precios, descuentos, contratos, ubicaciones, tiendas) / Se inicia la integración de sistemas de información, con el propósito de compartir características del producto, embalaje y personalización del producto, para dar garantía de calidad del producto y flexibilidad.	Para alcanzar visibilidad se invierte en activos que permitan la relación entre socios comerciales para mayores oportunidades / Se empieza ganar confianza entre los participantes facilitando compartir información a dos niveles, participación de tres socios comerciales por ejemplo la empresa focal, un proveedor, un cliente.	El conocimiento es explícito, se reconoce y se crea a nivel individual y a través de algunas interacciones sociales de colaboración / Se comparte mediante información contextualizada. El intercambio de conocimiento se da a través de las relaciones comerciales.
<b>Inicio</b>	La colaboración se presenta a través de compartir información sobre el estado de los algunos recursos/procesos: estado de la orden, calidad, niveles de inventario en almacén y en tránsito, tipo de productos, informes de ventas / El propósito de la empresa es agilizar su operación y ser flexible desde la operación.	Para alcanzar visibilidad se invierte en activos que permitan la relación entre socios comerciales para mayores oportunidades / Se gana confianza entre los participantes facilitando compartir información a un nivel. Solo entre dos socios comerciales, por ejemplo la empresa focal y un proveedor o un cliente.	El conocimiento es informal y no se encuentra estructurado para las partes, pero permite emitir un juicio y es reconocido como tal, a través de los flujos de información.
<b>Incipiente</b>	La información que se comparte se puede clasificar en transacciones, por ejemplo: recepción de confirmación de correspondencia, confirmación de pagos pedidos u órdenes realizadas, compensaciones por motivos de calidad / El propósito es agilizar la operación.	La visibilidad es de utilidad en la organización y para socios comerciales evitando errores de calidad (producto/servicio) especialmente en transacciones / El propósito es bajar los costos y agilizar la operación interna.	El conocimiento es tácito, puede ser por intuición, juicio, habilidad, experiencia o creencias, no hay conciencia de lo que se tiene.

**Tabla 6. Matriz de evaluación del nivel de madurez de las variables contextuales**

Aduana	Puerto	Agente de aduanas	Transportadora
<p><b>Pionero</b></p> <p>Lidera y se vincula a programas que conducen a la colaboración y asociación entre aduanas del exterior compartiendo información / Busca la integración a cadenas de suministro globales mediante la visibilidad de los datos comerciales de las empresas.</p>	<p>Servicios para cadenas de suministro globales a través de un modelo colaborativo. contribuyendo a la coordinación con los diferentes involucrados, no solo la comunidad portuaria / Permite el intercambio de información de manera oportuna y precisa, a través de la integración tecnológica / Facilita la operación de comunidad portuaria, ajusta procedimientos para garantizarlos / Acuerdos con gobierno, empleados y administración para el bienestar y sostenibilidad de la comunidad.</p>	<p>Aunque no puede actuar a nivel global por la normatividad su amplio conocimiento permite actuar como asesor y consultor para el comercio exterior. (manejo de preferencias arancelarias, establecimiento de rutas, búsqueda de agentes en el exterior) / Desarrollo de cooperación con otras aduanas e intermediarios para la debida diligencia y calidad de los datos, facilitando la comunicación a través de un sistema de información que garantiza su veracidad y exactitud.</p>	<p>Alto nivel de colaboración con sus socios comerciales, con desarrollo de prácticas estratégicas (liderazgo, comunicación y asociación, calidad, desarrollo talento humano) / Gran preocupación por la sostenibilidad y capacidad para actuar globalmente / Promueven la integración y colaboración con proveedores de servicios cuyos sistemas están en otros modos, con clientes se integran.</p>
<p><b>Óptimo</b></p> <p>Promueve y participa en programas que conducen a la colaboración y asociación entre empresas públicas y privadas mediante el diseño de mecanismos que faciliten el comercio exterior, garantizando la seguridad y el cumplimiento de sus procesos.</p>	<p>Ofrece servicios de cadena de suministro, altamente coordinado con algunos miembros de la comunidad portuaria / Cuenta con alianzas con puertos sustitutos para redireccionar buques y mitigar riesgos / Colaboración y visibilidad que facilita y agiliza sus procesos y operación / Facilita la presentación de documentos al gobierno / Cuenta con un sistema de información en tiempo real.</p>	<p>Integral (agentes de aduana y almacenes generales de depósito), además cuenta con alianzas que les permite ofrecer otras labores propias del comercio exterior (manipulación, transporte multimodal, embalaje, consolidación, cobertura de seguro, entrega) / Colaboran y cooperan con otros agentes de aduana a través de asociaciones.</p>	<p>Integrador que reúne los recursos, capacidades y tecnología de su propia organización y otras organizaciones para diseñar, construir y ejecutar soluciones integrales de la cadena de suministro / Las áreas funcionales no son silos, colaboran regularmente y los procesos están integrados con operadores logísticos externos / Sistema de información que integra a sus socios comerciales facilitando información Tiene un único sistema de en tiempo real.</p>
<p><b>Integro</b></p> <p>Sistema de información robusto que soporta todas las operaciones del comercio exterior de manera unificada y permite la trazabilidad de la carga a los usuarios / Normatividad ajustada a los estándares internacionales que permite agilizar procesos de comercio exterior / La eficiencia aduanera es prioridad, aunque le interpretación del funcionario es altamente influyente.</p>	<p>Ofrece servicios de cadena de suministro, ha establecido alianzas con otros puertos a nivel mundial, sin inconvenientes para establecer rutas / La calidad para los usuarios es prioridad (servicios, comercial, operación) / Procedimientos y procesos unificados y claramente definidos para los diferentes tipos de carga que manejan / Permite la trazabilidad de la carga al interior de sus instalaciones / Pertenece a asociaciones o cuenta con certificaciones (riesgos en la carga) / Operación de cargue y descarga 24 horas.</p>	<p>Ofrece la posibilidad de prestar servicio en todo el territorio nacional de forma directa o a través de un intermediario, para modo aéreo, marítimo, terrestre / Cuenta con un sistema de información para gestionar la documentación de las operaciones / Facilita el desarrollo de nuevas políticas y programas, como automatización y OEA.</p>	<p>Cuenta con procesos y procedimientos bien definidos y entendidos para la prestación de servicios logísticos con prácticas de gestión y operaciones / Facilidad de integrarse a otros modos de transporte / Algunos problemas de colaboración a lo largo de la cadena de suministros, donde ofrece los servicios adicionales de planificación y diseño logístico, control del tiempo de tránsito. Sistema de información para seguimiento a la carga</p>

**Tabla 6. Matriz de evaluación del nivel de madurez de las variables contextuales (continuación)**

	Aduana	Puerto	Agente de aduanas	Transportadora
<b>Impulso</b>	Procesos establecidos y soportados en un sistema de información / Normatividad dispersa que dificulta la actuación y la uniformidad de criterios de los funcionarios / Poca eficiencia para la gestión aduanera.	Ofrece servicios portuarios basados en las necesidades de la industria / Cuenta con servicios donde involucra a sus proveedores de servicios logísticos como socios estratégicos / Capacidad de respuesta, flexibilidad / Preocupación por las competencias del recurso humano y por una mayor eficiencia de las autoridades portuarias.	Solo puede prestar servicio en una Jurisdicción aduanera, pero actúa como intermediario para aquellas con autorización nacional.	Presta servicios en zonas de mayor concentración industrial de almacenamiento y transporte integrado además de alistamiento, embalaje, distribución, seguimiento y rastreo, cross-docking, empaque específico e incluso sistema de seguridad / Establece alianzas que le permiten responder a carga contenedorizada y distribuciones de última milla / Entrega información a su socio según sea requerida.
<b>Inicio</b>	Tiene procesos definidos, pero el usuario debe realizar los registros en sistemas de información diferentes, lo que genera duplicidad o violación de la norma por parte de él y dificulta a las autoridades el control.	Ofrece servicios multifuncionales, cumple en costos y con estándares de calidad; se basa en lo que ocurre a nivel local / Algunos de sus procesos se encuentran estandarizados / Desarrolla inversiones para agilizar su operación.	Solo puede prestar servicio en una Jurisdicción aduanera.	Servicios de logística de entrada y salida de productos de sus socios comerciales / Su negocio se basa en activos ampliando de vehículos a bodegas.
<b>Incipiente</b>	Procesos definidos, la gestión se realiza de forma manual en planillas que luego son digitalizadas	Proporciona uno o pocos servicios de logística al interior del puerto / Su preocupación se base en la infraestructura.	Solo puede prestar servicio en una Jurisdicción aduanera / Representa a sus clientes en los trámites de comercio exterior, incluso en los de licencias y permisos / Para el control no cuenta con un sistema de información especial y su capacidad para la transmisión electrónica es insuficiente.	Ofrece servicios de transporte, la operación es coordinada por el dueño de la mercancía. El negocio se basa en los activos que posee (vehículos) / No cuenta con sistema de información. Usualmente opera en una sola zona.

Para evaluar el grado de madurez de las variables contextuales se definen como dominios la aduana, el puerto, el agente de aduanas y la empresa de transporte, por ser los actores más representativos en los procesos de comercio exterior. La matriz que se construyó para su evaluación (TABLA 6) considera los mismos seis niveles manejados en las matrices anteriores, es decir: pionero, óptimo, íntegro, impulso, inicio e incipiente. Con el diseño de las fuentes de recolección, se completó la fase de preparatoria.

La siguiente etapa de la metodología, como se mencionó, fue la de trabajo de campo, ella estuvo enfocada en la recolección de la información con los responsables del proceso de comercio exterior de la empresa y los miembros de su cadena de suministro seleccionados. A través de la entrevista en profundidad se indagó con cada uno cómo concibe: la calidad, la cadena de suministro y la gestión de la calidad en la cadena de suministro, y con el apoyo de las matrices de madurez, se identificó el grado de madurez de la calidad en la cadena de suministro.

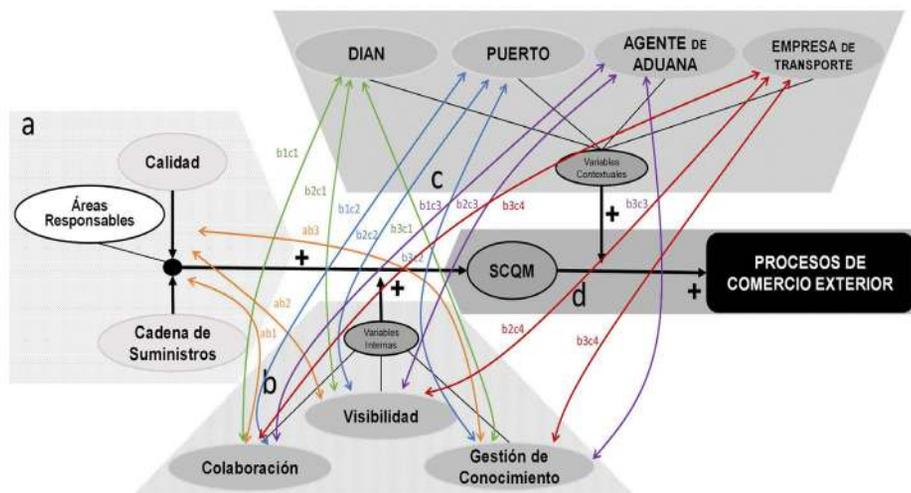
En la etapa analítica el desarrollo fundamental fue el modelo conceptual de la investigación (FIGURA 5). En él, se identifican con las letras a, b, c y d, a las etapas que corresponden al desarrollo de los objetivos de la investigación, y con números del 1 al 3, en cada caso, las variables internas y conceptuales.

Las etapas a y b se desarrollan al interior de la organización: en la primera, se busca identificar a las áreas responsables, precisar su participación y entender cómo incide la calidad y la cadena de suministro en el proceso de comercio exterior, para caracterizar a la organización respecto de la integración en la gestión de calidad en la cadena de suministro en los procesos de comercio exterior; en la segunda, se consideran las variables internas –1, colaboración; 2, visibilidad; y 3, gestión de conocimiento–, que serán elementos claves de análisis al considerar los procesos y las actividades que requieren las operaciones de comercio exterior al interior de la empresa. El cruce entre las etapas (a y b) y las variables (1, 2 y 3), se presenta en la FIGURA 5 con la siguiente nomenclatura: ab1, para la relación entre calidad y cadena de suministro con colaboración; ab2, para la relación entre calidad y cadena de suministro con visibilidad; y ab3, para la relación entre calidad y cadena de suministro con gestión de conocimiento.

En la etapa c, se analiza la correlación con la etapa b entre las variables internas y las variables contextuales –en este caso, 1, aduana; 2, puerto; 3, agencia de aduanas; y 4, transportadora. En la FIGURA 5 se identifican los cruces

usando la nomenclatura etapa, variable, etapa, variable, que corresponde al grado de desarrollo de la variable contextual respecto de la variable interna, así: b1c1, b2c1 y b3 c1, para los niveles de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento de la aduana; b1c1, b2c1 y b3 c1, para esos mismos niveles en el puerto; b1c1, b2c1 y b3 c1, en la agencia de aduana; y b1c1, b2c1 y b3 c1, en la transportadora.

En la etapa d, se analiza cómo el nivel de madurez de la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro favorece la estructura del modelo en los procesos de comercio exterior, considerando las variables internas y las variables contextuales.



**Figura 5. Desarrollo del modelo conceptual**

Finalmente, mediante un estudio de caso se presenta el informe producto de la investigación, en él se desarrollan los objetivos planteados, se evalúa la gestión de calidad en la cadena de suministro y se define cómo la integración favorece los procesos de comercio exterior. De las tipologías de estudio de caso, se seleccionó la de estudio de caso único, con ella se analiza la organización, los departamentos involucrados y su entorno respecto de los procesos de comercio exterior, considerando las variables colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento.

## INTERESADOS EN EL PROCESO DE SCQM

La integración de la gestión de calidad con la gestión de la cadena de suministro implica la interacción de la empresa con otras organizaciones y con entidades del gobierno, los otros miembros de la cadena de suministro. Aunque la lista de agentes en la cadena es más extensa, a continuación se presentan los que por su relevancia fueron seleccionados para adelantar la investigación, estos son, además de la empresa: el aliado de negocios BPO (*Business Process Outsourcing*), el agente de aduanas, la transportadora terrestre de carga, la aduana y el puerto.

### LA EMPRESA

Se trata de uno de los conglomerados empresariales más representativos del Valle del Cauca y una de las empresas más exitosas de Colombia. Al momento del análisis estaba en proceso de obtención de la ISO 9001 para certificar sus sistemas de gestión de calidad. Se especializa en el diseño y la producción y distribución de empaques para el consumidor final, la industria y el comercio. Para administrar sus actividades diarias –contabilidad, abastecimiento, fabricación, etc. –, cuenta con el apoyo del ERP [*Enterprise Resource Planning*] ORACLE®, el cual le permite unificar los sistemas y el software que definen una variedad de procesos de negocios y habilita el flujo de datos entre ellos.

Cuenta con plantas de producción en Chile, Colombia, El Salvador, México y Perú. Dada la presencia de proveedores y clientes en otros países, cobra relevancia para sus operaciones ser un Operador Económico Autorizado [OEA], calidad que otorga la aduana de Colombia a las empresas involucradas en operaciones de comercio exterior que demuestran el cumplimiento de los requerimientos de seguridad en la cadena logística internacional; a nivel mundial, ser un OEA se ha convertido en una ventaja competitiva, ya que representa beneficios reales otorgados por las aduanas y un reconocimiento implícito a las buenas prácticas de la organización (Anzola, 2016). La empresa se encuentra certificada como OEA para el proceso de exportaciones y está en proceso de obtener la misma certificación para el proceso de importaciones. En México obtuvo la certificación del programa NEED [Nuevo Esquema de Empresa Certificada], el cual busca fortalecer la seguridad en la cadena logística del comercio exterior a través del cumplimiento en temas fiscales, aduaneros y de seguridad. Este certificado facilita el paso de frontera sin retrasos en las exportaciones a los Estados Unidos.

Para el proceso de abastecimiento realiza solo las negociaciones estratégicas, es decir las asociadas al objeto del negocio, definiendo proveedores, precios, términos de comercio internacional y, en algunos casos, el modo de transporte internacional; para las negociaciones no estratégicas (servicios generales, casino, papelería, hoteles, tiquetes, transporte, etc.) externaliza los procesos de negocios con un aliado de negocio que cuenta con un mayor conocimiento técnico en la negociación de dichos servicios. Los procesos de comercio exterior en el abastecimiento incluyen el traslado de la mercancía –desde los procesos portuarios, la desaduanización, la movilización de la carga hasta la planta o depósito–, hasta la entrega del contenedor vacío. Para la distribución a los clientes en el exterior se contratan servicios que incluyen, desde la toma en el centro de distribución de exportaciones, hasta la puesta a disposición del importador. En las importaciones o exportaciones se pueden presentar movimientos de carga aérea, marítima o terrestre. Cabe anotar que en este estudio se considera el transporte marítimo para la ruta internacional y el transporte terrestre por carretera para el trayecto puerto-planta y viceversa, la denominada última milla.

### **ALIADO BPO**

Tal como hace la empresa, su aliado de negocio soporta sus actividades diarias en el ERP ORACLE®. Su actividad en los procesos de comercio exterior se centra en: procesos de logística para los productos o servicios no estratégicos, servicios de administración de contratos a empresas externas no pertenecientes al grupo empresarial y administración del comercio exterior. Esto último lo realiza a través de la gestión y asesoría en las operaciones de abastecimiento y distribución, con aduanas, transporte y zonas primarias (aeropuertos, fronteras y puertos), es decir, ofrece el servicio completo, desde el origen (la planta del proveedor del cliente / cliente), hasta el destino (cliente / cliente de cliente), y realiza las subcontrataciones necesarias para la movilización de la carga (coordinación con los agentes de carga, la naviera, los operadores portuarios y las empresas transportadoras, entre otros). Cuando no tiene presencia en alguna zona primaria o carece de capacidad para cubrir un servicio, efectúa los trámites aduaneros a través de un agente de aduanas con el que previamente ha negociado.

La negociación de la categoría de transporte terrestre por carretera se realiza cada dos años, con algunos ajustes anuales en las tarifas, los que dependen

de indicadores económicos como el Índice de Precios al Transportador [IPT] y el salario mínimo. Cuando los transportadores manifiestan y justifican la necesidad de ajustar los valores en alguna ruta, la entidad la revisa y se llega a un acuerdo.

La selección incluye una licitación formal a la que el BPO invita a los proveedores antiguos y a otros que a su criterio podrían atender los movimientos de carga del cliente. El BPO negocia entre tres o cuatro transportadores para garantizar que el servicio no se verá afectado por problemas de disponibilidad de los vehículos de alguno de ellos en un momento determinado. Aunque el cliente (la empresa) participa en el proceso de selección del proveedor, la asignación es decisión del BPO.

Para garantizar el control desde el punto de vista gestión de los procesos, el BPO cuenta con sistemas de información que permiten la trazabilidad de la operación, la conexión con autoridades aduaneras y el seguimiento transaccional a las facturas, y con un sistema de gestión documental y desarrollo, que facilita medir el desempeño a nivel operativo.

### **AGENTE DE ADUANAS**

En esta cadena de suministro, soporta la operación del BPO solo cuando es requerido por él. La agencia tiene cincuenta años de operación en Colombia y está autorizada para prestar el servicio a los procesos de comercio exterior en todo el territorio aduanero. Es una entidad organizada en sus procesos y gestión y cuenta con el personal idóneo y las alianzas que le permiten complementar la red de comercio exterior con agentes de carga y navieras. Tiene presencia en las fronteras y puertos y aeropuertos del país, y cuenta con sucursales propias en catorce ciudades, entre ellas: Apartadó, Barranquilla, Bogotá, Buenaventura, Cali, Cartagena, Cúcuta, Medellín.

Posee las certificaciones: ISO9001, sistemas de gestión de calidad; OHSAS18001, sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional; ISO45001, sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo; ISO 31000, gestión del riesgo; e ISO14001, gestión ambiental de calidad. Además está certificada por la Business Alliance for Secure Commerce [BASC], alianza empresarial internacional creada para promover el comercio internacional seguro en cooperación con gobiernos y organizaciones internacionales. Asimismo, para dar cumplimiento con el Artículo 12 de la Ley 1503 de 2011 –que promueve

la formación de hábitos, comportamientos y conductas seguros en la vía—, ha desarrollado un plan estratégico de seguridad vial. Cuenta con un sistema de gestión administrativa y un sistema de gestión operativa donde se soportan las operaciones de comercio exterior y se trasmite la información a la aduana a través de intercambio electrónico de datos.

### **TRANSPORTADORA DE CARGA POR CARRETERA**

Su presencia en el mercado supera los setenta años, tiempo en el cual se ha consolidado como un grupo empresarial que ofrece soluciones logísticas de agente de carga: almacenamiento, distribución, desconsolidación y manejo de inventarios y transporte nacional y andino de exportaciones e importaciones; y está autorizada por el Ministerio de Transporte para operar a nivel nacional, lo que le permite mover carga por los puertos tanto del Pacífico como del Atlántico.

La empresa tiene presencia en Colombia, Venezuela y Ecuador; en Colombia cuenta con oficinas en Cartagena, Barranquilla, Santa Marta, Manizales, Bogotá, Cali, Buenaventura, Ipiales, entre otras ciudades; realiza más de diez mil operaciones al mes y 15% de los vehículos de su flota son propios. Está habilitada por la DIAN para trasladar mercancías objeto de reembarque que se encuentran en un depósito temporal o en un centro de distribución logística internacional ubicado en un jurisdicción aduanera diferente a la del lugar por donde saldrá la mercancía hacia otro país; tiene una certificación BASC y otra del Programa de Verificación a Proveedores [PVP]; participa en los programas Responsabilidad Integral®, iniciativa de la industria química global para contribuir al desarrollo sostenible a través de un mejor desempeño en la protección de las personas y el ambiente, la ampliación de las oportunidades económicas, el desarrollo de tecnologías innovadoras y otras soluciones a los problemas sociales; y trabaja junto con el Consejo Colombiano de Seguridad para garantizar la seguridad integral y salud ocupacional de sus colaboradores. Para el desarrollo de su operación utiliza el ERP SAP®, el cual soporta todas sus operaciones y las de su grupo empresarial.

### **DIAN**

Es una entidad adscrita al Ministerio de Hacienda y Crédito Público de Colombia constituida como unidad administrativa especial, se encarga de garantizar el cumplimiento de las obligaciones tributarias, aduaneras y

cambiarías en Colombia y de facilitar las operaciones de comercio nacional e internacional.

La entidad cuenta con la certificación ISO 9001 y soporta las operaciones de comercio exterior con diferentes herramientas, entre ellas la Ventanilla Única de Comercio Exterior [VUCE], el Sistema de Información y Gestión Aduanera [SYGA] y el Modelo Único de Ingreso, Servicio y Control Automatizado [Muisca].

- La VUCE es su principal herramienta para facilitar el comercio del país, a través de ella se canalizan los trámites de comercio exterior vinculados a veintidós entidades del Estado, con su intervención se facilita el intercambio de información entre las entidades, se elimina la redundancia de procedimientos, se implementan controles eficientes y se promueven actuaciones administrativas transparentes.
- El SYGA es la herramienta para los procesos de importación, fundamentalmente para obtener la declaración de la importación, la liquidación de los impuestos, la impresión de formato para pago y la solicitud de la selectividad para inspección o levante automático.
- El Muisca es la herramienta donde se registran los documentos de las exportaciones, las declaraciones juradas de origen y los criterios de origen, cuenta con un desarrollo que se conecta con el SYGA, lo que le permite al transportador internacional trasladar la carga a los depósitos y zonas primarias, y maneja los contratos por importación de tecnología .

## **PUERTO**

La zona primaria considerada en el estudio es un terminal marítimos ubicado sobre el Pacífico colombiano, el cual moviliza el 90% de la carga de las exportaciones marítimas de la empresa.

La calidad de sus procesos y su gestión de riesgos está certificada por BASC e ISPS [*International Ship and Port Security*], cuenta además con la ISO 9001 (sistemas de gestión de calidad) y la ISO 28000 (sistemas de gestión de calidad de la cadena de suministro) y está en proceso de implementar un programa de Gestión Integral de Riesgos [GIRO], el cual, no solo mejorará su capacidad de respuesta ante siniestros, sino que le permitirá contar con un plan de continuidad del negocio para esos eventos. La seguridad física de sus instalaciones se apoya en el Sistema Integrado de Seguridad Electrónica [SISE].

## **CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMERCIO EXTERIOR**

### **IMPORTACIONES (ABASTECIMIENTO)**

El proceso de abastecimiento inicia con el plan de requerimiento de materiales, en él se consideran las decisiones de compra, su planificación y la lista de materiales. Una vez la empresa identifica la necesidad de compra se clarifican los requisitos, acuerdos comerciales aplicables y restricciones que podría tener la mercancía antes de ingresar al país. Para los productos de compra regular se cuenta con una ficha técnica que incluye los requisitos para la colocación de la orden de compra al proveedor.

Una vez se envía al proveedor la orden de compra, la empresa y el BPO la registran en Oracle. El BPO, como responsable del seguimiento de las órdenes de compra, inicia su gestión y contacta al cliente y le da las instrucciones sobre los requisitos documentales antes del embarque de la mercancía, considerando los acuerdos comerciales, certificados de origen y vistos buenos necesarios para desaduanizar la carga; asimismo, se comparten detalles recibidos del proveedor sobre la producción de la mercancía, los tiempos y fecha de embarque, y la fecha aproximada de recibo de la mercancía.

Con esta información se realizan los primeros registros en tracking web, plataforma desarrollada por el área de tecnología del BPO que le permite, al BPO el registro y seguimiento de cada orden –momento de embarque en origen, llegada del buque, realización de pre inspección, autorización de desaduanización de la DIAN, salida del puerto de la carga, llegada a destino y entrega de contenedor vacío, entre otros–, y a su cliente (la empresa), conocer el estado de la orden. El BPO, por una interface migra al sistema de información TLM Soluciones de Información, donde se administran y controlan las diferentes operaciones de comercio exterior; este sistema cuenta con los módulos SIUX, SEUX y SISPV para realizar las operaciones de comercio exterior, y mediante una conexión EDI reporta las operaciones de comercio exterior hasta su desaduanización al SYGA de la DIAN. Completada la documentación necesaria, se envía para la desaduanización o retiro de la mercancía las instrucciones y documentos que soportan el proceso en puerto, dependiendo del sitio de arribo de la mercancía, el proceso lo realiza directamente su departamento de comercio exterior o una agencia de aduanas preseleccionada.

En el puerto se pueden presentar dos situaciones: si se realiza la desaduanización en él, se inician las actuaciones y coordinaciones aduaneras ante el agente de aduanas (si participa), el agente de carga, las navieras, el operador portuario, la preinspección, las autoridades, la DIAN, el almacén de depósito y el transportador terrestre; si la mercancía va a ser trasladada a una zona franca, se retira previa coordinación con el almacén de depósito, se entrega el contenedor vacío en el patio de contenedores y se hace el cierre con el pago de la compra.

Si el proceso en puerto es realizado por el agente aduanero, este debe registrar en el Tracking Web los registros a medida que se avanza en el proceso; una vez recibe la carga el transportador, el controlador de tráfico –quien maneja la carga desde que se recibe, hasta su destino final– realiza el registro en la misma plataforma. Dependiendo de la ubicación de la carga, ella puede ser gestionada por varios controladores a través de los puestos de control y los GPS de los vehículos. Para soportar la operación son necesarios otros dos sistemas de información que no se encuentran integrados en el ERP; Alfresco, que garantiza el adecuado manejo de las facturas, desde su radicación, incluyendo la digitalización, aprobación y posterior pago, y permite asociar los pagos, determinar el costo real de cada operación y efectuar su cierre; y Daruma, que consolida la gestión documental de las empresas, esto es los procedimientos, procesos, instructivos e indicadores.

### **EXPORTACIONES (DISTRIBUCIÓN INTERNACIONAL)**

La empresa, de acuerdo con los pronósticos de venta, la gestión comercial en el exterior y los pedidos recibidos de los clientes, planifica la producción. Si se trata de un despacho a un nuevo destino la planeación se hace con el BPO, quien da claridad sobre los requisitos frente a la norma, los beneficios de acuerdos comerciales que serían aplicables y las restricciones que podría tener la mercancía para la salida del país o el ingreso al nuevo destino. Con los compromisos de entrega se identifica la necesidad de despachar una exportación y se registra en ORACLE®.

Cuando el personal de BPO realiza seguimiento: elabora la reserva de cupo en el buque, notifica la fecha de zarpe de la motonave e inicia la coordinación para el despacho al puerto de exportación, e inicia al tiempo el registro en el Tracking Web, el cual permite el seguimiento de cada orden para el BPO: retiro del contenedor vacío, vehículo dispuesto para cargue, inicio del cargue,

fin del cargue, cierre del contenedor, salida a ruta, llegada a ciudad puerto, ingreso a puerto, inicio de inspección antinarcóticos, nuevos sellos, contenedor listo en zona de exportaciones, contenedor en buque, carga en puerto destino; mientras tanto, la empresa elabora las instrucciones de envío y la lista de empaque y entrega la carga al centro de distribución de exportaciones, donde la recoge la transportadora que ha sido asignada por el BPO.

Este servicio requiere en promedio tres días para la operación: uno para el retiro del contenedor vacío, uno para el cargue y otro para el traslado y entrega en puerto. A su vez, el BPO se conecta con el sistema de información TLM, en el cual se administran y controlan las operaciones con el módulo SEUX; una vez realizadas y confirmadas, usando EDI se transmite la información al sistema Muisca de la DIAN.

La coordinación del BPO incluye la solicitud de un vehículo para retirar el contenedor vacío a una de las empresas de transportes previamente seleccionadas para la ruta requerida, quien conoce el proceso estándar de operación [*Standard Operation Process*, SOP], esto es el requerimiento de los vehículos, la formación del personal que hará parte de la operación, el cumplimiento de las obligaciones operativas, los equipos de seguridad y cada uno de los pormenores necesarios para la movilización de carga por carretera.

La transportadora asigna el conductor y el vehículo para el traslado de la mercancía al puerto, de acuerdo con las necesidades del cliente, realizando primero el retiro del contenedor vacío en el patio de contenedores, previa instalación del sello de seguridad, antes de iniciar el traslado a centro de distribución de exportaciones.

Ya en el centro de distribución, el responsable del despacho y seguridad de la empresa inspecciona el vehículo y el contenedor antes de iniciar el proceso de cargue. Hecho esto, se inicia el cargue, se verifica el cumplimiento de las medidas de seguridad, se cierra el contenedor y se ubica precinto (sello de seguridad para cierre del contenedor tipo botella). Mientras tanto, el BPO realiza el registro de embarque, elabora el Documento de Exportación [DEX] y entrega ambos documentos al conductor encargado de llevar el vehículo al puerto.

Ya en puerto, la transportadora gestiona el ingreso del vehículo con la carga, mientras el BPO ingresa la información al sistema del puerto y presenta la carga para perfilamiento por parte de la autoridad, quien puede determinar si

se realizará: una inspección física, para determinar, a partir del reconocimiento de la mercancía, su naturaleza, origen, estado, cantidad, valor, clasificación arancelaria, tributos aduaneros aplicables, régimen aduanero y tratamiento tributario; una inspección física no intrusiva, esto es una operación de control que tiene como fin determinar la naturaleza, el estado, el número de bultos, el volumen, el peso y demás características de las mercancías, la carga, los medios o unidades de carga o los embalajes, mediante sistemas de alta tecnología que permitan visualizar estos aspectos a través de imágenes –sin perjuicio de la facultad de realizar inspección física cuando las circunstancias lo ameriten–; una inspección documental; un embarque directo. Según el caso, el operador portuario mueve la carga al sitio de la inspección o a la zona de exportaciones. La autoridad competente realiza las validaciones correspondientes y da aval para continuar el proceso. Luego, el BPO realiza el despacho entregando la carga al agente de carga y embarcador. Por último, la autoridad aduanera permite el cargue y zarpe del buque.

Ya en el destino, de acuerdo con los términos negociados, se realiza el agente de aduanas realiza la desaduanización y se traslada la mercancía a punto acordado. El BPO está en contacto con el cliente hasta el momento en que este confirma el recibo de la carga, una vez esto ocurre, el BOP notifica a la empresa, quien procede con el proceso de cobro de la factura, la legalización de las divisas o la validación de la transferencia.

## **CARACTERIZACIÓN DE LA INTEGRACIÓN EN SCQM**

### **GESTIÓN DE CALIDAD**

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación de la matriz de evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad correspondiente a cada uno de los agentes de la cadena de distribución. Para un detalle sobre las entrevistas que sirvieron de base para la realización de estas matrices se recomienda consultar la sección 5.3.1 del trabajo de Jiménez (2018). En todos los casos, se incluye una presentación visual de los resultados (TABLAS 7, 9, 11, 13 y 15), el resumen del estado de las dimensiones: estrategia, controles, procesos, tecnología y recursos humanos (TABLAS 8, 10, 12, 14 y 16) y las respectivas observaciones. Al terminar la presentación que corresponde a cada uno, se presentan los resultados consolidados.

## GESTIÓN DE CALIDAD EN EL ALIADO BPO

**Tabla 7. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el BPO**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Gestión de calidad inteligente		o o	o		o o
Gestión total de calidad	o o o o	o o	o o o	o o o	o o
Gestión de calidad				o	
Aseguramiento de calidad					
Control de calidad					
Inspección					

**Tabla 8. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el BPO**

Dimensión	Resultado
Estrategia	La percepción de gestión total de calidad es uniforme, lo que refleja que el personal de la organización reconoce y tiene claro cómo contribuir con sus resultados para responder a la estrategia que sus líderes direccionan hacia la gestión de calidad inteligente; son además conscientes del desarrollo hacia los socios comerciales.
Controles	La percepción se divide, en partes iguales entre gestión de calidad inteligente y gestión total de calidad. Hace falta alcanzar la certificación OEA para las importaciones, frente al tema ambiental, su participación como empresa de servicios es soportar los procesos de certificación, pero no identifican trabajo o contribución en este aspecto. Se encuentran en procesos de certificación para el manejo de la información.
Procesos	La percepción del 75% es de gestión total de calidad. Los procesos se encuentran claramente definidos, son de conocimiento y consulta para los involucrados y existe continuidad en los procesos con los aliados comerciales, aunque aún es preciso realizar un mayor trabajo en la planeación para que fluyan adecuadamente. Se presentan desarrollos de responsabilidad social e innovación a través de la empresa cliente y están en la etapa inicial de proyectos de energías alternativas.
Tecnología	Aunque la percepción se concentra en control total de calidad, hay deficiencias en las conexiones con los socios comerciales, si bien se encuentran desarrollos que permiten visualizar la información entre socios, no se da la integración entre sus sistemas. Algunos desarrollos para mejorar los controles a través de alertas para el personal de operación están en ejecución.
Recursos humanos	La percepción está dividida en partes iguales entre gestión de calidad inteligente y gestión total de calidad; se están realizando desarrollos de conocimiento para todos, sin embargo, frente al tema de sostenibilidad se encuentran en sus inicios y el tema solo es percibido por el personal directivo.

De acuerdo con estos resultados, el nivel de madurez del BPO es de gestión de calidad, pues si bien los resultados en los dominios estrategia, controles, procesos y recursos humanos están por encima o en el nivel gestión total de calidad, la definición del uso de la matriz de madurez establece que el nivel alcanzado corresponde al mínimo obtenido en los dominios. El menor nivel se presenta en el dominio tecnología, aunque se evidencian avances significativos que permitirán su salto al nivel de gestión de calidad inteligente.

El personal del BPO define calidad como el manejo de la información y de los documentos a tiempo y con precisión, centrandos sus controles en el cumplimiento de los procesos. A pesar de ello, no siempre se consiguen los resultados esperados. Los temas ambientales no se consideran como propios, manifiestan que la empresa cliente ha desarrollado algún tipo de trabajo y que ellos, como prestadores de servicios, participan directamente en los procesos de certificación y ajustan estos elementos para la selección de proveedores. Respecto del desarrollo con proveedores, hay avances, con negociaciones ganadoras en la operación, pero no se evidencia su involucramiento en el desarrollo de proyectos ambientales, como por ejemplo la disminución de emisiones de huella de carbono, pero menciona que su cliente sí trabaja en este tema con los proveedores de transporte seleccionados. Las herramientas tecnológicas, aunque permiten controlar la operación y garantizan su trazabilidad, no están integradas en su totalidad al interior del BPO y su integración con los socios comerciales es incipiente, pues cada uno tiene su propio sistema de información, lo que genera, en algunos casos, duplicidad de datos.

Considerando las apreciaciones presentadas por los colaboradores del BPO, se concluye que calidad en los procesos de comercio exterior se define como “un adecuado manejo de la información, que permita la presentación documental oportuna y garantice el adecuado funcionamiento, para que incluso en situaciones adversas, a nivel global o local, no afecten la operación de sus clientes” o como “el cumplimiento a tiempo con los requisitos legales para evitar ser cuestionados por la autoridad aduanera (...) suministrar la información suficiente y brindar el mayor detalle” o como “acatar la reglamentación frente a las resoluciones existentes para así blindar a la organización ante contingencias”. Se aprecia que los colaboradores son fundamentales para el éxito del negocio y se refleja la estabilidad laboral que puede permitir el crecimiento del conocimiento intelectual para el alcance de los resultados.

Se identifican con claridad las diferentes aristas consideradas para la calidad dentro de este sistema para la empresa cliente, la calidad debe estar presente, desde la concepción del producto, a través de la validación de las características y especificaciones técnicas de este, en sus materias primas y sus proveedores e igualmente con los proveedores de servicios, quienes deben garantizar la efectividad en sus actuaciones; por ello, se han definido perfiles y estándares de operación que identifican los posibles riesgos asociados a los procedimientos, con el propósito de establecer los mecanismos de cobertura que garanticen cubrir sus operaciones y compromisos frente a los clientes.

### GESTIÓN DE CALIDAD EN EL AGENTE DE ADUANAS

De acuerdo con los resultados obtenidos y según lo establecido para la valoración global, el grado de madurez de calidad del agente de aduanas es de gestión total de calidad. Lo observado permite concluir que el agente de aduanas define la calidad en los procesos de comercio exterior como el cumplimiento con

**Tabla 9. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el agente de aduanas**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Gestión de calidad inteligente	Δ		Δ		Δ
Gestión total de calidad		Δ		Δ	
Gestión de calidad					
Aseguramiento de calidad					
Control de calidad					
Inspección					

**Tabla 10. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el agente de aduanas**

Dimensión	Resultado
Estrategia	La percepción de gestión total de calidad es uniforme, lo que refleja que el personal de la organización reconoce y tiene claro cómo contribuir con sus resultados para responder a la estrategia que sus líderes direccionan hacia la gestión de calidad inteligente; son además conscientes del desarrollo hacia los socios comerciales.
Controles	La percepción se divide, en partes iguales entre gestión de calidad inteligente y gestión total de calidad. Hace falta alcanzar la certificación OEA para las importaciones, frente al tema ambiental, su participación como empresa de servicios es soportar los procesos de certificación, pero no identifican trabajo o contribución en este aspecto. Se encuentran en procesos de certificación para el manejo de la información.
Procesos	La percepción del 75% es de gestión total de calidad. Los procesos se encuentran claramente definidos, son de conocimiento y consulta para los involucrados y existe continuidad en los procesos con los aliados comerciales, aunque aún es preciso realizar un mayor trabajo en la planeación para que fluyan adecuadamente. Se presentan desarrollos de responsabilidad social e innovación a través de la empresa cliente y están en la etapa inicial de proyectos de energías alternativas.
Tecnología	Aunque la percepción se concentra en control total de calidad, hay deficiencias en las conexiones con los socios comerciales, si bien se encuentran desarrollos que permiten visualizar la información entre socios, no se da la integración entre sus sistemas. Algunos desarrollos para mejorar los controles a través de alertas para el personal de operación están en ejecución.
Recursos humanos	La percepción está dividida en partes iguales entre gestión de calidad inteligente y gestión total de calidad; se están realizando desarrollos de conocimiento para todos, sin embargo, frente al tema de sostenibilidad se encuentran en sus inicios y el tema solo es percibido por el personal directivo.

la exactitud de las operaciones, lo que depende de la disponibilidad oportuna de la información que facilita el cumplimiento documental y físico –que se obtiene gracias al conocimiento previo de la operación–, el profesionalismo y el dominio de la norma, elementos necesarios para alcanzar todos los beneficios que ofrecen los acuerdos internacionales y controlar los costos portuarios. Se evitan así sobrecostos logísticos y se consigue que el cliente obtenga los resultados esperados y a tiempo.

El propósito en calidad es vincular a sus aliados comerciales para que alcancen el mismo nivel, es decir, construir operaciones donde el liderazgo y la confianza –hacia y desde los clientes– inviten a trabajar con fuerza en alianzas que agilicen y faciliten los procesos.

#### **GESTIÓN DE CALIDAD EN LA TRANSPORTADORA DE CARGA POR CARRETERA**

**Tabla 11. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la transportadora**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Gestión de calidad inteligente	○		○		○
Gestión total de calidad		○			
Gestión de calidad					
Aseguramiento de calidad				○	
Control de calidad					
Inspección					

**Tabla 12. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la transportadora**

Dimensión	Resultado
Estrategia	La percepción es de un nivel de madurez de calidad inteligente, que se refleja en el querer avanzar con sus clientes y se evidencia al contar con el cargo estratégico de Director de Nuevos Negocios. Aunque presenta ejemplos contundentes de trabajo con los clientes y proveedores con valiosas alianzas y negociaciones como aspectos clave de la estrategia, hace falta desarrollo de la compañía, si bien es claro su posicionamiento en Colombia y en algunos países latinoamericanos, ser una compañía global implica una presencia global, y eso es parte de lo que se encuentran fortaleciendo.
Controles	La percepción en de un nivel de madurez de gestión total de calidad. Sus certificaciones contribuyen con la eficaz planeación logística; su sistema de información tiene incorporadas alertas automáticas que realizan los controles necesarios dentro de la operación. Sorprende que no se menciona el sistema de gestión de calidad y las no conformidades como medidas que ayuden a controlar los procesos, lo cual obedece a la centralización de la empresa en Medellín. La empresa ha participado en la certificación OEA de clientes y está dispuesto a certificarse como tal, cuando la DIAN habilite la opción. Aunque participa en proyectos de huella de carbono con algunos clientes, es necesario fortalecer los temas de sostenibilidad y proyectos para disminución de contaminantes.

**Tabla 12. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la transportadora (cont.)**

Dimensión	Resultado
Procesos	La percepción en de un nivel madurez de gestión de calidad inteligente, sin embargo, se considera el nivel gestión total de calidad dado el trabajo que viene desarrollando con los clientes para alinearse con ellos. No se identifican procesos globales porque su presencia es muy local.
Tecnología	La percepción es de un nivel de madurez de aseguramiento de calidad. Al contar con el ERP SAP®, la integración a nivel de la organización es completa, sin embargo, la integración con sus socios comerciales no ha sido una tarea fácil. Se debe trabajar por una búsqueda de visibilidad que facilite la planeación y programación de los vehículos. Aunque los clientes tienen la posibilidad de monitorear el estado de su carga, aún se recibe la información de ellos por e-mail y WhatsApp. no a través de su ERP. Con el Ministerio de Transporte si existen las interfaces que permiten compartir la información en tiempo real. Frente a un sistema que soporte el sistema de gestión de calidad, no se hace ninguna mención.
Recursos humanos	La percepción es de un nivel de madurez de gestión total de calidad, lo que se puede validar con la unificación de políticas para los colaboradores en los países donde tiene presencia. Y aunque el 75% de sus conductores son terceros, el nivel de fidelidad es muy alto, lo que según el personal de la empresa obedece a que son una de las pocas empresas de transporte que cancelan el cumplimiento –el documento que avala la satisfacción del cliente por la entrega realizada–, el mismo día que lo presenta el conductor.

Dados estos resultados, el nivel de madurez de calidad de la empresa de transporte es de aseguramiento de calidad. Su propósito, respecto de la calidad, se enmarca en el manejo del tiempo como elemento clave, por ello el control es crucial, sin embargo, no logrará mayores resultados hasta no alcanzar mayores desarrollos con sus clientes. En este propósito, debería aprovechar su buen nombre y la confianza ganada con ellos para buscar la integración de sus sistemas de información, de tal manera que puedan visibilizar la operación para optimizar el uso de la flota.

#### GESTIÓN DE CALIDAD EN EL PUERTO

**Tabla 13. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el puerto**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Gestión de calidad inteligente		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gestión total de calidad	<input type="checkbox"/>				
Gestión de calidad					
Aseguramiento de calidad					
Control de calidad					
Inspección					

**Tabla 14. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en el puerto**

Dimensión	Resultado
Estrategia	La percepción indica un nivel de madurez de gestión total de calidad. Aunque han logrado integrar las diversas gracias a las certificaciones, no se ha logrado avanzar hacia la comunidad portuaria, pues cada partícipe tiene estrategias y avanza a un ritmo diferente. Avanzar en ello sería lo ideal, pues los proveedores hacen parte del servicio y lo afectan, dado que ante los clientes son un único puerto. Indican que las gerencias general y comercial están al frente del desarrollo global, pero no se comparte información.
Controles	La percepción del nivel de madurez es de gestión de calidad inteligente. Se menciona haber superado el nivel gestión total de calidad, aunque frente a la integralidad de datos y la honestidad no hay ninguna mención. Dentro de los controles impacta fuertemente el trato a los trabajadores (cuentan con varios sindicatos) y a la comunidad, por lo que se mantienen programas de mejoramiento hacia el colaborador y se cuenta con una fundación encargada del manejo de los programas de responsabilidad social empresarial. Indican que se han desarrollado espacios especiales para que los operadores de grúas puedan tener momentos de relajación acordes con el nivel alto de estrés que supone su trabajo. Mencionan que el sindicato ha incidido en el logro de beneficios para los trabajadores. Para la operación cuentan con matrices de riesgos, cuyos controles están asociadas a cada uno de los procesos, y cada proceso tiene su correspondiente responsable.
Procesos	La percepción de madurez de la calidad es de gestión de calidad inteligente. Ella ha cambiado incluso en la estructura organizacional, hoy calidad está dentro de la Gerencia de Estrategia e Innovación –antes eran “dos personas”–, quien lidera proyectos de innovación con la participación de los colaboradores, enmarcados en los enfoques de reducción costos, medio ambiente y mejora de procesos.
Tecnología	La percepción de madurez es de gestión de calidad inteligente. Actualmente cuenta con un relativamente nuevo sistema de información que busca mayor independencia para el usuario; el sistema funciona en línea, es integral y el cliente lo opera a través de un portal. La facturación electrónica, por ejemplo, es uno de sus alcances, el usuario no depende de ningún funcionario, sino que se atiende a través de la plataforma.
Recursos humanos	La percepción es de gestión de calidad inteligente. El puerto ha avanzado por los compromisos sindicales contemplados en las convenciones colectivas y hoy está más atento a sus requerimientos para el bienestar de los empleados. En cuanto a la sostenibilidad, se encuentran en proceso de desarrollo la generación de energía para las grúas a partir de paneles solares, lo que, además de eliminar la dependencia de derivados del petróleo en la operación, representará ahorros significativos.

De acuerdo con los resultados, su nivel de madurez en la gestión de la calidad corresponde al de gestión total de calidad. Sin embargo, es necesario un mayor trabajo, en especial con la comunidad portuaria, los gremios y las entidades del gobierno.

Su propósito de calidad se enmarca en lograr una mayor integración con la comunidad portuaria, los proveedores y los clientes. Se considera de suma importancia el impulso del gobierno a través del apoyo para la alineación normativa y la facilidad de integración de todos los procesos, como indican “no es solo la norma, es facilitar el ambiente para que se lleve a cabo”.

**GESTIÓN DE CALIDAD EN LA ADUANA**

**Tabla 15. Percepción del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la aduana**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Gestión de calidad inteligente	■	■	■	■	
Gestión total de calidad					■
Gestión de calidad					
Aseguramiento de calidad					
Control de calidad					
Inspección					

**Tabla 16. Evaluación del nivel de madurez de la gestión de la calidad en la aduana**

Dimensión	Resultado
Estrategia	La percepción es de un nivel de madurez de gestión de calidad inteligente. Aunque han avanzado en el conocimiento gracias a los sistemas de gestión, aún es necesario fortalecer a los auxiliares de la función aduanera (puerto, agentes de aduana, agentes de carga y todos aquellos participantes de los procesos de aduana), puesto que no se encuentran a su mismo nivel; hace falta también un mayor conocimiento entre las entidades del Estado (Policía antinarcoóticos y Superintendencia de Industria y Comercio - SIC). Actualmente, el conocimiento se da a través de la web, atención personalizadas al usuario, creación de conciencia al ciudadano, participación que se da en la creación de la norma, formación en la normas y OEA.
Controles	La percepción del nivel de madurez es de gestión de calidad inteligente. Son los líderes en la certificación OEA; en lo relacionado con la evaluación de la honestidad y el buen trato, cuentan con mediciones del clima laboral hacia los colaboradores, se socializan los resultados y se establecen los planes de mejoramiento; los controles se soportan a través de la normatividad y la legislación nacional y supranacional.
Procesos	La percepción del nivel de madurez es de gestión de calidad inteligente. Se evidencian desarrollos de alineación con procesos a nivel interinstitucional e internacional, como es el caso de las OEA. Cuentan con una política ambiental orientada al ahorro en consumos. Han avanzado en la formulación de acuerdos de reconocimiento mutuo con otras aduanas, como es el caso de las de Costa Rica y las de los países de la Alianza Pacífico.
Tecnología	La percepción del nivel de madurez es de gestión de calidad inteligente. La integración se da al interior de la entidad, a través del sistema informático electrónico. Respecto de la integración con otras entidades, hay una gran oportunidad en especial con la Policía antinarcoóticos y la Superintendencia de Industria y Comercio [SIC]. Frente al desarrollo global, se cuenta con un área que se encarga del manejo internacional con otras entidades y, aunque no se encuentran conectados a través de sistemas de información, si existen compromisos de colaboración a cargo de la Sub-Dirección Internacional, que facilitan, por ejemplo, la validación de la autenticidad de las facturas.
Recursos humanos	La percepción es de nivel de madurez de gestión total de calidad.

De acuerdo con los resultados, su nivel de madurez de la calidad es de gestión total de calidad. Su concepto de calidad se enmarca en el control que permite garantizar la legalidad y seguridad del comercio a nivel mundial, donde es fundamental la capacitación al usuario para facilitar el conocimiento de sus responsabilidades.

#### GESTIÓN DE CALIDAD – RESULTADOS CONSOLIDADOS

Al consolidar los resultados individuales (TABLA 17), se concluye que el nivel que le corresponde a la red es el de aseguramiento de calidad, lo que resulta primordialmente del relativamente bajo nivel observado en la dimensión tecnología donde, aunque las organizaciones han realizado fuertes inversiones, está aún pendiente la necesaria integración entre los miembros de la red. Esa integración permitiría agilizar y facilitar las operaciones de todos los miembros de la red e impactaría favorablemente a los demás dominios, que dicho sea de paso, hoy se encuentran un paso adelante, en el nivel de gestión total de calidad.

**Tabla 17. Percepción consolidada del nivel de madurez de la gestión de la calidad**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Gestión de calidad inteligente	△ ○ ■	□ ■	△ ○ □ ■	□ ■	△ □
Gestión total de calidad	○ □	○ △ ○	○	○ △	○ ○ □ ■
Gestión de calidad					
Aseguramiento de calidad				○	
Control de calidad					
Inspección					

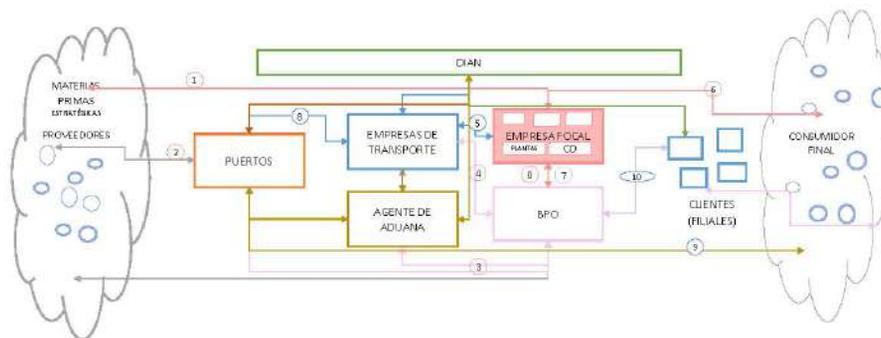
Como se puede apreciar en la TABLA 17, aunque el nivel alcanzado por cada miembro de la red es bueno, al trabajar con sus socios comerciales, aliados de negocio o auxiliares de la función aduanera, se encuentran falencias, lo que evidencia la falta de trabajo conjunto que mejore la calidad en los procesos de comercio exterior y la necesidad del manejo documental a través de plataformas electrónicas que agilicen y permitan visibilidad para anticipar los trámites.

Los resultados obtenidos en cada organización permiten proponer un concepto consolidado de calidad para el comercio exterior: calidad es el

cumplimiento con exactitud de las operaciones, a través de conexiones con los socios comerciales, mediante el manejo de información anticipada y oportuna que facilita la actuación a tiempo y precisa ante las aduanas, frente a los controles que velan por la legalidad y seguridad del comercio a nivel mundial; es responder al cliente, incluso en situaciones adversas, según el nivel de servicio acordado, con mínimos costos, a tiempo y en el lugar pactado.

### GESTIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO

En la cadena de suministro se establecen los vínculos que se presentan en la FIGURA 6, en ella se identifica un sistema definido, donde cada miembro de la red tiene un rol claro y cualquier inconveniente: documental, operativo, de información o de gestión se traduce en demoras, sobrecostos o incumplimientos para los miembros de la red.



**Figura 6. Cadena de suministro para el comercio exterior**

Como se observa en la FIGURA 6, cuando la empresa requiere materia prima del exterior, antes de hacer el pedido al proveedor, le comparte la necesidad de traer esa carga al aliado de negocio BPO, quien inicialmente lo asesora en temas normativos. Una vez este aspecto está claro, la empresa le envía la orden de compra al proveedor (ver 1 en FIGURA 6), quien la despacha según la negociación realizada; la mercancía llega a uno de los puertos (2), donde el BPO inicia su gestión o la coordina con el agente de aduanas (3), asimismo, inicia la coordinación con la empresa de transporte para el retiro de la carga del puerto (4); mientras, la empresa de transporte realiza trámite ante el puerto para el ingreso y la continuación del trámite de llevar la carga a la planta

correspondiente (5). Una vez la carga es entregada se procede con la devolución del contenedor vacío. En el otro sentido, cuando la empresa identifica una venta al exterior (6), comparte la necesidad de realizar la entrega con el BPO (7), quien inicia la gestión (3) o la coordina con el agente de aduanas, paralelamente inicia la coordinación con la empresa de transporte (8) para el retiro del contenedor vacío y su traslado, primero al centro de distribución, para el cargue, luego al puerto; el BPO o el agente de aduanas (según corresponda) realiza la gestión aduanera y despacha la mercancía en puerto (9). Al final, el BPO confirma con el cliente el recibo de la mercancía en el destino (10) y le notifica el fin del proceso a la empresa (0).

Una vez conocido el proceso de abastecimiento y distribución para el comercio exterior, y tomando en cuenta lo dicho en las entrevistas, se obtienen, como frases recurrentes respecto de la cadena de suministro: participación de varias empresas; sinergia de la distribución física para ubicar un producto desde un lugar de origen hacia un lugar de destino; importancia de coordinar, controlar, prevenir e integrarse; oportunidad en la información; necesidad de una adecuada selección de asociados; y satisfacción del cliente.

Aunque para todos es claro conceptualmente que hacen parte de una cadena de suministro y que esta requiere integración, en la práctica no es tan fácil alcanzar la coordinación y los enlaces que se requieren. En las entrevistas se obtienen estas afirmaciones acerca de la cadena de suministro:

... se requiere integralidad, una conexión permanente con el cliente acerca de la estrategia y su planificación (...) en ocasiones los pedidos nos caen como globos (...) cuando se intenta realizar la planeación la respuesta es que se maneje la misma de los años anteriores (...) la coordinación se limita a lo que recibo del cliente (...) tenemos otra empresa que funciona como respaldo, si tenemos un inconveniente con la nuestra, respondemos con la otra, así garantizamos el flujo de la carga de nuestro cliente, prevenimos el riesgo (...) sentimos que nos asignan la carga cuando ya está en el puerto.

Al unificar la matriz de evaluación para madurez en la cadena de suministro, se obtiene un nivel de logística ventaja competitiva, como se ilustra en la TABLA 18. En los dominios evaluados para la cadena, se refleja una gran dispersión en el nivel de madurez; que va desde el nivel de logística ventaja competitiva hasta el nivel de redes de cadenas de suministro (el más alto). Lo anterior refleja diversidad y falta de unificación de estrategias entre sus miembros, como

producto de su falta de integración. Si bien algunos de sus “eslabones” muestran desarrollos a través de alianzas o creación de empresas con el propósito de garantizar la operación o ampliar los servicios, aún no se trabaja en estrategias conjuntas, salvo en casos aislados o para proyectos puntuales. En ningún caso se ha logrado estructurar la coordinación proveedor-empresa-cliente.

**Tabla 18. Resultados consolidados de la matriz de evaluación de la madurez de la calidad en la cadena de suministro**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Redes de cadena de suministro	△	△ □	△ ■	△	△
Gestión de la cadena de suministro	□	■ ○	□ ○	■ ○	■ □ ○
Logística generadora de valor	○ ○	○	○	○	
Logística ventaja competitiva	■			□	○
Logística integral					
Distribución física					

Para su operación, los participantes de la red tienen claramente definidos sus procesos al interior de sus organizaciones y cuentan con matrices de riesgo a partir de las cuales establecen controles sobre su operación. Pero los procesos no se integran –o se integran poco–, con sus proveedores y clientes. “Hace falta establecer jerarquías, no todas las entidades están al mismo nivel, eso es parte de lo que se busca perfeccionar (...) con los proveedores se ha tratado de integrar la información con el sistema de información, pero no ha sido una labor fácil, estamos en pruebas”, son algunas de las afirmaciones.

Respecto del dominio tecnología, las empresas reflejan desarrollos robustos e inversiones tecnológicas dirigidas a integrar sus sistemas de información y contar con información en línea, pero cuando la tecnología implica compartir información o integrarse a través de redes tecnológicas, el nivel de desarrollo no es el mejor, pues cada uno espera que su aliado se integre a su sistema, lo que hace que el avance en esta materia sea de los menores.

En el dominio de RR.HH, se destaca la coincidencia respecto del nivel de profesionalización del personal y del involucramiento de las directivas, aunque cada uno cuenta con sus programas de formación, no existen programas que

los integren, aunque se encuentren situaciones particulares que los convocan, como es el caso de los cambios normativos o de la construcción de una formación unificada para responder ante la necesidad de un sector. En general, cada uno hace grandes esfuerzos individuales y parece olvidar que cuando trabajan juntos los resultados son mayores, como cuando “... gracias a que el proveedor entendió la necesidad del cliente, los beneficios logrados son el establecimiento de rutas de compensación con mejores tarifas e incluso ajustes a la estructura vehicular para mayor cubillaje”.

Con los resultados de la matriz de evaluación para madurez en la cadena de suministro unificada, se consideran las diferentes perspectivas y se unifica en un solo concepto, así: cadena de suministro en el comercio exterior es el cumplimiento con exactitud de las operaciones a través de conexiones y relacionamiento con los asociados de negocio, mediante el manejo de la información anticipada y oportuna, que facilita la actuación a tiempo y precisa frente a los controles aduaneros que velan por la legalidad y seguridad del comercio a nivel mundial, es responder al cliente incluso en situaciones adversas según el nivel de servicio acordado con mínimos costos, a tiempo y en el lugar pactado; lo que se complementa con “el éxito de la cadena de abastecimiento en temas de aduana es adelantarse a, tener todo previsto, requisitos, vistos buenos, para que cuando la mercancía llegue, todo esté coordinado.; si algo no está se entorpece el proceso, se generan sobrecostos y la cadena de suministro no fluye.

## **GESTIÓN DE CALIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO**

Al realizar la integración como gestión de calidad en la cadena de suministro –y validarla con las empresas que integran la cadena–, se encontró que sí existen desarrollos aislados, en proyectos puntuales –denominados especiales–, donde se da la planeación conjunta, la comunicación permanente y la definición de roles y jerarquías claras para la actuación a lo largo del proceso donde, en consecuencia– la fluidez es mayor que en el día a día, en los que todos en la red están notificados e incluso las autoridades colaboran mediante su actuación oportuna. Sin embargo, cuando la operación termina, se realiza una evaluación final del proceso con la participación de todos, se identifican las lecciones aprendidas –para la siguiente operación especial– pero que en ocasiones no se capitalizan para mejorar el proceso.

La gestión de calidad en la cadena de suministro es una forma de avanzar en la integración, es ir más allá de lo que hasta ahora se ha hecho, no es

sugerir al cliente que su producto puede estar sujeto a una norma de origen o requerimiento para que la consiga con su proveedor, sino acompañarlo en ese proceso; pero para esto el cliente debe darle la debida importancia desde el momento inicial. No es disponer el sistema de información para que los demás se conecten, sino evaluar cómo todos se integran según las necesidades de cada uno. Cabe resaltar el reconocimiento y respeto de cada uno de los participantes de la red por sus pares, todos reconocen la excelencia y el trabajo de cada uno, así como los avances logrados a lo largo del tiempo. Asimismo, los miembros de la red consideran que hay herramientas que están ayudando a que se dé la integración, es el caso de la obtención del certificado como OEA. Cuando la empresa cliente lo obtuvo para su proceso de exportaciones, los demás miembros de la red participaron como socios de negocio, y lo están haciendo ahora cuando la empresa está buscando certificar también su proceso de importaciones. Además han manifestado su interés en certificarse una vez puedan acceder, de hecho, el agente de aduanas ya presentó una solicitud –en Colombia certificarse como OEA solo está al alcance de los importadores, los exportadores y los agentes de aduana.

En la TABLA 17 fue posible apreciar que la calidad en la red refleja una menor dispersión y con ella mayor uniformidad en el nivel de madurez de los participantes, aunque se muestra un rezago en la dimensión tecnología, principalmente en la conexiones con socios comerciales por parte de la empresa de transporte, mientras que en la TABLA 18 es claro que la cadena de suministro presenta un desplazamiento hacia niveles inferiores del nivel de madurez, producto de la exigencia en sus diferentes dominios, donde los avances dependen de la integración entre los aliados a través de la colaboración y la visibilidad, los aspectos con dificultades en el desarrollo, las negociaciones a largo plazo, la profesionalización de todos en la red y el compartir información en ambos sentidos; con el gobierno, los proveedores y los clientes.

Al unificar en la matriz de evaluación para madurez en la gestión de calidad en la cadena de suministro se obtiene un nivel de madurez de impulso (ver TABLA 19), en general, como se puede apreciar, los dominios tienen niveles más bajos que los obtenidos en calidad y en cadena de suministro. La tecnología conserva el mismo nivel que en las matrices anteriores y a ella se suman procesos y recursos humanos, dadas las citadas dificultades de colaboración y visibilidad entre los participantes. Aunque es clara la importancia de la tecnología para la operación, el funcionamiento de la red entre los diferentes miembros no

avanza a pesar de los años de trabajo conjunto, por lo que se concluye que hace falta desarrollar herramientas que afiancen los lazos de la confianza y permitan gestionar interfaces que faciliten el proceso.

**Tabla 19. Resultados de la matriz de evaluación de la madurez de la gestión de la calidad en la cadena de suministro**

	Estrategia	Controles	Procesos	Tecnología	RR.HH
Pionero	■△	■	△■	△	△
Óptimo	□	△□	□		
Íntegro	°○	°○	°	■○	■°○
Impulso			○	°□	□
Inicio					
Incipiente					

Los dominios procesos y recurso humano, al igual que tecnología se ubican en el nivel impulso en la matriz de madurez, pese a contar con procesos claramente definidos y con matrices de riesgo a lo largo del proceso de comercio exterior, pero es necesario alinearlas para mitigar de principio a fin un posible evento. Se presenta un mayor nivel de desarrollo de madurez en las dimensiones estrategia y control, la primera, dado que corresponde a la proyección de cada negocio, la segunda, debido a la interacción directa con los demás agentes en la red.

Bajo este análisis, gestión de calidad en la cadena de abastecimiento [SCQM], para los agentes, es el pedido perfecto a través de la red en tiempo, producto y documentos que se ponen en el sitio acordado, para que cada uno de los participantes –y quien lo requiera en la red– avance en su proceso, es una mayor participación que inicia desde el momento de la negociación y va hasta el cierre y la evaluación de la operación, es alcanzar mayor transparencia en todo.

## EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES INTERNAS

El concepto de colaboración para los participantes del proyecto va, desde recibir una ayuda gracias a la cercanía que se tiene con el funcionario de turno, hasta las realizaciones conjuntas transportador-proveedor BPO dirigidas a lograr mejores resultados para el cliente (menores costos), donde todos se favorecen, los desarrollos informáticos donde el transportador colabora con la

digitación directa sobre la plataforma del BPO para así facilitar que se conozca el estado de la operación en tiempo real para cada orden. En este momento el indicador de diligenciamiento con oportunidad es bajo, está entre 50 y 65 %. Colaboración es más que conocerse, es demostrar, a través de la relación comercial y el cumplimiento, que se gana la confianza que en el mediano plazo permite desarrollar los esquemas colaborativos en nuevos proyectos.

Frente a las entidades de gobierno, se reconoce la existencia de mecanismos de colaboración globales, a través de oficinas especializadas que canalizan la información; aun no hay visibilidad, pero si colaboración entre entidades y eso incluso hace parte de acuerdos internacionales firmados por Colombia. Respecto de la normatividad –y dado que en el 2018 un nuevo decreto, el 349 de 2018, hace parte de la normatividad aduanera–, las opiniones sobre colaboración no están muy a su favor, dado que no ha entrado en vigor en su totalidad. Se presenta una norma fraccionada que, a juicio de los entrevistados, incluye nuevos elementos para que cada uno de los actores (puertos, transportadores y agentes de aduana) establezca nuevos controles para evitar sanciones o multas, lo que afecta negativamente la velocidad de las operaciones.

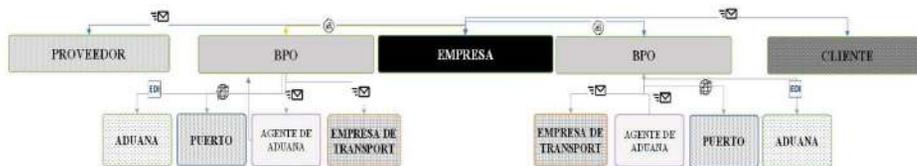
Para agilizar las operaciones las empresas cuentan con algún ERP y, en general, con sistemas de información especializados, desarrollados de acuerdo con sus necesidades particulares, robustos y capaces de soportar la operación. En algunos casos permiten a sus clientes auto gestionar algunas operaciones, como es el caso del puerto quien, a través de su nuevo sistema de información, facilita a los clientes ingresar a la plataforma a través de la Internet y gestionar, por ejemplo: el ingreso de vehículos para retiro, el ingreso de la carga o la facturación por los servicios prestados; en este caso, si bien se presentaron inconvenientes al inicio (marzo de 2018), la situación se ha estabilizado el mismo puerto considera que en los inicios fue traumático pero que se ha ido estabilizando y hoy la opinión general es favorable ya que “nos permite gestionar solos nuestra operación”.

En el caso de la Aduana, a través de VUCE, Muisca o SYGA, los usuarios gestionan vistos buenos, solicitud de levante, declaraciones de importación y documentos de exportación. Si bien algunos usuarios manifiestan que el sistema se “cae” con frecuencia (80% del tiempo) y que ello significa eventuales pérdidas –y reingreso– de la información en proceso, otros consideran que el nivel de conectividad supera al 90%, “no hemos vuelto a tener inconveniente, siempre que se requiere funciona”.

El BPO, el agente de aduanas y la transportadora consideran que colaboran con su cliente al compartir un usuario que le da acceso a información de la operación en tiempo real, pero que ello no es aprovechado, “a veces la clave se inhabilita por falta de uso (...) no revisan la trazabilidad”. Cada empresa reporta diariamente por email el estado de la operación y los cambios de estado.

Aunque se dispone de adecuados sistemas de información, la conectividad aún tiene grandes oportunidades de desarrollo, las solicitudes de servicio o status se manejan a través de email, aunque existen algunas conexiones a través de Internet, acceso al sistema de información del cliente y EDI.

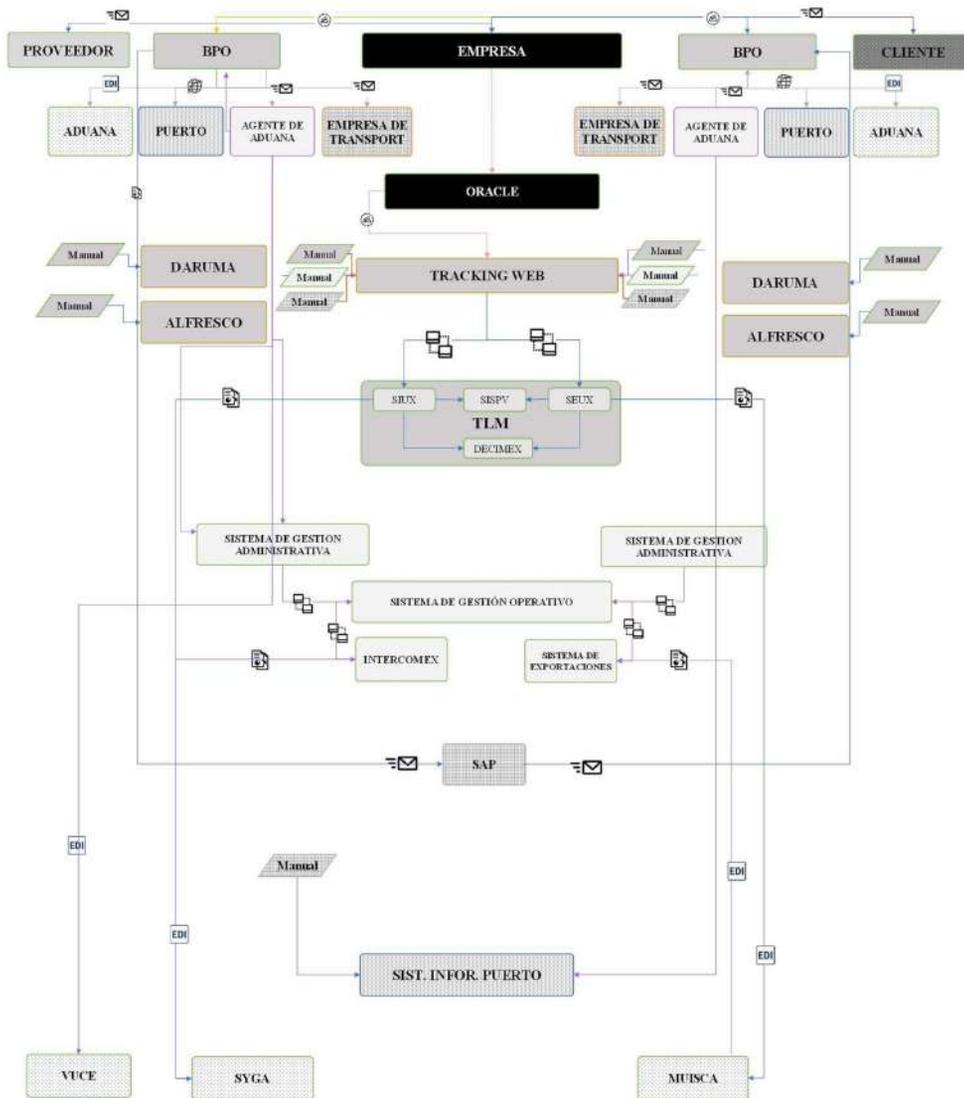
En la FIGURA 7 se observa una conexión entre la empresa en estudio y el BPO a través del sistema de información, mediante un usuario que brinda acceso a las órdenes de servicio (importación o exportación) y a las facturas por servicios. El BPO gestiona con sus proveedores de servicios y con la empresa de transporte a través de email; con el agente de aduanas y el puerto tiene una conexión accesible por Internet a través de una plataforma; y con la aduana la conectividad es vía EDI. A pesar de contar con tecnología, la integración tiene inconvenientes de visibilidad; “de que me sirve la visibilidad si no se es oportuno con la información”, comenta uno de los miembros del estudio.



**Figura 7. Conexión entre los participantes del proceso de comercio exterior**

En la FIGURA 8 se encuentran los sistemas de información y se muestra cómo se dan las principales interacciones entre los participantes del proceso de comercio exterior. El flujo se inicia cuando la empresa realiza una operación –compra o venta– en el exterior y ella es identificada por el BPO a través del ERP. En ese momento, como se ha dicho, el BPO decide realizar la gestión de aduana directamente o tercerizar, y de eso depende el resto del flujo. En esa figura se destacan tres aspectos: la relevancia de la comunicación vía email en muchos procesos, incluso en algunos donde existen sistemas que son accesibles para todos los interesados, excepto por parte del puerto y la aduana; el uso *sine*

*qua non* de los sistemas de información provistos por la aduana y el puerto; y la duplicidad de esfuerzos que representa no utilizar los sistemas previstos, como el que permite trazabilidad en el movimiento de la carga. Para una descripción detallada de los sistemas utilizados por los miembros de la cadena en cada etapa del proceso (FIGURA 8), se recomienda consultar a Jiménez (2018).



**Figura 8. Sistemas de información vinculados en el proceso de comercio exterior**

Resumiendo, a pesar de que la empresa destaca el rol protagónico de la tecnología para facilitar la colaboración que permite la conectividad y que facilita la visibilidad, entre los interesados se valora cómo cada organización cuenta con sistemas de información robustos y capaces de integrarse, pero sin interfaces que faciliten la visibilidad de todo el proceso. La integración de los sistemas de información, es claro, es uno de los mayores retos de la cadena de suministro, más aún cuando existen dudas conceptuales sobre sus bondades “y cómo controló a un tercero que va tener toda mi información”.

Al avanzar hacia la variable gestión de conocimiento en las entrevistas no se evidencian desarrollos avanzados, es claro que todos los participantes tienen establecidos perfiles definidos que les permiten contar con personal competente según lo definido en sus procedimientos, pero pocas veces se considera al otro miembro de la red como alguien que podrá generar conocimiento en su proceso, probablemente debido a que aún se encuentra en desarrollo la colaboración y visibilidad a nivel de la misma compañía. Además, cada participante tiene implementaciones recientes de sistemas de información y está en el proceso de familiarizarse con él, reconocerlo; en algunos casos, inclusive hay desarrollos pendientes. El conocimiento, si es aprovechado para nuevas negociaciones con un nuevo proveedor o nuevos cliente, puede ser de gran utilidad, sobre todo cuando, por la presencia de alguna particularidad, se puede aprovechar la experiencia adquirida. Por otra parte, existe una gran preocupación por la pérdida de conocimientos –la pérdida de la memoria– sobre todo al momento del cambio generacional producto del retiro del personal al cumplir su tiempo laboral.

Un hallazgo particular es el sentimiento generalizado de que es el aliado quien requiere gestionar el conocimiento, en lugar de pensar en esta tarea como una construcción colectiva de los miembros de la red. Sin embargo, hay avances, como la creación de cargos estratégicos que buscan, a partir de la información conocida del cliente, establecer proyectos que pueda ser favorables para ambos.

Después de presentar los resultados de las entrevistas se analizaron los resultados de la evaluación para madurez para las variables internas colaboración, visibilidad y gestión del conocimiento (TABLA 20). Es difícil para las organizaciones autoevaluarse y calificarse en niveles inferiores (incipiente, inicio o impulso), pues consideran que ellos han avanzado y no pueden “hacer más” para que los demás avancen con ellos. Pese a ello, tres organizaciones se

calificaron en el nivel de impulso, pues se han integrado, pero no con todos y vienen desarrollando mecanismos para lograrlo, como son la construcción de interfaces y el desarrollo de una plataforma donde el proveedor gestione los avances. A pesar de las bondades de estas ideas, en algunos casos han significado, en la práctica, duplicidad de la información; en el sistema de la empresa y para el cliente. Los casos donde se perciben calificaciones superiores son aislados o forman parte de la estrategia, la percepción no implica que se estén efectuando actualmente; sin embargo, se decidió mantener la percepción de los participantes y sobre ella efectuar el análisis.

**Tabla 20. Resultados de la matriz de evaluación de la madurez de la calidad de las variables internas**

Tabla 20	Colaboración	Viabilidad	Gestión del conocimiento
Pionero	△	△	△
Óptimo	○ ■		□
Íntegro	□ °	■ □ ○	°
Impulso		°	○ ■
Inicio			
Incipiente			

Se observa que, aunque existen desarrollos en colaboración, visibilidad y gestión del conocimiento, la red para la empresa se encuentra en un nivel de madurez de inicio, primordialmente por la escasez de desarrollos y el estar en una etapa de unificación a nivel de cada organización. Se encuentra un mayor desarrollo en colaboración, donde los avances vienen jalonados por la globalización empresarial, con proyectos para lograr mayores niveles. Actualmente se comparten datos acordados y necesarios para gestionar con agilidad las operaciones. En visibilidad, se ha iniciado este proceso pero aún no permite establecer controles, monitoreo o cambios de decisiones en tiempo real, aún la información no es para quien la necesita ni la requiere, falta generar un mayor nivel de confianza, el necesario para que se den estos accesos. El siguiente paso es formar parte de *blockchains*, con bases de datos descentralizadas, seguridad de datos, transparencia de la información, inmutabilidad de la información y contratos inteligentes, como las caracterizan Kouhizadeh y Sarkis (2018).

## EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES CONTEXTUALES

En la TABLA 21 se presentan las percepciones de los participantes del proyecto respecto de la aduana, el puerto, el agente de aduanas y la transportadora de carga por carretera, cabe mencionar que algunas personas manifestaron tener poco conocimiento de los demás participantes o conocer solo el momento en que interactúan, lo que de entrada refleja la poca presencia de procesos colaborativos a lo largo de la red, que limita la creación del conocimiento entre ellos. Esta evaluación fue la oportunidad para conocer proyectos, inconvenientes y oportunidades de desarrollo. Luego de la tabla, se presenta lo correspondiente a cada entidad.

**Tabla 21. Resultados de la matriz de evaluación de la madurez de la calidad de las variables contextuales**

	Agente de aduanas	Puerto	Empresa de transporte	Aduana
Pionero				
Óptimo	○			
Íntegro		△ ○	△	○ △
Impulso			○	○
Inicio		○		
Incipiente	○			

### ADUANA

Cuenta con el reconocimiento de su experiencia, cumplimiento y competencia de su personal. Uno de los mayores interlocutores con ella, el agente de aduana, considera el sistema normativo deficiente, incluso para operar “es necesario un mapa jurídico para ver si está vigente o seguimos con la normatividad anterior, nos tenemos que guiar con unos cuadros en MSEXcel facilitado por nuestro departamento jurídico”, la normatividad aduanera se encuentra fragmentada en varios decretos y artículos, lo que dificulta su aplicación. Aunque la aduana solicita participación en la estructuración de las normas, los miembros de la red sienten que sus opiniones “se llevan a Bogotá”, pero no producen resultados.

La normatividad apunta cada vez más a fortalecer el comercio seguro, cada uno de los actores del comercio exterior establece nuevos procedimientos

para cubrir el riesgo, y eso hace más lentos los procesos. Además, falta algo de flexibilidad, “no se trata de saltar la norma”, explican, pero sí de ser más flexibles. Si, por ejemplo, se ha asignado una inspección en la mañana, esta se debería reprogramar para el mismo día, no para el día siguiente. Esta falta de flexibilidad le ha generado sanciones al puerto, por no colocar a disposición la carga, y sobrecostos al importador. Dado lo lento de los procesos y la poca flexibilidad del sistema, las empresas han adquirido un sistema de información que funciona como una herramienta operativa para hacer trámites aduaneros que ayuda en la identificación de errores. Así, primero se corrige y luego se envía a las plataformas de la DIAN. Con ellas hay facilidad de integración y en general funciona bien.

Las empresas reconocen los avances que ha tenido la entidad en materia informática y a nivel global, al firmar la carta de adhesión al marco normativo para asegurar y facilitar el comercio global en 2008, no solo por el incremento en la firma de los acuerdos comerciales sino por la posibilidad de intercambiar información con otras aduanas que en este momento se realiza a través de un requerimiento desde una oficina central en Bogotá, en un proceso muy manual.

Para la aduana, la implementación OEA ha sido un gran avance “es ponernos a nivel de las mejores aduanas del mundo”, aunque el camino por recorrer aún es largo ha sido la base de un gran cambio. Asimismo, se viene adelantando el arreglo multilateral de reconocimiento mutuo con los países miembros de la Alianza del Pacífico, que multiplicará la confiabilidad que supone el reconocimiento OEA, al hacerlo válido ante las demás autoridades aduaneras de la alianza, lo que en la práctica se traduce en: reducción de los trámites de aduana, mejora en los tiempos y reducción de los costos.

Los trámites hoy se realizan a través de una sola plataforma, la solicitud de vistos buenos ante más de veinte entidades se realiza en un solo punto. La información sobre la normatividad en la página es, a juicio de algunos, limitada “tienen una plataforma donde se supone que uno navega, pero parece que ni siquiera la actualizaran”. La aduana, por sus avances se considera una entidad líder sin embargo, para los usuarios no es así, no creen que es una entidad ágil ni que colabora con los procesos de comercio exterior; por el contrario, creen que obstaculiza los procesos con tanta norma y que algunas decisiones están supeditadas a la voluntad de los funcionarios.

Respecto de la visibilidad, aunque hay avances en sus sistemas de información que facilitan la carga de la información, esos sistemas no están integrados con otras entidades, al menos no lo suficiente para agilizar los procesos a nivel local y global. Es necesario continuar avanzado, hoy se debe presentar la documentación en físico, pues los sistemas de información no permiten subir la información digitalizada.

Aunque la entidad ha avanzado procedimentalmente y en la profesionalización de su personal, existe una gran inquietud en cuanto a la gestión del conocimiento, específicamente porque el 40% llegará pronto a la edad de retiro, Esto representa así mismo, una gran oportunidad, pues no se puede perder la experticia y la memoria institucional que constituye lo que ellos han ganado con su trabajo de más de veinte años.

#### **PUERTO**

La empresa tiene actuaciones sobre los puertos del Pacífico y el Atlántico. Sobre la colaboración en el Atlántico indican que “para todo se debe escribir un email, el sistema genera un número de solicitud, pero no hay forma de interactuar con alguna persona, la operación está limitada a lo que se realiza por el sistema”. Aunque hay claridad en los procesos, no existen manejos especiales ante eventualidades, incluso cuando el sistema se “cae” no hay nada que hacer. Esto es considerado como una falta de diligencia “nuestro cliente nos solicita colaboración, pero no podemos hacer nada, solo esperar”. No se dan reuniones para proponer mejoras o evaluar el trabajo. En el Pacífico, el cambio del sistema de información ha sido crítico, pero si hay colaboración de parte de los funcionarios para mitigar “lo que se presente”. Aunque se cuenta con información en tiempo real, uno de los mayores inconvenientes es el proceso de facturación, que toma mucho más tiempo del esperado. Por ser una empresa de servicio, siempre está dispuesta a colaborar, a través de citas prioritarias y autorizaciones.

Los puertos se perciben como entidades que no se pueden controlar, aunque mencionan que operan 24x7, eso no es real. Las entidades de gobierno (ICA, Antinarcóticos y DIAN) no lo hacen. “Si un buque que llega un viernes y el siguiente lunes es festivo, solo se puede iniciar la gestión el martes”, perdiendo así, en algunos casos, los beneficios que otorga la norma frente a los días libres de bodega en puerto (cinco días para la exportación y tres para la importación).

Por otra parte, una relativamente reciente huelga de sus trabajadores evidenció la ausencia de planes de contingencia para estas eventualidad, pues solo existen acuerdos de colaboración ante situaciones extraordinarias para mitigar los problemas.

#### **AGENTE DE ADUANAS**

Es reconocida por los participantes como una entidad idónea, transparente y bien calificada. Aunque aún no están reconocidos por la DIAN como un operador económico autorizado, han participado como asociados de negocio de empresas certificadas. La empresa de transporte la considera organizada en su manejo documental “no hemos tenido ningún inconveniente, siempre que nos avisan, está todo listo para el retiro o ingreso a puerto”.

La empresa cliente desarrolló una herramienta para acceder a información desde su sistema de información e integrarlo, pero eso no se ha logrado “cuando se baja la información, aún no ha sido digitada y no hay nada”, es un proceso muy reciente. Aunque cuenta con alianzas globales, con sus clientes es necesario realizar una mayor integración de procesos y sistemas de información.

El conocimiento requiere disciplina y constancia,

... en ocasiones uno se reúne con personas que no tienen ni idea (...) en una cadena de suministro si el cliente no ayuda no hay nada (...) tenemos clientes que contratan recién egresados, que llegan a hacer una práctica y se quedan allí (...) pero no han estado en otra parte y si les cambian el término de negociación, no saben qué hacer, no tienen ni idea, solo conocen una única operación, en la que han trabajado (...) el 93% de los clientes funciona así, y eso altera cualquier planeación.

Pese a que todos en la red consideran que la planeación de la operación es el éxito, esta no siempre se da y por ello a veces la empresa cliente tiene sobrecostos derivados de una mala gestión con su proveedor. “Nos han asignado importaciones cuando la carga ya está en puerto y si el proveedor no envió los certificados de origen o requisitos que se exigen en Colombia, surge un sinnúmero de inconvenientes que pueden variar, desde pérdidas de beneficios arancelarios, hasta sobrecostos por almacenaje, traslado de mercancías y días extras de uso del contenedor.

### TRANSPORTADORA DE CARGA POR CARRETERA

Es reconocida como asociado de negocio OEA de la empresa cliente y de algunas multinacionales, cuenta con planes de contingencia, continuidad de negocio y sostenibilidad. Sus clientes pueden acceder a su plataforma a través de una clave y consultar directamente el tiempo de tránsito. Actualmente el ingreso de datos al sistema es manual, pero se está trabajando para hacer un registro automático aprovechando el GPS. Indican que no se obtiene lo mismo de parte de sus clientes, a menos que tenga una persona *in house*.

A lo largo de las entrevistas se obtuvieron comentarios que reflejan escasos niveles de colaboración con los demás miembros de la cadena “hemos llegado donde clientes por carga de exportación y nos manifiestan que esperemos que aún está en producción empacando (...) nos solicitan el vehículo para retiro de carga de importación en puerto, ingresamos, cargamos y resulta que no han pagado bodegajes”. Con la empresa de este estudio, dadas las restricciones de los seguros, usualmente el vehículo se requiere durante tres días: uno para retirar el contenedor, otro para cargarlo y una más para su traslado a puerto.

En la organización se constituyó una Dirección de Innovación con el fin de establecer estrategias colaborativas, gana-gana, con los clientes.

... hemos desarrollado incluso volcos multipropósito para un cliente, pero esto es producto de la confianza y la credibilidad que hemos ido ganando (...) esto no es algo que resulta solo de una parte, hay que desarrollarlo entre los dos, si el cliente tiene una necesidad nosotros buscamos una participación conjunta”. Con la empresa objeto de este estudio no se ha desarrollado ningún proyecto.

### EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA INTEGRACIÓN EN LA SCQM

La globalización de la empresa y con ello la búsqueda de competitividad ha impulsado la integración de la gestión de calidad con la gestión de la cadena de suministro; el alto nivel de exigencia de calidad en los productos y servicios se orienta por estándares globales que exigen los clientes. La internacionalización de la compañía ha hecho que día a día se oriente la estrategia hacia la construcción de redes de negocio, no solo a nivel de las empresas relacionadas con su producto –proveedores, fábricas y clientes–, sino con cada una de las empresas o entidades necesarias para los movimientos a lo largo de la red, en Colombia y el mundo.

Así como las empresas han mejorado la competitividad para alcanzar mejores niveles de internacionalización, las entidades de gobierno también han tenido que avanzar en esta materia, de ahí que la normatividad aduanera haya cambiado en los últimos años buscando evitar los envíos ilícitos y peligrosos. En este último caso, las inspecciones –físicas, no intrusivas y documentales– se convierten en las herramientas utilizadas para los gobiernos. En un mundo global, las aduanas y las empresas deben minimizar los riesgos de seguridad y para ello abordar medidas y recomendaciones establecidas a nivel mundial, es el caso del reconocimiento OEA, el cual busca un equilibrio entre la eficiencia en los costos para las empresas y la seguridad de la carga.

La internacionalización de la compañía objeto de estudio, con plantas en Chile, Colombia, El Salvador, México y Perú, ha hecho que hoy cuente con negociadores especializados en los servicios de navieras, transporte, agentes de carga, puertos y agentes de aduana, y en servicios transversales, como son los servicios públicos, tiquetes, hoteles, papelería y cafetería, entre otros. Por lo anterior, ha sido necesario establecer controles que mitiguen el riesgo en los procesos de comercio exterior y obtener certificados de validez global, que facilitan los trámites de comercio entre países. En el caso de sus plantas de producción, se han desarrollado mejoras continuas enmarcadas en el Sistema de Gestión Integral, el cual involucra procesos amigables con el medio ambiente, de salud ocupacional y de seguridad Industrial, que responden a las necesidades de un mercado versátil, competitivo y exigente, y le han permitido alcanzar las certificaciones ISO 9001; ISO 14001; ISO 18000; FSSC 22000 y British Retail Consortium Global Standard for Food Safety.

Realizar una coordinación precisa para los procesos de comercio exterior requiere, no solo del establecimiento de procesos integrados que involucran desarrollos de colaboración entre las diferentes áreas, clientes, proveedores y entidades partícipes de la red, sino de una integración tecnológica a través de sistemas de información que funcionen de manera transversal en la compañía, y con interfaces que permitan mayor conectividad y conectividad en tiempo real entre los partícipes de la red. Esto ha traído congestión, por el número de requerimientos enviados al departamento de Tecnología e Información [TI] para eliminar errores causados por la digitalización manual o por duplicidad de la información. La integración se ha iniciado, hoy es posible que la empresa realice la solicitud de servicio en el ERP, el BPO la visualice a través de su clave de consulta en él, ejecute el proceso o contrate el servicio y registre los avances

del servicio. “Su” información es, en este caso, una información única para los tres. El proceso de desarrollo está en alrededor del 50% y es una mejora que se está manejando con los proveedores de servicio de transporte terrestre y el agente de aduanas. Las empresas de transporte y el agente de aduanas, en cambio, no tienen visibilidad de ninguna operación, solo reciben la solicitud del servicio a través de email.

El desarrollo de la estrategia, la ejecución de los controles y el cumplimiento de los procesos mediante el aprovechamiento de la tecnología no sería posible sin un grupo de colaboradores satisfechos en y con la organización, por ello la empresa adelanta programas orientados, no solo al bienestar de los colaboradores, sino que involucra el compromiso de los colaboradores con la sociedad, para ser mejores ciudadanos, orientados a los valores y principios de la empresa. La organización, para lograr un excelente desempeño, cuenta con un programa que mide la productividad de cada una de las personas de la organización, para así balancear la carga laboral.

Cuando se mira el talento humano a lo largo de la red, se encuentran perfiles establecidos, los mismos sobre los que hay acuerdos, reflejados en las RFP, desde el acercamiento inicial. Una vez se establece la negociación inicial se comparten los SOP, los cuales establecen, en detalle: los riesgos, el nivel de servicio, los tiempos de cargue y descargue, los compromisos, los interlocutores y cada aspecto involucrado en la operación. Existen resultados interesantes, donde se aprecia una parte del impacto que se presenta entre algunos de los miembros, aunque aún no se da a lo largo de la red, igualmente son representativos para la competitividad empresarial.

En la relación entre el agente de aduanas y cliente, en las importaciones, cuando la información y documentación es adecuadamente coordinada (proveedor-cliente-agente de aduana) hay evidencia de ahorros muy significativos, solo en gastos portuarios, sin contar con el aprovechamiento que se puede alcanzar en los acuerdos comerciales que ha firmado Colombia. Una adecuado planeación y coordinación de la operación evita la aprehensión de la mercancía y elimina multas, sanciones o pagos superiores en aranceles. Un ejemplo de las bondades de la integración del cliente con el proveedor son los trámites de importación que se han realizado en dos días, cuando antes se realizaban en veinte días.

En cuanto a la relación entre cliente, patio de contenedores, empresa de transporte y agente de carga, en las exportaciones es posible alcanzar un mayor

aprovechamiento de la flota vehicular y con ello mayor competitividad para la empresa de transporte y mejores tarifas para el cliente. Actualmente, para una exportación, el cliente requiere un vehículo en promedio tres días (retiro de contenedor, cargue y descargue).

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Durante el trabajo de investigación realizado se encontró que los agentes de la cadena de abastecimiento, no solo tienen claros los conceptos de calidad y gestión de calidad de sus productos y servicios, sino que han realizado acciones que les han permitido escalar para alcanzar niveles importantes de madurez y sentirse pioneras. En este aspecto, la DIAN es el agente con menor nivel de percepción en cuanto a calidad y cadena de suministro, aspecto que se sustenta con base en la complejidad y dispersión de la norma y el poco beneficio que perciben las empresas por certificaciones que no agilizan aún sus procesos. De igual manera, el puerto no presenta una buena percepción por parte de los demás agentes, se reconocen sus avances, se consideran importantes, pero es claro que la implementación del sistema de información, particularmente lo relacionado con facturación y el ingreso al puerto, no presenta la celeridad requerida y afecta la calidad del proceso, lo que se refleja en sus clientes e impacta directamente a sus cadenas de suministro.

Con respecto al puerto, para los agentes es más fácil endosar sus falencias, particularmente porque en él confluyen todos los actores (navieras, agente de carga, agente de aduana, entes de control, etc.) que facilitan el proceso, por lo que en cualquier omisión o retraso de ellos, se señala al puerto, con lo que la percepción de calidad del puerto se ve afectada.

El concepto de cadena de suministro es claro, se entiende la importancia de establecer mecanismos que faciliten la integración, sin embargo, la complejidad de los procesos y el celo en el manejo de la información no permiten que los agentes alcancen niveles de madurez satisfactorios para los procesos de comercio exterior. Se resalta en este aspecto que la TI y la comunicación son relevantes para alcanzar la integración que demanda la cadena de abastecimiento. Se encuentran importantes alianzas mundiales para fortalecer la red de servicios desde cada sector, ya sea aliándose con grandes jugadores en el mundo o incursionando en países vecinos a través de adquisiciones empresariales y la migración de empresas a grupo empresarial: la DIAN, a través de la firma de

alianzas con otras aduanas; la empresa de transporte, con sus socios en Ecuador y Venezuela y la migración a grupo empresarial; y la empresa objeto de estudio, mediante la adquisición de plantas en otros países como una estrategia para responder a la creciente demanda, y las negociaciones con grandes industrias, para la provisión de sus materias primas.

Todos los agentes reconocen la importancia de la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro, pero consideran que hace falta capitalizar las lecciones aprendidas en acciones específicas de integración, estas no se incorporan, es decir, no es clara la gestión del conocimiento permita su adopción en los procesos de comercio exterior, se puede incluso afirmar que la gestión de conocimiento es solo procedimental.

La integración de calidad en la cadena de abastecimiento no se presenta entre todos los agentes de la red, solo hay casos aislados de integración entre algunos agentes, donde la colaboración y la visibilidad son importantes, pero se da en un solo sentido: cliente-proveedor. Al solicitar el servicio, el cliente espera que su proveedor diligencie información sobre su plataforma o, en su defecto, que cumpla con los horarios acordados en el diligenciamiento de la información en su plataforma, para que el cliente pueda acceder a ella cuando lo espera.

Todos los agentes consideran que las variables visibilidad, colaboración y gestión del conocimiento son relevantes en la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro, y aunque todos comprenden el concepto, no existe ni la confianza plena ni los mecanismos que la garanticen, existe en cambio una marcada prevención acerca del manejo que los demás le puedan dar a la información propia.

La falta de colaboración de la empresa objeto de estudio hace ver al departamento de compras como un experto en la negociación de materia prima y en formas de pago al proveedor, pero en los términos de negociación existe una gran oportunidad que, con una mayor planeación en las operaciones e integración para la negociación, podría ofrecer beneficios como la exonerar de depósitos, un mayor número de días para la devolución de los contenedores y días de crédito adicionales.

Aunque en el comercio exterior la competitividad en el mundo globalizado se presenta entre cadenas de suministro, los agentes de esta cadena de suministro actúan de manera aislada, por ello, al evaluar la matriz de madurez en la

integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro, ninguno de ellos alcanzó un nivel importante; por el contrario, se ven en niveles bajos. Sólo el agente de aduanas se ve a sí mismo en un nivel de madurez pionero, sin embargo, al analizar su información, es claro que aún requiere mejorar en aspectos como automatización en la captura de la información, documentación de las situaciones no conformes y apropiación de las lecciones aprendidas en los procesos como mejora continua, entre otros.

La falta de integración hace que los cuatro agentes –aduanas, puerto, agente de aduanas y transportadora– desaprovechan los acuerdos internacionales por desconocimiento de las exigencias normativas al momento de la negociación con el cliente o con el proveedor en el exterior. Al no seguir el protocolo de asesoría establecido, no se solicitan oportunamente los requisitos y al momento de desaduanizar o exportar la mercancía no se puede acceder a los beneficios arancelarios, lo que genera demoras en el puerto que terminan afectando, incluso, a la empresa de transporte.

Las empresas se sienten inquietas al haber invertido en procesos de certificación de reconocimiento mundial, pues no sienten que ellas se reflejen en procesos más ágiles en el comercio exterior, aunque han disminuido las inspecciones físicas, las inspecciones no intrusivas se han incrementado.

Uno de los impactos más relevantes que se puede alcanzar, gracias a la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro en los procesos de comercio exterior, es la eliminación de multas, aprehensión de mercancías, sanciones o pagos superiores en aranceles, lo que reduciría el costo de los procesos y permitiría alcanzar mayores niveles de competitividad.

Resumiendo, la gestión de calidad en la cadena de suministro favorece los procesos de comercio exterior y ello conlleva a mayores niveles de competitividad empresarial; a su vez, la gestión del conocimiento de los participantes de la red contribuye a alcanzar mayores niveles de madurez, fortaleciendo la SCQM.

De estas conclusiones, surgen algunas recomendaciones. La primera, aumentar la integración entre las entidades del Estado, de tal manera que se puedan generar automáticamente los visto bueno, hacer las declaraciones y notificar con anticipación los requisitos de cada partida arancelaria, para así garantizar la agilidad en los trámites y mitigar los errores, aumentando con ello la eficiencia en los procesos y facilitando el aumento de la competitividad del sector empresarial a nivel global. La segunda, emprender un plan que permita

dar a conocer el impacto en los clientes de los errores y la ineficiencia que surge de la falta de colaboración y visibilidad, lo que ayudaría a captar más interesados en el desarrollo de procesos de integración a lo largo de la cadena de suministro.

Por otra parte, es necesario continuar en la investigación de la gestión de calidad en la cadena de suministro en Colombia, para identificar nodos de integración para dar soluciones colaborativas, desarrollar redes que faciliten la transparencia a través de la visibilidad y diseñar normas que contemplen la verdadera integración a través de los diferentes sectores empresariales. Valdría la pena investigar los alcances de *blockchain* como una herramienta capaz de facilitar la confianza entre los participantes de la cadena de suministro, al permitir compartir información con la garantía de seguridad de datos y ofrecer transparencia para todos.

## REFERENCIAS

- Anzola, E. (2016). *El operador económico autorizado en Colombia*. Legis.
- Banco Mundial. (2018). *Índice de desempeño logístico*. <https://datos.bancomundial.org/>
- Büyüközkan, G., & Arsenyan, J. (2012). Collaborative product development: A literature overview. *Production Planning & Control*, 23(1), 47-66.
- Caridi, M., Moretto, A., Perego, A., & Tumino, A. (2014). The benefits of supply chain visibility: A value assessment model. *International Journal of Production Economics*, 151, 1-19.
- Chávez, J. A., & Figueroa, F. (2014). *Supply chain quality management: propuesta de mejora para la relación con proveedores críticos de material de empaque en la empresa XYZ* [tesis de maestría, Universidad Icesi]. [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/77793/1/T00335.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/77793/1/T00335.pdf)
- Crosby, P. (1979). *Quality is free*. McGraw-Hill
- Crumpton, M. (2010). *The importance of visibility*. Emerald Group.
- Cubillos-Rodríguez, M. C., & Rozo-Rodríguez, D. (2009). El concepto de calidad: historia, evolución e importancia para la competitividad. *Revista de la Universidad de la Salle*, 48, 80-99.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2019). *Cuentas departamentales*. DANE.
- Decreto 349 de 2018. (2018, febrero 20). *Diario Oficial*, 50513.
- Evans, J., & Lindsay, W. (2005). *Administración y control de la calidad*. Cengage Learning.

- Fernandes, A., Sampaio, P., & Samei, M. (2017). Supply chain management and quality management integration: A conceptual model proposal. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(1), 53-67. <http://dx.doi.org/10.1108/IJQRM-03-2015-0041>
- Foster Jr, S. T. (2008). Towards an understanding of supply chain quality management. *Journal of operations management*, 26(4), 461-467.
- FSSC 22000. *Food Safety System Certification*. Gorinchem. FSSC Foundation
- Garvin, D. (1988). *Managing Quality*. Simon and Schuster.
- Green House Gas Protocol [GHG]. (2012). <https://www.indiaghgp.org/green-house-gas-protocol>
- Icontec. (2015). La actualización de las normas responde a las necesidades de las organizaciones modernas. *Estándares*, 7, 1-20.
- ISO 27000. *Seguridad de la información*. ISO.
- ISO 28000. *Sistemas de gestión de calidad de la cadena de suministros*. ISO.
- ISO 31000. *Gestión del riesgo*. ISO.
- ISO14001. *Gestión ambiental de calidad*. ISO.
- ISO45001. *Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo*. ISO.
- ISO9001:2015. *Sistemas de gestión de calidad*. ISO.
- Jiménez, A. (2018). *Evaluación de la integración de la gestión de calidad en la cadena de suministro y los procesos de comercio exterior: caso de estudio en el Valle del Cauca* [tesis de maestría, Universidad Icesi]. [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/84788/1/T01702.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/84788/1/T01702.pdf)
- Klueber, R., & O'Keefe, R. M. (2013). Defining and assessing requisite supply chain visibility in regulated industries. *Journal of Enterprise Information Management*, 26(3), 295-315.
- Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains. *Sustainability*, 10(10), 3652.
- Kuei, C. H., Madu, C. N., & Lin, C. (2001). The relationship between supply chain quality management practices and organizational performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 18(8), 864-872.
- LEY 1503 de 2011. (2011, diciembre 30). *Diario Oficial*, 48.298.
- Lin, C., Kuei, C. H., & Chai, K. W. (2013). Identifying critical enablers and pathways to high performance supply chain quality management. *International Journal of Operations & Production Management*, 33(3), 347-370.
- López-Astudillo, A., Moncayo, L., & Cote-Villarejo, C. (2017). Supply chain quality Management (SCQM): Understanding how it integrates into the service and manufacturing sectors, case studies in a banking company and a pulp and paper company, En *12th European Research Seminar (ERS)*, Barcelona, Spain: ZLC/CSCMP/IE. <https://ers2017.ie.edu/wp-content/uploads/sites/162/2017/05/ERS-abstracts.pdf>

- Mellat-Parast, M. (2013). Supply chain quality management: An inter-organizational learning perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30(5), 511-529.
- Minculete, G., & Olar, P. (2018). Functional approaches to scor model in the supply chain management processes (Part I). *Revista de Management Comparat International*, 19(2), 136-144.
- OHSAS18001. *Sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional*. ISO.
- Poleshkina, I. (2016). Supply chain management as a driving force for generating competitive advantage for dairy companies. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 5, 251-271.
- Quang, H. T., Sampaio, P., Carvalho, M. S., Fernandes, A. C., Binh An, D. T., & Vilhenac, E. (2016). An extensive structural model of supply chain quality management and firm performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(4), 444-464.
- Rashid, K., & Haris-Aslam, M. M. (2012). Business excellence through total supply chain quality management. *Asian Journal on Quality*, 13(3), 309-324.
- Reyes, P. M., & Bhutta, K. (2005). Efficient consumer response: literature review. *International journal of integrated supply management*, 1(4), 346-386.
- Rice, J., & Hoppe, R. (2001). Supply chain vs supply chain: The hype & the reality. *Supply Chain Management Review*, 5(5), 46-54.
- Robinson, C., & Molhotra, M. (2005). Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice. *International Journal of Production Economics*, 96(3), 315-337.
- Rodríguez, G., Gil, J., & García, E. (1999). *Metodología de la investigación cualitativa*. Aljibe.
- Saracho, M. J. (2009). *Cómo implementar un programa de gestión del conocimiento*. <https://www.losrecursoshumanos.com/como-implementar-un-programa-de-gestion-del-conocimiento/>
- Servera-Frances, D. (2010). Concepto y evolución de la función logística. *Innovar*, 20(38), 217-234.
- SGMM Team. (2011). *Smart grid maturity model, version 1.2: Model definition*. Carnegie Mellon University.
- Tang, C. (2017, julio 2). *Los tratados de comercio internacional y la gestión de la cadena de suministro*. <https://blogs.anderson.ucla.edu/global-supply-chain/2017/02/los-tratados-de-comercio-internacional-y-la-gesti%C3%B3n-de-la-cadena-de-suministro.html>
- Tenorio, S., & Zarmatí, J. (2013). *Supply chain quality management en Lanitex S.A.S.* [tesis de grado, Universidad Icesi]. [http://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/handle/10906/78099](http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/78099)
- Weckenmann, A., Akkasoglu, G., & Werner, T. (2015). Quality management—history and trends. *TQM*, 27(3), 281-293.
- Wibowo, M. A., & Waluyo, R. (2015). Knowledge management maturity in construction companies. *Procedia Engineering*, 125, 89-94.

- Xiaofen, T. (2013). Investigation on quality management maturity of Shanghai enterprises. *TQM*, 25(4), 417-430.
- Zeng, Y. & Xiao, R. (2014). Modelling of cluster supply network with cascading failure spread and its vulnerability analysis. *International Journal of Production Research*, 52(23), 6938–6953.



La preparación de este libro estuvo al cuidado de Claros Editores S.A.S. y finalizó en octubre de 2019. En su preparación, realizada desde la Editorial Universidad Icesi, se emplearon los tipos: Baskerville MT Std de 9, 10 y 12 puntos; Book antigua de 8 puntos; Cambria Math de 12 puntos; Gill Sans MT de 8, 9, 10, 14, 19, 26 puntos; y Times New Roman de 10 puntos.



En la colección “Bitácoras de la Maestría” se presentan los resultados de las investigaciones base del desarrollo de tesis meritorias, inicialmente provenientes de la Facultad de Ingeniería, en este caso de la Maestría en Ingeniería Industrial. El primer capítulo de este, el segundo libro de la colección, corresponde a una investigación sobre cálculo de la huella de carbono realizado al proceso de preparación de suelos de una empresa agroindustrial colombiana, mediante la medición experimental (en campo) y teórica (mediante ecuaciones y estándares) de las emisiones de dióxido de carbono, óxido nítrico y metano. Sus resultados y la comparación de los métodos empleados son una herramienta importante de apoyo para la toma de decisiones que apunten a una mayor sostenibilidad ambiental de la operación. El segundo capítulo aborda una temática complementaria, la investigación se realiza en el mismo sector pero con el propósito de dar a conocer una visión sistémica del comportamiento de la huella de carbono generada durante las labores de campo. El grupo propone cuatro escenarios de simulación donde se modifican aspectos propios de la operación, con el objetivo de obtener propuestas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sus resultados no solo facilitan la toma de decisiones de la gerencia a este respecto, sino que validan un método fácilmente replicable. El volumen cierra con la presentación de una investigación sobre logística, enfocada en la integración de la gestión de la calidad y la gestión de la cadena de suministros en la gestión de la calidad de la cadena de suministro, un concepto que contribuye a la competitividad empresarial desde las variables de colaboración, visibilidad y gestión de conocimiento en procesos de comercio exterior.