



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Inventario de gases de efecto invernadero generados por actividades agrícolas en el Valle de Aburrá**

**Deicy Catalina Guerra García**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos

Medellín, Colombia

2014



# **Inventario de gases de efecto invernadero generados por actividades agrícolas en el Valle de Aburrá (Greenhouse gases inventory from agricultural activities in the Aburra Valley)**

**Deicy Catalina Guerra García**

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Agroindustrial**

Director:

Dsc Jairo Alexander Osorio Saraz

Codirector (a):

Ph.D Rolando Barahona Rosales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y alimentos

Medellín, Colombia

2014



*A mi madre, la mujer más maravillosa que conozco, por su sonrisa encantadora, y su infinito amor; a quien debo mi existencia, mi amiga y mi apoyo incondicional.*



## **Agradecimientos**

A mi familia por su comprensión y compañía.

A los profesores Alexander Osorio Saraz y Rolando Barahona Rosales, por compartir conmigo sus conocimientos, por su paciencia y ánimo para orientar mi trabajo.

Al Área Metropolitana del Valle de Aburrá por permitirme hacer parte de un proyecto tan bonito.

A la Universidad Nacional por ser cuna de conocimiento y acogerme en sus aulas.

A la vida por darme la oportunidad de superar los obstáculos.

.



## Resumen

El efecto invernadero del Planeta se ha visto acelerado en las últimas décadas por el aumento en la atmosfera de gases con alto Potencial de Calentamiento Atmosférico como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, entre otros; generados por actividades antrópicas como la deforestación, uso de combustibles fósiles, fertilización, etc. El objetivo de este trabajo fue realizar un inventario de Gases de Efecto Invernadero generados en el sector agrícola del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, localizada en Medellín – Colombia, como parte del Convenio de Asociación No. 298 de 2013 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín y la Universidad Pontificia Bolivariana, en el que se hizo el Inventario para todo el Valle de Aburrá para los años 2009 y 2011. La metodología del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC (2006) fue usada, mediante un TIER 1, estimando las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en tierras de cultivo, fuentes agregadas y emisiones de gases no CO<sub>2</sub> en Tierras; análisis de la incertidumbre y escenarios de incertidumbre derivados de este análisis. Se emitió un total de 63,1 y 66 Gg CO<sub>2</sub> eq, para el año 2009 y 2011 respectivamente, determinando que la principal fuente de emisiones de GEI (N<sub>2</sub>O) en producción agrícola en los escenarios analizados fue la aplicación de fertilizantes nitrogenados sintéticos y orgánicos, correspondiente a emisiones directas e indirectas de N<sub>2</sub>O.

**Palabras clave: Efecto Invernadero, Calentamiento global, Emisiones, Producción agrícola, Fertilización, Incertidumbre**

## Abstract

The greenhouse effect of the planet has been accelerated in recent decades by the increase in the atmosphere of gases with high Global Warming Potential as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O,

HFC, among others; generated by human activities such as deforestation, fossil fuel use, fertilizer, etc. The aim of this study was to conduct an inventory of greenhouse gases generated in the agricultural production of the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, located in Medellín – Colombia, as part of the Association Agreement No. 298 of 2013 between the Metropolitan Area of the Valley Aburrá, the Universidad Nacional de Colombia, Medellín campus and the Universidad Pontificia Bolivariana, in which the inventory for all the Aburrá Valley for the years 2009 and 2011 was made. It was used the of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2006) methodology, using a TIER 1 estimating emissions of Greenhouse Gases (GHG) on cropland, aggregate sources and non-CO<sub>2</sub> emissions sources on land; uncertainty analysis and uncertainty scenarios derived from this analysis. A total of 63.1 and 66 Gg CO<sub>2</sub> eq, for 2009 and 2011 respectively was issued, determining that the main source of GHG emissions (N<sub>2</sub>O) in agricultural production in the analyzed scenarios was the application of synthetic nitrogen fertilizers and organic corresponding to direct and indirect N<sub>2</sub>O emissions.

**Keywords: Greenhouse Effect, Global Warming, Emissions, Agricultural production, Fertilization, Uncertainty**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Valle de Aburrá</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Marco teórico</b> .....	<b>9</b>
2.1 Efecto Invernadero y Calentamiento Global .....	9
2.2 Gases de Efecto invernadero.....	11
2.3 Potencial de Calentamiento Global .....	12
2.4 El IPCC y los inventarios de emisiones de GEI.....	13
2.5 Incertidumbres en los inventarios de emisiones de GEI.....	17
2.5.1 Métodos para combinar las incertidumbres .....	18
<b>3. Metodología</b> .....	<b>21</b>
3.1 Tierras de cultivo .....	22
3.2 Fuentes agregadas y emisiones de gases no CO <sub>2</sub> en tierras .....	24
3.2.1 Emisiones directas e indirectas de N <sub>2</sub> O.....	24
3.2.2 Emisiones de CO <sub>2</sub> por encalado.....	26
3.2.3 Emisiones de CO <sub>2</sub> por fertilización con urea.....	27
3.3 Incertidumbre.....	33
<b>4. Resultados y discusión</b> .....	<b>35</b>
4.1 Cambios en el uso del suelo y estimación del área de suelo empleada para diferentes cultivos.....	35
4.2 Nitrógeno aplicado a los diferentes cultivos y pastizales.....	38
4.3 Cuantificación de emisiones .....	39
4.4 Cuantificación de incertidumbres .....	42
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>45</b>
<b>A. Anexo: Factores de emisión empleados</b> .....	<b>47</b>
<b>B. Anexo: Resumen hojas de cálculo</b> .....	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>53</b>



## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1 Ubicación del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia .....	5
Figura 2-1 Efecto invernadero natural y su forzamiento.....	10
Figura 4-1. Área cultivada (ha) en el Valle de Aburrá 2009 y 2011 según mapas de coberturas. ....	35
Figura 4-2. Participación de los cultivos permanentes y transitorios en la zona de estudio .....	37
Figura 4-3. Emisiones de CO <sub>2</sub> eq. en la producción agrícola como porcentaje del total emitido. ....	40
Figura 4-4. Emisiones de CO <sub>2</sub> eq. para el Valle de Aburrá (2009 y 2011) .....	42

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1. Población Valle de Aburrá año 2.005. ....	6
Tabla 2-1. Vida, eficacia radiativa y potenciales de calentamiento global relacionados con el CO <sub>2</sub> de algunos GEI. ....	13
Tabla 3-1 Ecuaciones básicas para cálculo de GEI por categoría.....	28
Tabla 4-1 Área cultivada (ha) según anuario estadístico de Antioquia .....	36
Tabla 4-2. Área destinada a cultivos permanentes y transitorios en la región de estudio, años 2009 y 2011, proyectos SIMAP y Cinturón Verde y Anuario Estadístico de Antioquia. ....	38
Tabla 4-3 Dosis de Nitrógeno aplicadas a cultivos y pastos, por fertilización sintética (kgN/ha/año) .....	39
Tabla 4-4 Comparativo dosis de fertilizantes aplicados según varias fuentes .....	43
Tabla 4-5 Estimación de la incertidumbre por el método de propagación de errores para las emisiones de GEI por producción agrícola en el Valle de Aburrá en 2009 y 2011 .....	44

# Introducción

El calentamiento del sistema climático es innegable, para lo cual se tienen evidencias científicas sobre el aumento de la temperatura del océano y del aire a nivel mundial, el deshielo de los glaciares, la disminución de los casquetes polares y el aumento del nivel del mar. Entre los años 1995 y 2006, se encontraron 11 de los años más cálidos desde 1980. Entre 1956 y 2005, el calentamiento lineal ( $0,13^{\circ}\text{C}$  por decenio [entre  $0,10$  y  $0,16$ ]) fue casi el doble del experimentado en los cien años transcurridos desde 1906 hasta 2005 (IPCC, 2007).

El informe sobre Cambio Climático del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del año 2007 (IPCC, 2007), presenta datos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre las consecuencias del calentamiento global y sus posibles causas. Entre estos datos se destaca:

- El nivel del mar aumentó en promedio a una tasa de 1,8 mm anuales entre 1961 y 2003, y de 3,1 mm anuales entre 1993 y 2003. Desde 1993 la dilatación térmica de los océanos ha representado aproximadamente un 57% de las aportaciones del aumento del nivel del mar, y la disminución de los glaciares y los casquetes polares de hielo contribuyó en 28% y las pérdidas de los mantos de hielo polares aportaron el resto. Se ha generado también cambios en otros aspectos del clima, por ejemplo se ha observado que la precipitación entre los años 1900 y 2005 aumentó en regiones como las partes orientales de América del Norte y del Sur, en el norte de Europa y en Asia septentrional y central, mientras que disminuyó en el sur de África, en el Mediterráneo y en partes del sur de Asia. La superficie afectada por las sequías a nivel mundial ha aumentado desde los años 70 (IPCC, 2007).
- Muchos sistemas naturales están siendo afectados por los cambios climáticos regionales y particularmente por el aumento de la temperatura. Se puede afirmar que

ha aumentado el número y la extensión de los lagos glaciares, ha aumentado la inestabilidad del terreno en las regiones de permafrost y las avalanchas de rocas en regiones montañosas. Hay evidencia que se ha dado un aumento de la escorrentía y adelanto de las fechas de caudal máximo primaveral en numerosos ríos alimentados por glaciares y nieve; el calentamiento de los lagos y ríos está afectando la estructura térmica y la calidad del agua (IPCC, 2007).

- El calentamiento global está afectando los sistemas biológicos como el adelanto de los procesos primaverales como el retoñar de las hojas, la migración de las aves o la puesta de los huevos, o el desplazamiento de los hábitats de las especies vegetales y animales. El calentamiento está generando que los brotes vegetales aparezcan más temprano en la primavera debido a la prolongación de los periodos térmicos de crecimiento. Cambios observados en los sistemas biológicos marinos y de agua dulce tales como desplazamiento del ámbito geográfico y variación de la abundancia de algas, plancton y peces en altitudes altas del océano; mayor abundancia de algas y de zooplancton en lagos de latitudes y altitudes altas; y, en los ríos, alteraciones del ámbito geográfico y adelantamiento de las migraciones de peces (IPCC, 2007).
- En los sistemas de gestión agrícola y forestal de latitudes superiores del Hemisferio Norte; por ejemplo, plantación más temprana de cultivos en primavera, o alteraciones de los daños causados a los bosques por incendios y plagas; en ciertos aspectos de la salud humana como el aumento de la mortalidad causada por el calor en Europa, cambios en los vectores de enfermedades infecciosas en ciertas partes de Europa, adelantos y aumentos de la producción de pólenes alergénicos en el Hemisferio Norte, en latitudes altas y medias; en ciertas actividades humanas de la región ártica (por ejemplo, la caza, o el acortamiento de las estaciones de viaje sobre nieve o hielo), y en áreas alpinas de elevación menor (por ejemplo, limitaciones a los deportes de montaña) (IPCC, 2007).

En el último informe del Grupo de trabajo II del IPCC (IPCC, 2014), se determinó que los riesgos del cambio climático provienen del solapamiento entre la vulnerabilidad (falta de preparación) y la exposición (de personas o bienes en situación de riesgo) y los peligros (que desencadenan fenómenos o tendencias climáticos). Cada uno de esos tres componentes puede ser objeto de medidas selectivas que reduzcan los riesgos. En

palabras de Chris Field, copresidente del Grupo de trabajo II. “Con niveles elevados de calentamiento por el aumento continuo de las emisiones de gases de efecto invernadero será difícil controlar los riesgos y aunque se invierta de manera significativa y continuada en la adaptación, nos encontraremos con limitaciones”... “En el informe se llega a la conclusión de que las personas, las sociedades y los ecosistemas son vulnerables en todo el mundo, pero la vulnerabilidad es diferente en los distintos lugares. Con frecuencia, el cambio climático interactúa con otras tensiones y así aumenta el riesgo” (IPCC, 2014).

De acuerdo a este panorama mundial de calentamiento global generado por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, Colombia aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), mediante la Ley 164 de 1994 y aprobó el protocolo de Kyoto mediante Ley 629 de 2000 y ha llevado a cabo 2 Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. La primera para los años 1990 y 1994, y la segunda para los años 2000 y 2004 (IDEAM, 2004); en esta última se estimó que los sectores que más emisiones de GEI aportaron en el año 2004 fueron: Agricultura (38%); Energía (37%); y Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura –USCUSS– (14%). Seguidos por: Residuos sólidos (6%) y Procesos Industriales (5%). Al sumar las emisiones totales de los módulos de Agricultura con los de USCUSS, el aporte que tiene el sector en general es de aproximadamente el 50% de las emisiones totales en los años 2000 y 2004 en Colombia (IDEAM, 2009).

Esta situación de Colombia es motivación para que entidades públicas como el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, autoridad ambiental en la región, se interesen en la calidad del aire vinculada al cambio climático y su relación directa con la salud de la población. Teniendo en cuenta estas consideraciones surge la propuesta de desarrollar el primer Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Valle de Aburrá para los años 2009 y 2011, con base en las Directrices del IPCC del año 2006, mediante el Convenio de Asociación No. 298 de 2013 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y la Universidad Pontificia Bolivariana, y del cual hace parte este trabajo de investigación.

Colombia ha presentado dos comunicaciones ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y ha elaborado inventarios nacionales de GEI para 1990, 1994, 2000 y 2004. Estos inventarios han sido de suma importancia para la

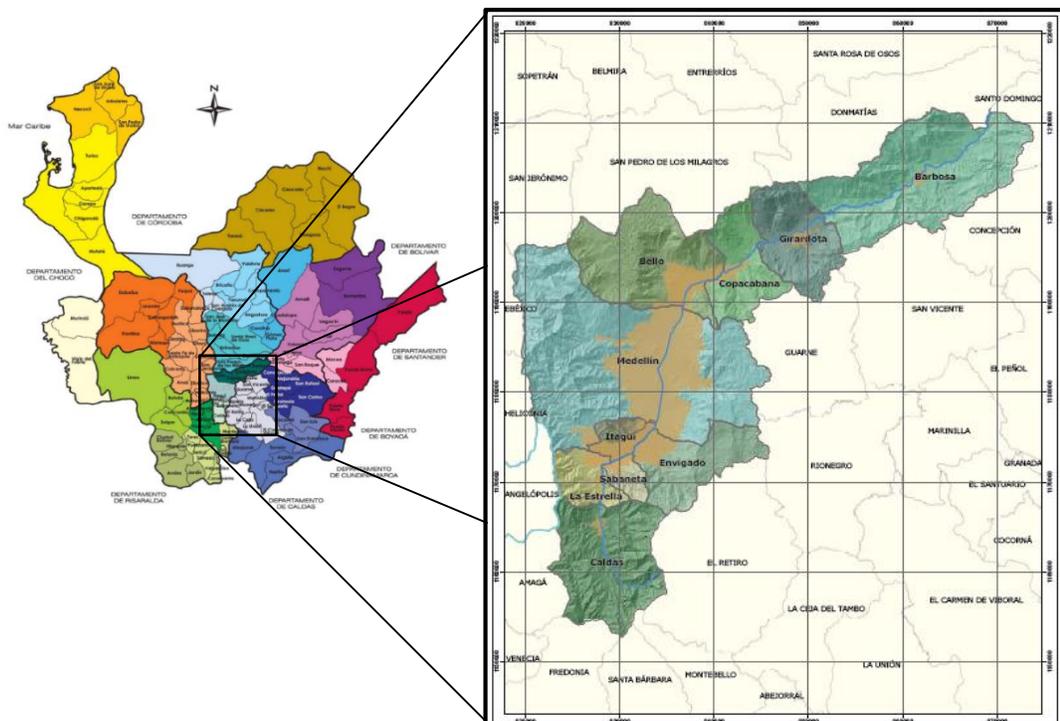
toma de decisiones en materia de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático en el país. Sin embargo se han desarrollado pocas iniciativas a nivel local para determinar la cantidad de gases de efecto invernadero que generan las ciudades o áreas metropolitanas, algunos de los cuales no emplean la metodología IPCC (Echeverri, 2006) o no se han realizado bajo la metodología IPCC más reciente (2006) y (Pulido, 2012),

Este es el primer inventario de GEI que se lleva a cabo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (segunda región más poblada del país) bajo la metodología IPCC del año 2006, metodología que es reconocida a nivel mundial y que permite comparabilidad entre países o regiones, además de permitir tener una continuidad en el tiempo. Por lo tanto el objetivo de este trabajo fue estimar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en la producción agrícola en el Valle de Aburrá bajo esta Metodología.

# 1. Valle de Aburrá

El Valle de Aburrá es una región ubicada en el noroccidente de Colombia, ubicado en la cordillera central, en el Departamento de Antioquia (Figura 1-1). Hace parte de la cuenca del Río Aburrá, principal arteria fluvial que cruza la región de sur a norte. La conformación del Valle de Aburrá está determinada por la geografía de la cuenca del río Aburrá y todos sus afluentes. El Valle tiene una longitud de 60 kilómetros, siendo enmarcado por una topografía irregular y pendiente, que oscila entre 1300 y 2800 metros sobre el nivel del mar. Las formaciones montañosas que lo encierran, dan lugar a la formación de diversos microclimas, saltos de agua, bosques, sitios de gran valor paisajístico y ecológico (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010).

Figura 1-1 Ubicación del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia



Tomado y modificado de (Departamento administrativo de Planeación, 2014) y (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010)

Cuenta con una extensión de 1.152 Km<sup>2</sup>, de los cuales 340 Km<sup>2</sup> corresponden al suelo urbano y 812 Km<sup>2</sup> al suelo rural (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007). Limita al norte limita con los municipios de Don Matías, Santo Domingo y San Pedro de los Milagros, al oriente con los municipios de Concepción, San Vicente, Guarne, Rionegro y El Retiro; al occidente limita con los municipios de San Jerónimo, Ebéjico, Heliconia y Angelópolis; y al sur limita con los municipios de Amagá, Fredonia, Santa Barbará y Montebello. Ocupa el 18% de la superficie de Antioquia y el 0,06% del País.

Según cifras del Censo de población de 2005, la población del Valle de Aburrá es de 3.306.490 habitantes, distribuida en 10 municipios (**Tabla 1-1**). La población total del Valle de Aburrá representa el 59,4% del total departamental y el 8% de la población del país (DANE, 2007). De acuerdo a las proyecciones del DANE en su serie de datos actualizada al 2011, para el año 2014 la población del Valle de Aburrá será de 3.685.852 habitantes.

Tabla 1-1. Población Valle de Aburrá año 2.005.

<b>Municipio</b>	<b>Total</b>	<b>Urbana</b>	<b>Rural</b>
Barbosa	42.439	18.608	23.831
Bello	371.591	358.139	13.452
Caldas	67.999	52.696	15.303
Copacabana	61.234	52.829	8.405
Envigado	174.108	165.420	8.688
Girardota	42.566	25.011	17.555
Itagüí	232.680	210.901	21.779
La Estrella	52.563	28.812	23.751
Medellín	2.216.830	2.178.017	38.813
Sabaneta	44.480	35.242	9238
<b>Valle de Aburrá</b>	<b>3.306.490</b>	<b>3.125.675</b>	<b>180.815</b>

En cuanto a los índices de desigualdad, el Valle de Aburrá para el 2011 tuvo un coeficiente GINI de 0,507 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012). En el 2010 el PIB real de Antioquia fue de \$57.270 miles de millones, registró una tasa de crecimiento de 3,3%, lo que indica el buen desempeño del territorio en términos económicos. Aunque no se

dispone de información sobre agregados de la región metropolitana, se tiene conocimiento que el aporte al PIB departamental es de aproximadamente el 70%, especialmente representado en los sectores de industria, comercio y servicios, donde se encuentran las actividades económicas y de vocación de la región (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012).



## **2. Marco teórico**

### **2.1 Efecto Invernadero y Calentamiento Global**

El clima del Planeta Tierra depende del equilibrio radiativo de la atmósfera; los gases que componen la atmosfera no pueden absorber la luz solar, ondas de longitud corta (luz visible y ultravioleta) y dejan pasar la mayor parte hacia la superficie de la Tierra. Del total de la luz solar que llega al planeta, el 30% es reflejado al espacio (albedo), la atmosfera retiene el 20% de la energía solar y el 50% restante llega a la superficie de la Tierra calentándola.

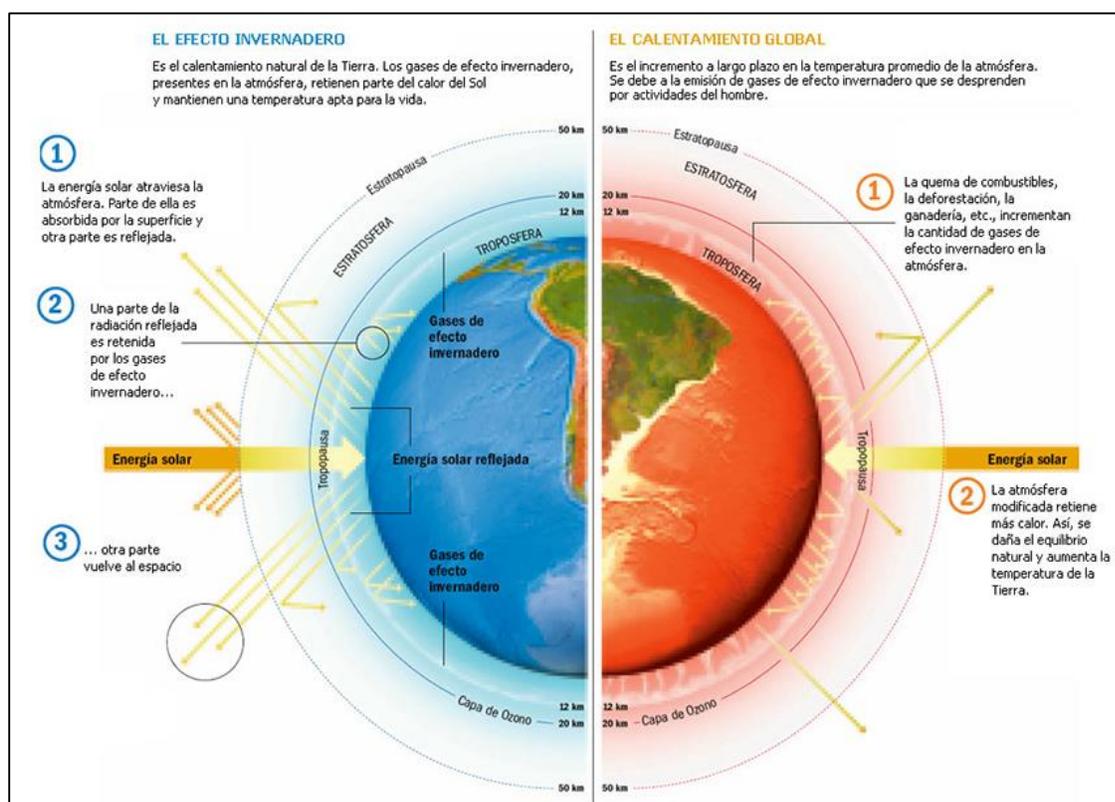
Al calentarse la superficie de la Tierra transforma la luz solar (de alta energía) en radiación de baja energía -ondas de longitud larga, cargadas hacia el infrarrojo- que refleja nuevamente hacia la atmósfera. Esa energía de onda amplia o infrarroja, puede ser absorbida de manera muy eficiente por algunos de los gases atmosféricos, de manera particular el CO<sub>2</sub> (pero también el vapor de agua, el metano y otros), siendo ésta la principal fuente de calor para la atmósfera, de allí que la temperatura más alta de la Tropósfera sea justamente el punto de contacto con la superficie del planeta.

A este fenómeno se le conoce como Efecto Invernadero Natural, sin este la temperatura promedio en la superficie sería aproximadamente de 18°C bajo cero y la vida en el planeta no sería posible. El efecto invernadero que se presenta de forma natural es potenciado cuando se aumentan los niveles de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmosfera, ya que cuanto más GEI como el CO<sub>2</sub> se encuentren en la atmosfera terrestre, mayor será la temperatura del planeta (Caballero & Lozano, 2007).

Este aumento en la temperatura de la Tierra se define como Calentamiento Global y puede darse por procesos naturales como dilución del CO<sub>2</sub> en el océano y la actividad biológica (fotosíntesis). Sin embargo también las acciones antrópicas como la tala de bosques y la quema de combustibles fósiles aumentan la cantidad de CO<sub>2</sub> atmosférico, incrementando

el Efecto Invernadero y contribuyendo al Calentamiento Global (Figura 2-1). La convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) reconoce que las actividades humanas han ido aumentando sustancialmente las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y que ese aumento intensifica el efecto invernadero natural, lo cual dará como resultado, en promedio, un calentamiento adicional de la superficie y la atmósfera de la Tierra y puede afectar adversamente a los ecosistemas naturales y a la humanidad.

Figura 2-1 Efecto invernadero natural y su forzamiento.



Fuente: (IDEAM, 2004)

Los países Anexo I de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, países desarrollados o en vías de tener economías de mercado (Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Bulgaria, Canadá, Comunidad Europea, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estados Unidos de América, Estonia, Federación de Rusia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Japón, Letonia,

Liechtenstein, Lituania, Luxemburgo, Mónaco, Noruega, Nueva Zelandia, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, República Checa, Rumania, Suecia, Suiza y Ucrania) (Naciones Unidas, 1998), tendrán, entre otros, el deber de elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes, inventarios nacionales de las emisiones antropógenas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal (relativo a las sustancias que agotan la capa de Ozono) (Naciones Unidas, 1992).

Con el fin de ayudar a los gobiernos a adoptar y aplicar políticas de respuesta al cambio climático, y particularmente en respuesta a las necesidades de asesoramiento fidedigno de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, constituida en 1992, y de su Protocolo de Kyoto de 1997; se creó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Este fue establecido conjuntamente en 1988, por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el objetivo de analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas, y formular estrategias de respuesta realistas (IPCC, 2007).

## **2.2 Gases de Efecto invernadero**

Se define como Gases de Efecto Invernadero (GEI) a los componentes de la atmósfera que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. Pueden ser de origen natural o antropogénico; los principales GEI en la atmósfera son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). Los GEI generados netamente por actividades humanas son los halocarbonos y otras sustancias con contenido de Cloro y Bromo y que son regulados por el protocolo de Montreal como el Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), los Hidrofluorocarbonos (HFC) y los Perfluorocarbonos (PFC), (IDEAM, 2007).

Los gases de efecto invernadero cubiertos en las Directrices del IPCC del 2006 son los siguientes:

- Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )
- Metano ( $\text{CH}_4$ )
- Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ )
- Trifluoruro de nitrógeno ( $\text{NF}_3$ )
- Trifluorometil pentafluoruro de azufre ( $\text{SF}_5\text{CF}_3$ )
- Éteres halogenados (p ej.,  $\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$ ,  $\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OC}_2\text{F}_4\text{OCHF}_2$ ,  $\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OCHF}_2$ )
- Otros halocarbonos no cubiertos por el Protocolo de Montreal, incluidos  $\text{CF}_3\text{I}$ ,  $\text{CH}_2\text{Br}_2$ ,  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$

Asimismo, las Directrices de 2006 proporcionan información para declarar los siguientes precursores: óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) aunque no se presentan los métodos para estimar las emisiones de estos gases (IPCC, 2006).

## 2.3 Potencial de Calentamiento Global

El Potencial de Calentamiento Global (GWP, por su sigla en inglés) es una medida para comparar el impacto climático potencial de las emisiones de los diferentes GEI. Este compara el forzamiento radiativo integrado durante un periodo de tiempo específico con una emisión de pulso de una unidad de masa (IPCC, 2007). Como gas de referencia para la comparación se emplea el  $\text{CO}_2$  y generalmente el horizonte de tiempo escogido es de 100 años, para representar el impacto de la sustancia en los próximos 100 años (**Tabla 2-1**). Una emisión de  $\text{CO}_2$ -equivalente es la cantidad de emisión de  $\text{CO}_2$  que ocasionaría,

durante un horizonte temporal dado, el mismo forzamiento radiativo integrado a lo largo del tiempo que una cantidad emitida de un GEI de larga permanencia o de una mezcla de GEI. Para un GEI, las emisiones de CO<sub>2</sub>-equivalente se obtienen multiplicando la cantidad de GEI emitida por su potencial de calentamiento mundial (PCM) para un horizonte temporal dado (IPCC, 2007).

Tabla 2-1. Vida, eficacia radiativa y potenciales de calentamiento global relacionados con el CO<sub>2</sub> de algunos GEI.

Nombre industrial o común	Formula química	Vida (años)	Eficacia Radiativa (W m-2 ppb-1)	Potencial de calentamiento mundial para tiempo dado de horizonte			
				SIE (100 años)	20-años	100-años	500-años
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>		1,4 x 10 <sup>-5</sup>	1	1	1	1
Metano	CH <sub>4</sub>	12	3,7x10 <sup>-4</sup>	21	72	25	7.6
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	114	3,03x10 <sup>-3</sup>	310	289	298	153
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	270	0,19	11.700	12.000	14.800	12.200
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	4,9	0,11	650	2.330	675	205
HFC-135	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	29	0,23	2.800	6.350	3.500	1.100
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	3200	0,52	23.900	16.300	22.800	32.600

SIE: Se refiere al segundo informe de evaluación del IPCC (1995). Tomado y modificado de (IPCC, 2007)

## 2.4 El IPCC y los inventarios de emisiones de GEI

Una de las principales actividades del IPCC es hacer una evaluación periódica de los conocimientos sobre el cambio climático; elabora informes especiales y documentos técnicos sobre temas en los que se consideran necesarios la información y el asesoramiento científicos e independientes, y respalda la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) mediante su labor sobre las metodologías relativas a los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. (IDEAM, 2007)

El IPCC consta de tres grupos de trabajo y un equipo especial. El Grupo de trabajo I evalúa aspectos del sistema climático y el cambio climático; el Grupo de trabajo II evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, las consecuencias y la adaptación; el Grupo de trabajo III evalúa las posibilidades de limitar las emisiones de GEI y atenuar los efectos del cambio climático; el equipo especial sobre los inventarios nacionales de GEI se encarga del programa del IPCC sobre los inventarios nacionales de GEI (IPCC, 2004).

Desde 1990 el IPCC ha elaborado una serie de informes de evaluación, informes especiales, documentos técnicos, metodologías y otros productos que se han convertido en obras de referencia estándar, ampliamente utilizadas por los responsables de políticas, científicos y otros expertos y han sido reconocidos como la mejor fuente de información sobre cambio climático (IDEAM, 2007).

Así, un inventario de GEI es un método para cuantificar la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera durante un periodo de tiempo determinado. Un inventario generalmente es el primer paso que deben dar las entidades que quieran reducir sus emisiones de GEI (EPA - United States Environmental Protection Agency, s.f.). El inventario es una herramienta que ayuda a los gobiernos locales o entidades interesadas a:

- Identificar los sectores, fuentes y actividades que son responsables de las emisiones de GEI dentro de su jurisdicción.
- Comprender las tendencias de emisión.
- Establecer un plan de acción local.
- Hacer seguimiento de los procesos de reducción de emisiones.
- Cuantificar los beneficios de las actividades que reducen las emisiones.
- Establecer metas y objetivos para la reducción de emisiones a futuro.

El IPCC ha desarrollado un conjunto de guías metodológicas o directrices las cuales describen metodologías y prácticas para realizar Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, y son utilizadas por las Partes en la CMCC y otros países interesados para preparar sus comunicaciones nacionales. Estas directrices son sometidas a revisión

y constante actualización, las primeras Directrices del IPCC para realizar los inventarios nacionales de GEI fueron preparadas en 1994 y revisadas en 1996 (IPCC, 2004); actualmente se cuenta con la versión del año 2006 la cual es una versión revisada de las Directrices del año 1996.

En las directrices del IPPC, las estimaciones de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero se dividen en los siguientes sectores principales:

- Energía
- Procesos industriales y uso de productos (IPPU)
- Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU)
- Desechos
- Otros (p. ej., emisiones indirectas de la deposición de nitrógeno proveniente de fuentes no agrícolas)

Cada sector comprende categorías individuales (p. ej. transporte) y subcategorías (p. ej. automóviles). Los países crean un inventario a partir del nivel de la subcategoría y calcula las emisiones totales por sumatoria. Se calcula el total nacional sumando las emisiones y absorciones correspondientes a cada gas. La generación de informes se organiza según el sector que realmente genere las emisiones o absorciones.

La estimación básica de los GEI consiste en combinar los datos de actividad, AD (información sobre el alcance hasta el cual tiene lugar una actividad humana) con los Factores de Emisión, EF (coeficientes que cuantifican las emisiones o absorciones por actividad humana). Para este fin se define la expresión 2-1 (IPCC, 2006).

$$\textit{Emisiones} = \textit{AD} * \textit{EF}$$

2-1

En algunos casos es necesario emplear métodos de equilibrio de la masa, por ejemplo los métodos de cambio de sustancia utilizados en el sector AFOLU que estima las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de los cambios producidos con el transcurso del tiempo en el contenido de carbono de la biomasa viva y de los depósitos de materia orgánica muerta (IPCC, 2006).

Los métodos del IPCC utilizan los siguientes conceptos:

**Buenas prácticas:** se refieren a un conjunto de principios metodológicos, acciones y procedimientos necesarios para la elaboración de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero de alta calidad.

**Niveles:** representa un nivel de complejidad metodológica; en general se presentan tres niveles. El Nivel 1 o TIER 1 es el método básico en el que suministran las ecuaciones y los valores de los parámetros por defecto. El Nivel 2 o TIER 2 es el intermedio, en este los factores de emisión y de cambios de existencias se basan en datos específicos del país o de la región. El Nivel 3 es el más exigente en cuanto a la complejidad y a los requisitos de los datos. En este se emplean métodos de orden superior, incluidos modelos y sistemas de medición hechos a la medida de las circunstancias nacionales, con muestreos de campo ofreciendo estimaciones de mayor certeza (IPCC, 2006). En general al pasar a niveles más altos, se mejora la exactitud del inventario y se reduce la incertidumbre.

**Datos por defecto:** los métodos del Nivel 1 para todas las categorías están concebidos para utilizar las estadísticas nacionales o internacionales disponibles, en combinación con los factores de emisión por defecto y los parámetros adicionales provistos y, por lo tanto, deben ser viables para todos los países.

**Categorías principales:** se utiliza para identificar las categorías que repercuten significativamente sobre el inventario total de un país de los gases de efecto invernadero. Las categorías principales deben ser la prioridad para los países durante la asignación de recursos de inventarios para recopilación de datos, compilación, garantía y control de calidad, y generación de informes.

Las Directrices del 2006 suministran la orientación para asegurar la calidad en la compilación del inventario, desde la recopilación de los datos hasta la generación del informe, entre estas buenas prácticas se deben llevar a cabo los inventarios bajo criterios de transparencia, exhaustividad, coherencia, comparabilidad y exactitud.

**Transparencia:** la documentación es clara de manera que las personas que no sean los compiladores del inventario entiendan cómo se compiló y se tenga certeza de que se cumple con los requisitos de buenas prácticas.

**Exhaustividad:** se declaran las estimaciones para todas las categorías de fuentes y sumideros, y de gases.

**Coherencia:** se realizan las estimaciones para diferentes años, gases y categorías de inventarios, de tal forma que las diferencias entre los años y las categorías reflejan las diferencias reales en las emisiones.

**Comparabilidad:** el inventario se declara de tal forma que permite su comparación con los inventarios de otros países.

**Exactitud:** el inventario no contiene estimaciones excesivas o insuficientes.

El procedimiento a seguir dentro del inventario para la estimación y el análisis de con base en el comportamiento de los GEI es:

- Estimación de los GEI

- Determinación de las emisiones de los GEI directos en CO<sub>2</sub> equivalente para cada sector.
- Hacer la sumatoria de las emisiones de todos los sectores en CO<sub>2</sub> equivalentes.
- Realizar el cálculo de la incertidumbre de los resultados.

## 2.5 Incertidumbres en los inventarios de emisiones de GEI

La estimación de la incertidumbre es un componente esencial de los inventarios de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero; corresponde a un importante componente de las buenas prácticas, garantiza la amplitud y probabilidad de valores posibles para el inventario en su totalidad, así como para sus componentes. Esta debe obtenerse para el nivel nacional, la estimación de la tendencia y para los factores de emisión, los datos de actividad y otros parámetros de estimación correspondientes a cada categoría (IPCC, 2006).

“Las estimaciones de la incertidumbre son un elemento esencial de un inventario de emisiones completo. La información sobre la incertidumbre no está orientada a cuestionar la validez de las estimaciones de inventarios, sino a ayudar a priorizar los esfuerzos por mejorar la exactitud de los inventarios en el futuro y orientar las decisiones sobre elección de la metodología”, (IPCC, 2000).

La incertidumbre se define como la “falta de conocimiento de una variable que puede describirse como una función de densidad de probabilidad (FDP) que caracteriza el rango y la probabilidad de los valores posibles. La incertidumbre depende del nivel de conocimiento del analista, el cual, a su vez, depende de la calidad y la cantidad de datos aplicables, así como del conocimiento de los procesos subyacentes y de los métodos de inferencia” (IPCC, 2006).

Se puede utilizar la FDP para describir la incertidumbre de una cantidad fija como una constante de la cual se desconoce su valor con exactitud o para describir la variabilidad inherente; para el caso del cálculo de la incertidumbre en inventarios de gases de efecto invernadero el objetivo del análisis de la incertidumbre es cuantificar la incertidumbre del valor fijo desconocido del total de emisiones, así como las emisiones y la actividad relativa a las categorías específicas (IPCC, 2006). En los inventarios de gases de efecto invernadero se emplea un intervalo de confianza del 95%, entendiéndolo como la probabilidad del 95% de comprender el valor real pero desconocido de una cantidad fija.

El análisis cuantitativo de la incertidumbre se ocupa principalmente de los errores aleatorios basados en la variabilidad inherente a un sistema y en el tamaño de la muestra finita de los datos disponibles, los componentes aleatorios del error de medición o las

inferencias relativas al componente aleatorio de la incertidumbre obtenida del dictamen de expertos. Entre las causas de incertidumbre se cuentan la falta de exhaustividad, los modelos de estimación de emisiones y absorciones, falta de datos, falta de representatividad de los datos, errores de muestreo aleatorio estadístico, errores de medición, generación de informes o clasificación erróneas y datos faltantes (IPCC, 2006).

Las estimaciones de las emisiones/absorciones se basan en la conceptualización, los modelos, los datos de entrada y las hipótesis (p. ej. Factores de emisión y datos de actividad).

### **2.5.1 Métodos para combinar las incertidumbres**

Después de haber identificado las causas de las incertidumbres vinculadas a las estimaciones del inventario, se debe obtener la información adecuada para estimar la incertidumbre nacional y específica de cada categoría al intervalo de confianza del 95%. El método pragmático para cuantificar la incertidumbre consiste en utilizar datos empíricos asociados con las mediciones de emisiones y los datos de actividad provenientes de relevamientos y censos, información publicada, resultados de modelos y estimaciones cuantificadas de incertidumbres basadas en el dictamen de expertos (IPCC, 2006).

Una vez determinadas las incertidumbres asociadas a los datos de actividad, factores de emisión o las emisiones para una categoría, se deben combinar para estimar la incertidumbre para todo el inventario en cualquier año y la incertidumbre en la tendencia del inventario general a través del tiempo. El IPCC presenta dos métodos para estimar las incertidumbres combinadas, el Método 1 basado en la expansión de series de Taylor de primer orden conocido como la ecuación Propagación de errores, y el Método 2 que utiliza la técnica de Monte Carlo (IPCC, 2000).

#### **Método 1. Propagación de errores**

Por medio de las incertidumbres de los datos de actividad, factores de emisión y otros parámetros de estimación se puede propagar la incertidumbre de las emisiones o absorciones empleando la ecuación de propagación del error (IPCC, 2006). Esta es un método de combinación de varianzas y covarianzas para una variedad de funciones, “este método permite expandir ecuaciones no lineales por medio de la expansión de Taylor. Da una solución exacta para funciones lineales aditivas y una aproximación para productos de dos términos. La mayoría de los inventarios de emisiones son sumas de emisiones,  $E$ , que son los productos de datos de actividad,  $A$ , y factores de emisión,  $F$ . Suponiendo que ambas cantidades tengan alguna incertidumbre, esas ecuaciones de inventarios no son lineales con respecto a los cálculos de incertidumbres. Por lo tanto, la ecuación de propagación de errores da sólo una estimación aproximada de la incertidumbre combinada

que es cada vez más inexacta para desviaciones mayores. El error sistemático que se produce cuando no se toma en cuenta esa no linealidad en los inventarios se puede evaluar caso por caso” (IPCC, 2000).

La ecuación de propagación de errores combina dos reglas para combinar las incertidumbres. La primera se usa para combinar el factor de emisión, datos de actividad y otros parámetros por categoría y GEI. Se utiliza en los casos en los que se deben combinar las cantidades inciertas por multiplicación, Ecuación (2-2):

$$U_{Total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (2-2)$$

Donde:

$U_{Total}$  = el porcentaje de incertidumbre del producto de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95%, dividido por el total y expresado como porcentaje).

$U_i$  = es el porcentaje de incertidumbre asociado con la categoría  $i$ .

La segunda regla se emplea para llegar a la incertidumbre general de las emisiones nacionales y la tendencia en las emisiones nacionales del año base y del año actual. Se utiliza en los casos en los que se deben combinar las cantidades inciertas por suma o resta, ecuación (2-3):

$$U_{Total} = \frac{\sqrt{(U_1 * X_1)^2 + (U_2 * X_2)^2 + \dots + (U_n * X_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|} \quad (2-3)$$

Donde:

$U_{Total}$  = el porcentaje de incertidumbre de la suma de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95 por ciento, dividido por el total (es decir, la media) y expresado como porcentaje).

$x_i$  y  $U_i$  = las cantidades inciertas y el porcentaje de incertidumbres asociado, respectivamente.

**Método 2. Monte Carlo**

Este método consiste en generar valores aleatorios de factores de emisión, datos de actividad y otros parámetros de emisión en un intervalo de confianza de una función de distribución de probabilidad (FDP). Este modelo permite obtener la media, la desviación estándar, el intervalo de confianza del 95% y otras propiedades de la FDP (IPCC, 2006). “Este procedimiento se repite muchas veces, usando una computadora, y los resultados de cada cálculo ejecutado componen la función de densidad de probabilidad de la emisión en general. El análisis de Monte Carlo puede realizarse en el nivel de las categorías de fuentes, para agregaciones de categorías de fuentes o para el inventario en conjunto” (IPCC, 2000).

### 3. Metodología

Este trabajo se desarrolló empleando la metodología planteada por el (IPCC, 2006) en un Nivel 1 (TIER 1), en el que los datos de actividad y factores de emisión se determinaron desde una escala macro hasta una micro (Top-Down), partiendo de los datos de estudios y estadísticas a nivel nacional y departamental, hasta llegar a un nivel de municipio, corregimiento y vereda en los casos en los que se pudo adquirir información. La selección de un TIER 1 para hacer el inventario se debió a que este nivel responde al objetivo del trabajo, pues se trata de un método eficiente y menos costoso, además de ser una buena base para una iniciativa de este tipo en la región.

Se tiene como dominio temporal del inventario los años 2009 (año base) y 2011 (año actual), los cuales son años para los cuales se obtuvo mayor cantidad de información para el inventario general del Valle de Aburrá en el que se tienen en cuenta todos los sectores. Trabajar con dominio temporal con suficiente información permitió observar los cambios en el comportamiento de las emisiones en los diferentes sectores, además este será la base para futuros inventarios con sus respectivas revisiones y mejoras.

Los flujos de GEI en el Sector AFOLU (Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) se determinaron dos maneras: 1) como cambios temporales netos en las existencias de C, lo que se suele emplear para los flujos de CO<sub>2</sub>; 2) como flujos directos de gas desde y hacia la atmósfera, lo que se suele usar para la estimación de emisiones netas de CO<sub>2</sub>, así como de otro tipo de gases. El uso de los cambios en las existencias de C para estimar las emisiones y capturas de CO<sub>2</sub> reconoce que esos cambios se producen fundamentalmente mediante el intercambio de CO<sub>2</sub> entre la superficie terrestre y la atmósfera. En la aproximación de cambios, los aumentos y disminuciones en las existencias totales de C equivalen a la captura y emisión neta de CO<sub>2</sub>, respectivamente. En cuanto a gases no-CO<sub>2</sub> (N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>) son fundamentalmente el resultado de procesos microbiológicos

realizados en el suelo, las vías digestivas animales, el manejo de estiércol y la combustión de materiales orgánicos.

### **3.1 Tierras de cultivo**

En las tierras de cultivo se estimaron los cambios en las existencias de Carbono (C) de todos los depósitos y fuentes de C tales como biomasa, materia orgánica muerta y suelo; y las emisiones de gases no CO<sub>2</sub> a partir del quemado de biomasa. En las Tierras de Cultivo se identificaron 2 subcategorías: cultivos permanentes como aquellos que tienen un prolongado periodo de producción que permite tener cosechas durante varios años; y cultivos transitorios como aquellos cuyo ciclo vegetativo es menor de un año y que una vez cosechados se elimina la planta y se deben sembrar nuevamente.

Se analizaron en dos componentes: Tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra y Tierras que se convierten a una nueva categoría de uso, ya que todas las emisiones y absorciones relacionadas con el cambio de uso de la tierra deben hacerse en la nueva categoría de uso.

En la identificación de los cambios en el uso de la tierra en relación con las tierras de cultivo, entre las que se incluyen la tierra cultivada, incluyendo los sistemas de agro-silvicultura, donde la vegetación se encuentra por debajo de los umbrales utilizados para la categoría de tierras forestales (IPCC, 2006); se emplearon como fuentes de información (datos de actividad) los mapas de coberturas terrestres producto del proyecto “Sistema de Metropolitano de Áreas Protegidas” (SIMAP, 2007-2012); y la información de coberturas terrestres producto del proyecto “Cinturón Verde”.

Mediante interpolación lineal y como parte del inventario de AFOLU, estos mapas de coberturas se emplearon para obtener los datos de coberturas en todos los usos de la tierra, para los años 2009 y 2011, correspondientes al año base y actual, respectivamente. Debido al nivel de escala con que se presentan estos mapas no fue posible hacer una

distinción entre los diferentes cultivos salvo en las dos categorías descritas anteriormente, es decir, cultivos permanentes y transitorios.

Mediante las ecuaciones (3-1) a (3-4) de la Tabla 3-1, se contabilizaron los cambios en el Carbono en la biomasa por el método de pérdidas y ganancias. Estos se estimaron para los cultivos permanentes – leñosos, ya que para cultivos transitorios o anuales no hay acumulación neta de C en la biomasa al perderse todo en el mismo año por cosecha o mortalidad (IPCC, 2006). Para la determinación de las existencias de C en la biomasa en tierras convertidas a cultivos, se asume que toda la vegetación inicial se elimina por completo durante el establecimiento del cultivo. Así, las emisiones de C en tierras convertidas a tierras en cultivo equivalen a la diferencia de existencias de C en la biomasa inicial y final.

Considerando que se da una remoción total de la vegetación antes del establecimiento de nuevos cultivos, se asume que el C en la biomasa después de la conversión de las tierras a cultivos es cero. Los datos de existencias de C de cada categoría de uso de la tierra, y antes de la conversión, se obtuvieron de las categorías de tierras forestales y pastizales del inventario de AFOLU.

No se estimó el C de la materia orgánica muerta, ya que para un Nivel 1, se supone que toda la materia orgánica muerta (DOM) de todas las tierras de cultivo que permanecen como tales es insignificante o no cambian. Además se asume que toda la madera muerta y la hojarasca se elimina durante la conversión y que no hay madera muerta ni hojarasca que se acumule o permanezca en las tierras convertidas a cultivos (IPCC, 2006).

Por tratarse de un Inventario con Nivel 1, y por falta de factores de emisión que reflejen las condiciones nacionales o locales, los factores de emisión empleados para el cálculo de las emisiones son los factores de emisión por defecto presentados en las Directrices 2006, descritos en el Anexo A.

## **3.2 Fuentes agregadas y emisiones de gases no CO<sub>2</sub> en tierras**

Como posibles fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero diferentes al CO<sub>2</sub> en las actividades agrícolas desarrolladas en el Valle de Aburrá se identificaron la quema de biomasa en tierras de cultivo y la fertilización nitrogenada con base sintética y orgánica. Como fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> se identificaron las prácticas relacionadas con la aplicación de cal y urea a cultivos y pastos manejados.

Dada la necesidad de un nivel de detalle más preciso y confiable para cada tipo de cultivo en la cuantificación del Nitrógeno aportado a los suelos, se usaron las áreas suministradas en los Anuarios Estadísticos. Para la toma de decisiones se contó con la opinión de los expertos que hicieron parte del equipo de trabajo de AFOLU y con la asesoría de CITEPA (Centro Técnico Interprofesional para el Estudio de la Contaminación Atmosférica, por su sigla en Francés), asociación experta en la realización de inventarios de gases de efecto invernadero en Francia y el exterior, así como estudios sobre datos y métodos sobre la contaminación atmosférica y el cambio climático.

### **3.2.1 Emisiones directas e indirectas de N<sub>2</sub>O**

El N que se aporta a los suelos en el Valle de Aburrá se deriva de la aplicación de fertilizantes de N sintéticos, N orgánico proveniente de estiércol animal, compost, lodos cloacales, desechos y abonos orgánicos; N proveniente de la orina y el estiércol depositado en el suelo por animales de pastoreo, residuos agrícolas y la mineralización de N relacionada con la pérdida de materia orgánica del suelo como resultado en el cambio del uso del suelo.

En la cuantificación de las emisiones procedentes del uso de fertilizantes orgánicos y sintéticos, aplicados en los suelos del Valle de Aburrá, se empleó la información de áreas en cultivos permanentes y transitorios registrada en los Anuarios Estadísticos de Antioquia

para los años 2009 (Gobernación de Antioquia, 2010) y 2011 (Gobernación de Antioquia, 2012), por cada categoría (permanentes o transitorios) de cultivo de la región.

Para determinar las cantidades de N sintético aportado a los suelos se solicitaron los datos de producción y venta de fertilizantes sintéticos para el Valle de Aburrá a entidades públicas como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) seccional Antioquia y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) Regional Antioquia. Pero no se obtuvo respuesta a la solicitud en ninguna de las entidades.

Por esta razón para determinar las cantidades de N sintético se empleó la información existentes en diversas fuentes bibliográficas para determinar la cantidad de N recomendada (kg/N/ha) para los diferentes cultivos que se tienen en la región. Se tuvo en cuenta los tipos de cultivos y sus requerimientos nutricionales en regiones con características similares al Valle de Aburrá; además se realizó un sondeo con algunos de los productores de los principales cultivos de la región sobre sus prácticas de gestión de los cultivos.

Sobre producción y aplicación de compost a los suelos directamente fue extraída a partir de estudios adelantados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá:

- Convenio 415 de 2009 de Girardota, cuyo objeto era: “Aunar esfuerzos para fortalecer el aprovechamiento de residuos orgánicos en el municipio de Girardota”
- Convenio 439 de Sabaneta, cuyo objeto era “aunar esfuerzos para fortalecer el aprovechamiento de los residuos orgánicos en el municipio de sabaneta”
- Convenio 295 de 2011, cuyo objeto era “Aunar esfuerzos para realizar el seguimiento a los 36 sistemas de aprovechamiento de los residuos orgánicos implementados en el municipio de sabaneta”
- Convenio AMVA 277 de 2011 “aunar esfuerzos para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante la puesta en operación de sistemas de aprovechamiento en el sector domiciliario del Valle de Aburrá segunda fase

Las cantidades de lodos provenientes de aguas servidas se obtuvieron mediante la información de biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando.

El nitrógeno aportado a los suelos proveniente de manejo de estiércol se estimó mediante información del sector pecuario y se asumió que el 100% de las excretas de aves y de cerdos se aplican a los suelos, y que el 100% de la orina y excretas de bovinos se aplica al suelo por pastoreo de este tipo de ganado. La cantidad anual de N depositado en suelos de pasturas, prados y praderas por animales de pastoreo se obtuvo de acuerdo a la cantidad de animales de cada especie/categoría de ganado, la cantidad promedio anual de N excretado por cada especie/categoría de ganado, y la fracción de este N que deposita cada especie/categoría de ganado en suelos de pasturas, prados y praderas.

En la Tabla 3-1 se presentan las ecuaciones que se emplearon en la cuantificación de las emisiones, los factores de emisión empleados son aquellos que presenta el IPCC por defecto para Inventarios de Nivel 1.

### **3.2.2 Emisiones de CO<sub>2</sub> por encalado**

Los datos de actividad planteados en la metodología (IPCC, 2006) para la determinación de las emisiones de CO<sub>2</sub> producto de la aplicación de cal a los suelos agrícolas para un Nivel 1, pueden disponerse de estadísticas de uso local de cal que se aplica anualmente a los suelos, bajo la hipótesis de que toda la cal que se vende se aplica durante el mismo año. Para ello se solicitó información de producción y venta de cal dolomita CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y cálcica CaCO<sub>3</sub> vendida en los municipios del Valle de Aburrá para los años 2009, pero no se obtuvo información. De acuerdo a esta situación se optó por realizar una revisión de literatura en artículos científicos y técnicos, sobre dosis de cal aplicada en suelos para los diferentes cultivos del Valle de Aburrá. Las ecuaciones empleadas para la cuantificación de las emisiones se presentan en la Tabla 3-1. Los factores de emisión se toman de las Directrices IPCC 2006.

### **3.2.3 Emisiones de CO<sub>2</sub> por fertilización con urea**

Se asumió de acuerdo a la información dada, que la mayor parte de la urea se aplica en pastos manejados por lo que se consultó bibliografía y se solicitó dictamen de expertos en pastos acerca de las dosis más comúnmente utilizadas. Las ecuaciones empleadas para la cuantificación de las emisiones se presentan en Tabla 3-1. Los factores de emisión se toman de las Directrices IPCC 2006.

Toda la información analizada y compilada, luego de evaluar su confiabilidad, se ingresó en el software IPCC (WMO, UNEP, IPCC, SPIRIT, 2013) y en las hojas de trabajo desarrollados con base en las directrices del (IPCC, 2006) con el fin de tener soportes para verificación de resultados.

**Tabla 3-1** Ecuaciones básicas para cálculo de GEI por categoría.

<b>Categoría / Ecuaciones básicas</b>	
<p><b>TIERRAS DE CULTIVO QUE PERMANECEN COMO TALES</b></p> $\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L \quad (3-1)$ <p>Donde:  <math>\Delta C_B</math> = cambio anual en las existencias de carbono de para cada subcategoría de tierra, considerando la superficie total, ton C año<sup>-1</sup>  <math>\Delta C_G</math> = aumento anual de las existencias de carbono debido al crecimiento de la biomasa para cada subcategoría de tierra, considerando la superficie total, ton C año<sup>-1</sup>  <math>\Delta C_L</math> = reducción anual de las existencias de carbono debida a la pérdida de biomasa para cada subcategoría de tierra, considerando la superficie total, ton C año<sup>-1</sup></p> $\Delta C_{Minerales} = \frac{SOC_0 - SOC_{C-T}}{D} \quad (3-2)$ $SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF_{c,s,i}} \times F_{LU_{c,s,i}} \times F_{MG_{c,s,i}} \times F_{I_{c,s,i}} \times A_{c,s,i})$ <p>Donde:  <math>\Delta C_{Minerales}</math> = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos minerales, ton C año<sup>-1</sup>  <math>SOC_0</math> = existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, ton C</p>	<p><b>OTRAS TIERRAS CONVERTIDAS EN TIERRAS DE CULTIVO</b></p> $\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{CONVERSIÓN} - \Delta C_L \quad (3-3)$ <p>Donde:  <math>\Delta C_B</math> = cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>  <math>\Delta C_G</math> = incremento anual en las existencias de carbono de la biomasa debido a crecimiento en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>  <math>\Delta C_{CONVERSIÓN}</math> = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>  <math>\Delta C_L</math> = reducción anual en las existencias de carbono de la biomasa debida a pérdidas producidas por cosechas, recogida de madera combustible y perturbaciones en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup></p> $\Delta C_{CONVERSIÓN} = \sum_i \{ (B_{DESPUÉS_i} - B_{ANTES_i}) \times \Delta A_{OTRASI} \} \times CF \quad (3-4)$ <p>Donde:  <math>\Delta C_{CONVERSIÓN}</math> = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de tierra, ton C año<sup>-1</sup>  <math>B_{DESPUÉS_i}</math> = existencias de biomasa en el tipo de tierra i inmediatamente después de la conversión, ton d. m. ha<sup>-1</sup></p>

<p><math>SOC_{(0-T)}</math> = existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, ton C</p> <p>T = cantidad de años de un período de inventario dado, año</p> <p>D = Dependencia temporal de los factores de cambio de existencias, que es el lapso por defecto para la transición entre los valores de equilibrio del SOC, año.</p> <p><math>SOC_{REF}</math> = las existencias de carbono de referencia, ton C ha-1</p> <p><math>F_{LU}</math> = factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra o subsistemas de un uso de la tierra en particular, sin dimensión</p> <p><math>F_{MG}</math> = factor de cambio de existencias para el régimen de gestión, sin dimensión</p> <p><math>F_i</math> = factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica, sin dimensión</p> <p>A = superficie de tierra del estrato que se estima, ha</p>	<p><math>B_{ANTESi}</math> = existencias de biomasa en el tipo de tierra i antes de la conversión, ton d.m. ha-1</p> <p><math>\Delta A_{A\_OTRASI}</math> = superficie de uso de la tierra i convertida a otra categoría de uso de la tierra en un año dado, ha año-1</p> <p>CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)-1</p> <p>i = tipo de uso de la tierra convertido a otra categoría de uso de la tierra.</p>
<p><b>EMISIONES DIRECTAS DE N<sub>2</sub>O</b></p> <p><math>N_2O_{Directas} - N = N_2O - N_{N\text{aportes}} + N_2O - N_{OS} + N_2O - N_{PRP}</math> (3-6)</p> <p>Donde:</p> <p><math>N_2O - N_{N\text{aportes}} = \left[ [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_1] + [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} \times EF_{1FR}] \right]</math></p> <p><math>N_2O - N_{OS} = \left[ (F_{OS,CG,Temp} \times EF_{2CG,Temp}) + (F_{OS,CG,Trop} \times EF_{2CG,Trop}) + (F_{OS,F,Temp,NR} \times EF_{2F,Temp,NR}) + (F_{OS,F,Temp,NP} \times EF_{2F,Temp,NP}) + (F_{OS,F,Trop} \times EF_{2,Trop}) \right]</math></p>	<p><b>EMISIONES INDIRECTAS DE N<sub>2</sub>O</b></p> <p><math>N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} \times Frac_{GASF}) + (F_{ON} + F_{PRP}) \times Frac_{GASM}] \times EF_4</math> (3-12)</p> <p>Donde:</p> <p><math>N_2O_{(ATD)}-N</math> = cantidad anual de N<sub>2</sub>O–N producida por deposición atmosférica de N volatilizado de suelos gestionados, kg N<sub>2</sub>O–N año<sup>-1</sup></p> <p><math>F_{SN}</math> = cantidad anual de N de fertilizante sintético aplicado a los suelos, kg N año<sup>-1</sup></p>

<p><math>N_2O-N_{Directas}</math>=emisiones directas anuales de <math>N_2O-N</math> producidas a partir de suelos gestionados, kg <math>N_2O-N</math> año-1</p> <p><math>N_2O-N_{N\ aportes}</math>=emisiones directas anuales de <math>N_2O-N</math> producidas por aportes de N a suelos gestionados, kg <math>N_2O-N</math> año-1</p> <p><math>N_2O-N_{OS}</math>=emisiones directas anuales de <math>N_2O-N</math> de suelos orgánicos gestionados, kg <math>N_2O-N</math> año-1</p> <p><math>N_2O-N_{PRP}</math>=emisiones directas anuales de <math>N_2O-N</math> de aportes de orina y estiércol a tierras de pastoreo, kg <math>N_2O-N</math> año-1</p> <p><math>F_{SN}</math>=cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N año-1</p> <p><math>F_{ON}</math>=cantidad anual de estiércol animal, compost, lodos cloacales, y otros aportes de N aplicada a los suelos (nota: lodos cloacales verificar con el sector desechos), kg N año-1</p> <p><math>F_{CR}</math>=cantidad anual de N en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), incluyendo los cultivos fijadores de N y la renovación de forraje/pastura, que se regresan a los suelos, kg N año-1</p> <p><math>F_{SOM}</math>=cantidad anual de N en suelos minerales que se mineraliza, relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra, kg N año-1</p> <p><math>F_{OS}</math>=superficie anual de suelos orgánicos gestionados/drenados, ha (los subíndices CG, F, Temp, Trop, NR y NP se refieren a tierras de cultivo y pastizales, tierras forestales, templado, tropical, rico en nutrientes y pobre en nutrientes respectivamente).</p> <p><math>F_{PRP}</math>=cantidad anual de N de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo sobre pasturas, prados, y praderas, kg N año-1 (nota: los subíndices CPP y SO se refieren a vacunos, aves de corral y porcinos, y a ovinos y otros animales, respectivamente).</p>	<p><math>Frac_{GASF}</math> = fracción de N de fertilizantes sintéticos que se volatiliza como <math>NH_3</math> y <math>NO_x</math>, kg N volatilizado (kg de N aplicado)<sup>-1</sup></p> <p><math>F_{ON}</math> = cantidad anual de estiércol animal gestionado, compost, lodos cloacales y otros agregados de N orgánico aplicada a los suelos, kg N año<sup>-1</sup></p> <p><math>F_{PRP}</math> = cantidad anual de N de la orina y el estiércol depositada por animales de pastoreo en pasturas, prados y praderas, kg N año<sup>-1</sup></p> <p><math>Frac_{GASM}</math> = fracción de materiales fertilizantes de N orgánico (<math>F_{ON}</math>) y de N de orina y estiércol depositada por animales de pastoreo (<math>F_{PRP}</math>) que se volatiliza como <math>NH_3</math> y <math>NO_x</math>, kg N volatilizado (kg de N aplicado o depositado)<sup>-1</sup></p> <p><math>EF_4</math> = factor de emisión correspondiente a las emisiones de <math>N_2O</math> de la deposición atmosférica de N en los suelos y en las superficies del agua [kg N-<math>N_2O</math> (kg <math>NH_3-N</math> + <math>NO_x-N</math> volatilizado)<sup>-1</sup>]</p> <p>La conversión de emisiones de <math>N_2O</math> (<math>ATD</math>) -N en emisiones de <math>N_2O</math> se realiza empleando la siguiente ecuación:</p> $N_2O_{(ATD)} = N_2O_{(ATD)} -N * 44/28$ <p>Las emisiones de <math>N_2O</math> por lixiviación y escurrimiento en regiones donde se producen estos fenómenos se estimaron empleando la Ecuación (3-13).</p> $N_2O_{(L)} - N = (F_{SN} + F_{ON} + F_{PRP} + F_{CR} + F_{SOM}) \times Frac_{LIXIVIACIÓN-(H)} \times EF_5$ <p style="text-align: right;">(3-13)</p> <p>Donde:</p>
--	---

<p>EF<sub>1</sub>=factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O de aportes de N, kg N<sub>2</sub>O-N (kg aporte de N)<sup>-1</sup></p> <p>EF<sub>3PRP</sub> = factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O del N de la orina y el estiércol depositado en pasturas, prados y praderas por animales en pastoreo, kg N<sub>2</sub>O-N (kg aporte de N)<sup>-1</sup></p> <p>(Nota: los subíndices CPP y SO se refieren a Vacunos, Aves de corral y Porcinos, y a Ovinos y Otros animales, respectivamente).</p> <p>La conversión de emisiones de N<sub>2</sub>O-N en emisiones de N<sub>2</sub>O se realiza empleando la siguiente ecuación:</p> $N_2O = N_2O-N \cdot 44/28$	<p>N<sub>2</sub>O<sub>(L)</sub>-N=cantidad anual de N<sub>2</sub>O-N producida por lixiviación y escurrimiento de agregados de N a suelos gestionados en regiones donde se producen estos fenómenos, kg N<sub>2</sub>O-N año<sup>-1</sup></p> <p>F<sub>SN</sub> = cantidad anual de N de fertilizantes sintéticos aplicada a los suelos en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N año<sup>-1</sup></p> <p>F<sub>ON</sub> = cantidad anual de estiércol animal gestionado, compost, lodos cloacales y otros agregados de N orgánico aplicada a los suelos en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N año<sup>-1</sup></p> <p>F<sub>PRP</sub> = cantidad anual de N de la orina y el estiércol depositada por los animales en pastoreo en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N año<sup>-1</sup></p> <p>F<sub>CR</sub> = cantidad de N en los residuos agrícolas (aéreos y subterráneos), incluyendo los cultivos fijadores de N y de la renovación de forraje/pastura, devuelta a los suelos anualmente en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N año<sup>-1</sup></p> <p>F<sub>SOM</sub> = cantidad anual de N mineralizado en suelos minerales relacionada con la pérdida de C del suelo de la materia orgánica del suelo, como resultado de cambios en el uso o la gestión de la tierra en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N año<sup>-1</sup></p> <p>Frac<sub>LIXIVIACIÓN-(H)</sub> = fracción de todo el N agregado a/mineralizado en suelos gestionados en regiones donde se produce lixiviación/escurrimiento, kg N (kg de agregados de N)<sup>-1</sup></p> <p>EF<sub>5</sub> = factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O por lixiviación y escurrimiento de N, kg N<sub>2</sub>O-N (kg N por lixiviación y escurrido)<sup>-1</sup></p> <p>La conversión de emisiones de N<sub>2</sub>O<sub>(L)</sub> -N en emisiones de N<sub>2</sub>O a los efectos de la declaración se realiza empleando la siguiente ecuación:</p> $N_2O_{(L)} = N_2O_{(L)} -N \cdot 44/28$
--	--

<b>EMISIONES DE CO<sub>2</sub> POR ENCALADO</b>	<b>EMISIONES DE CO<sub>2</sub> POR FERTILIZACIÓN CON UREA</b>
$\text{Emisión CO}_2 - \text{C} = (M_{\text{caliza}} \times \text{EF}_{\text{caliza}}) + (M_{\text{Dolomita}} \times \text{EF}_{\text{Dolomita}})$ <p style="text-align: right;">(3-14)</p>	$\text{CO}_2 - \text{C Emisión} = M \times \text{EF} \quad (3-15)$
<p>Donde:</p> <p>Emisión de CO<sub>2</sub>-C = emisiones anuales de C por aplicación de cal, ton C año<sup>-1</sup></p> <p>M = cantidad anual de piedra caliza cálcica (CaCO<sub>3</sub>) o dolomita (Ca Mg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), ton año<sup>-1</sup></p> <p>FE = factor de emisión, ton de C (ton de piedra caliza o dolomita)<sup>-1</sup></p> <p>Multiplicar por 44/12 para convertir las emisiones de CO<sub>2</sub>-C en CO<sub>2</sub>.</p>	<p>Donde:</p> <p>Emisión de CO<sub>2</sub>-C = emisiones anuales de C por aplicación de urea, ton C año<sup>-1</sup></p> <p>M = cantidad anual de fertilización con urea, ton urea año<sup>-1</sup></p> <p>FE = factor de emisión, ton de C (ton de urea)<sup>-1</sup></p> <p>Multiplicar por 44/12 para convertir las emisiones de CO<sub>2</sub>-C en CO<sub>2</sub>.</p>

### **3.3 Incertidumbre**

Como parte de las buenas prácticas en el desarrollo del inventario y como control de la calidad del inventario, se identificaron como fuentes de incertidumbre los datos de actividad y los factores de emisión. Se determinó la incertidumbre por el método de Propagación de Errores en los datos de áreas de cultivos, en los que se emplearon dos fuentes de información: Mapas de Coberturas y Anuario Estadístico de Antioquia; y en cantidad de N sintético para tierras de cultivo y fertilización con Nitrógeno. En este caso las incertidumbres en cada una de las cantidades se calcularon como dos veces la desviación estándar como porcentaje de la media; en fuentes no agregadas de CO<sub>2</sub> como la aplicación de cal y urea, y en fuentes de Nitrógeno orgánico se determinó la incertidumbre a criterio de experto. Finalmente las incertidumbres de los datos de actividad y los factores de emisión se combinaron para obtener la incertidumbre total para cada una de las categorías.

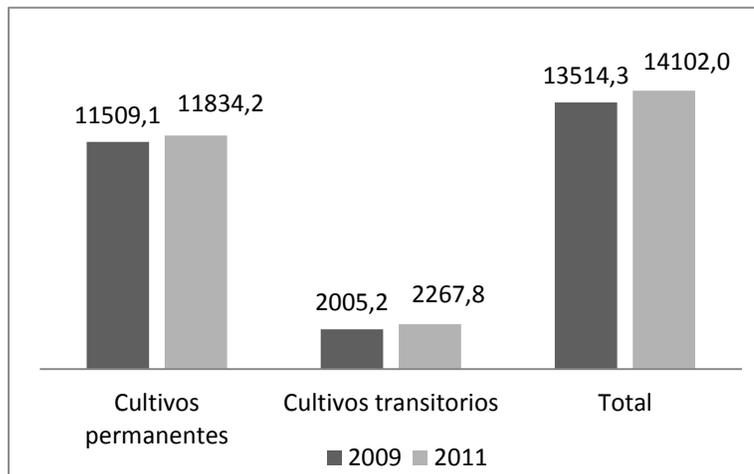


## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Cambios en el uso del suelo y estimación del área de suelo empleada para diferentes cultivos

Por su escala (1:320.000), los mapas empleados permitieron únicamente obtener el total del área destinada a los cultivos permanentes y transitorios Figura 4-1, hecho que impidió tener más detalle de cada cultivo. Las áreas destinadas a pastos manejados también se tomaron de esta fuente, correspondiendo a 13.738 ha en 2009 y 12.224 ha en 2011.

Figura 4-1. Área cultivada (ha) en el Valle de Aburrá 2009 y 2011 según mapas de coberturas.



Los Anuarios Estadísticos de Antioquia de los años 2009 y 2011, permitieron conocer en más detalle los cultivos de la región del Valle de Aburrá. Por su nivel de detalle estos permitieron saber las hectáreas dedicadas a cada cultivo en los 10 municipios del estudio, (Tabla 4-1). El municipio con más tierra cultivada es Barbosa con un 39 y 37% para 2009 y 2011, respectivamente. Medellín cuenta con el 24% de los cultivos agrícolas del Valle de

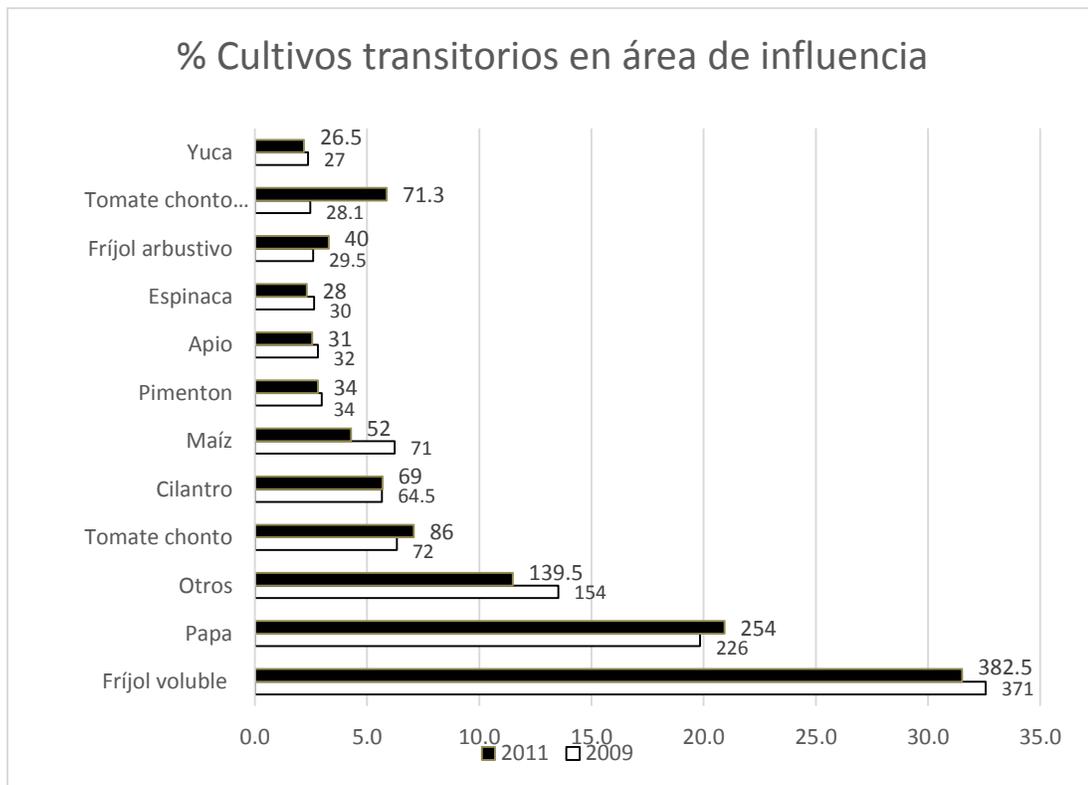
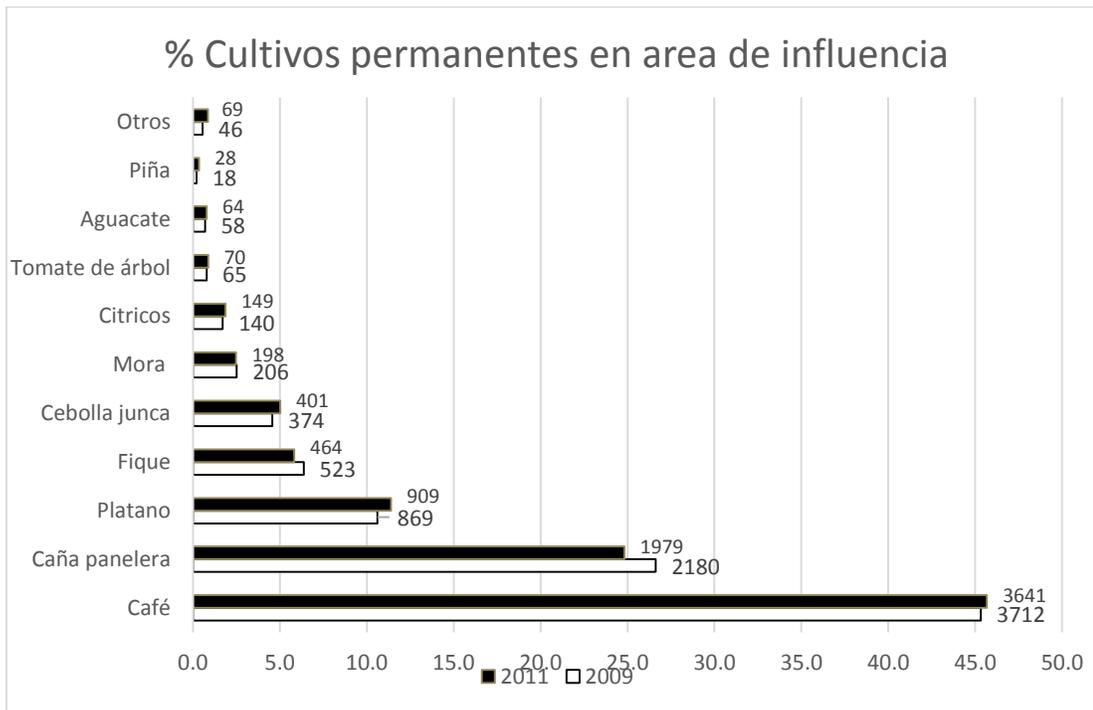
Aburrá en ambos años estudiados, lo que se debe principalmente por el aporte de los corregimientos de San Sebastián de Palmitas, San Antonio de Prado y San Cristóbal (Alcaldía de Medellín y Universidad Nacional de Colombia, 2009).

Tabla 4-1 Área cultivada (ha) según anuario estadístico de Antioquia

Municipio	Permanentes		Transitorios		Total	
	2009	2011	2009	2011	2009	2011
Barbosa	3252	3055,6	414	330	3666	3385,6
Girardota	1754,5	1744,9	0	0	1754,5	1744,9
Copacabana	357,5	354,5	0	0	357,5	354,5
Bello	319	334	113	271	432	605
Medellín	1650	1591	547	663,5	2197	2254,5
Itagüí	0	0	0	0	0	0
Envigado	51	60	2,6	0	53,6	60
Sabaneta	207	155,5	0	0	207	155,5
La estrella	164	166	33,5	17	197,5	183
Caldas	434	437,5	29	27,3	463	464,8

A partir de la información de los Anuarios se pudo determinar la distribución porcentual de los cultivos permanentes y transitorios en el Valle de Aburrá, contando con 39 cultivos diferentes, 19 cultivos permanentes y 20 cultivos transitorios. De los cultivos permanentes, aproximadamente el 72% corresponde a cultivos de café y caña panelera en ambos años; mientras que el cultivo transitorio que aporta más área cultivada es el frijol voluble, con un porcentaje del 32,6 para el año 2009 y 31,5 para el 2011. La papa y otros cultivos transitorios (habichuela, remolacha, lechuga, zanahoria, cebolla de huevo) aportan el 20% del área de cultivos transitorios en 2009 y 13,5% en 2011, ver Figura 4-2.

Figura 4-2. Participación de los cultivos permanentes y transitorios en la zona de estudio



Las diferencias que se presentan en las dos fuentes de información empleadas en este estudio (Mapas de coberturas y Anuario Estadístico 2009 y 2011) pueden observarse en la Tabla 4-2. Se observa que se tiene una diferencia de 4.186,2 ha en el año 2009 y 4.917,2 ha en 2011; estas diferencias se pueden atribuir a la suma de varias imprecisiones, entre las que se incluyen aquellas asociadas a la metodología empleada para la elaboración de los mapas y la imposibilidad de acceder a información más detallada que permita la diferenciación más acertada de las coberturas vegetales. Además cabe resaltar que los Anuarios Estadísticos se elaboran con “datos por consenso” en las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA), lo que puede en parte también explicar las discrepancias observada entre ambos estimados.

Tabla 4-2. Área destinada a cultivos permanentes y transitorios en la región de estudio, años 2009 y 2011, proyectos SIMAP y Cinturón Verde y Anuario Estadístico de Antioquia.

Cultivos	Área cultivada (ha)				Diferencia ponderada (%)	
	Mapas coberturas		Anuario estadístico		2009	2011
	2009	2011	2009	2011		
Permanentes	11509,1	11834,2	8189,0	7971,0	33,71	39,01
Transitorios	2005,2	2267,8	1139,1	1213,8	55,09	60,55
Total	13514,3	14102,0	9328,1	9184,8	36,65	42,23

## 4.2 Nitrógeno aplicado a los diferentes cultivos y pastizales

La cantidad de N aplicado a los suelos se determinó mediante revisión bibliográfica sobre los requerimientos nutricionales y recomendación de dosis de fertilizantes nitrogenados, aplicadas a los principales cultivos permanentes y transitorios, y pastizales en el Valle de Aburrá. Las cantidades de N sintético empleadas en este estudio se muestran en la Tabla 4-3, así como la respectiva fuente de información para la obtención de los mismos. En el año 2009 se aplicaron 3948 toneladas de N sintético a los cultivos, mientras que en el año 2011 se aplicaron 3731, reducción ocasionada por la disminución en las áreas destinadas a cultivos y pastos.

Tabla 4-3 Dosis de Nitrógeno aplicadas a cultivos y pastos, por fertilización sintética (kgN/ha/año)

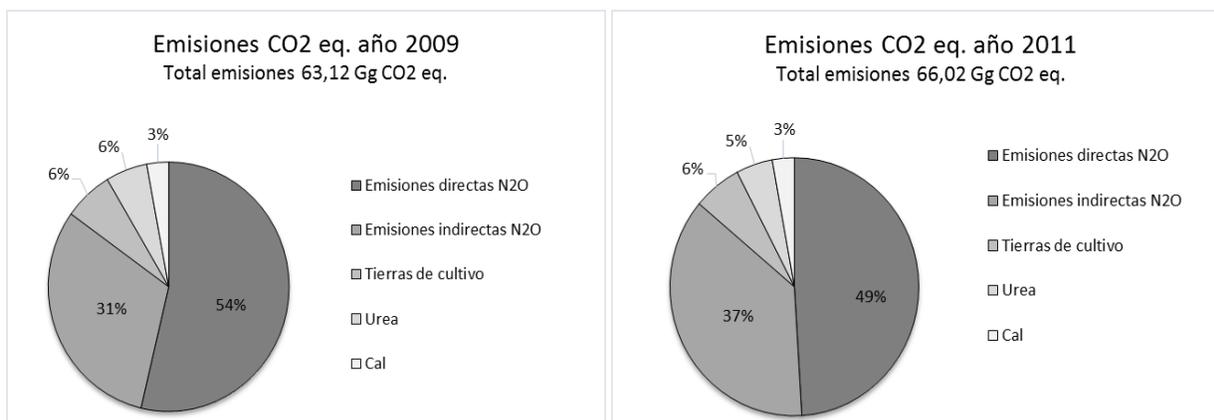
	Dato de actividad	Valor	Referencia
<b>Permanentes</b>	Caña panelera	62,5	(FAO y CORPOICA, 2007)
	Plátano	220	(CORPOICA, 2006)
	Piña	355	(CORPOICA y SENA, s.f.)
	Cebolla junca	480	(Castellanos, 1999)
	Aguacate	102	(CORPOICA, 2008)
	Café	250	(CENICAFE, 2012)
	Col	80	(Seminario Consorcio Lechero, s.f.)
	Fresa	60	(Molina, Salas, & Castro, 1993)
	Mora	120	(CORPOICA, 1986)
	Naranja Valencia	150	(Molina E. , 2000)
	Tomate de árbol	300	(Universidad técnica del Norte, 2011)
<b>Transitorios</b>	Papa	275	(Ramírez, 2012)
	Tomate chonto	300	(Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), Sin fecha)
	Tomate chonto bajo invernadero	900	(CORPOICA, 2006)
	Pimentón	228	(Nuez, 2003)
	Apio	468	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)
	Yuca	60	(Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2008)
	Maíz	100	(Bonilla, 2009)
	Frijol Voluble	97	(FAO y CORPOICA, 2007)
	Frijol Arbustivo	53	(Hernández, 2009)
	Cilantro	70,5	(Universidad nacional de Colombia, 2010)
	Repollo	150	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)
	Ajo	300	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)
	Coliflor	300	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)
	Lechuga	80	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)
	Zanahoria	100	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)
Remolacha	100	(Monómeros Colombovenezolanos S.A., 1998)	
<b>Pastizales</b>	Pastos manejados	161	(Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, 1992) e (International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2003)

### 4.3 Cuantificación de emisiones

Las emisiones de gases de efecto invernadero en el Valle de Aburrá generados en la producción agrícola fueron del orden de 63,1 Gg CO<sub>2</sub> eq. para el año 2009 y de 66,0 Gg CO<sub>2</sub> eq. para el año 2011; correspondientes al 30% de las emisiones de AFOLU en el 2009 y al 32% en el 2011. La aplicación de N sintético y orgánico a los suelos fue la principal fuente de emisiones; las emisiones directas de N<sub>2</sub>O correspondieron al 54% para el año 2009 y al 49% en el 2011; y las emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O aportaron el 31 y 37% del

total de las emisiones para 2009 y 2011 respectivamente (Figura 4-3). De acuerdo con (Stehfest & Bouwman, 2006), el aumento en la concentración de  $N_2O$  atmosférico se debe principalmente a un mayor uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura; el módulo de agricultura del Inventario de GEI de Cundinamarca (Colombia) para el año 2008 (Pulido, 2012), reportó que el 49% de los aportes de GEI provenientes de tierras agrícolas proviene del uso de fertilizantes nitrogenados, tanto orgánicos como sintéticos, lo que coincide con este estudio.

Figura 4-3. Emisiones de  $CO_2$  eq. en la producción agrícola como porcentaje del total emitido.



Del total de las emisiones directas de  $N_2O$ , se observó que en ambos años, la aplicación de fertilizantes sintéticos aportó aproximadamente el 56%, mientras que el aporte de N por depositación de orina y estiércol por el pastoreo de bovinos aportó alrededor de 41%.

De las emisiones indirectas de  $N_2O$ , el mayor aporte fue generado por procesos de volatilización y lixiviación de N proveniente de estiércoles aplicados al suelo como fertilizante orgánico o depositado en forma directa por el pastoreo (68% para 2009 y 76% para 2011). Varios autores han demostrado que el pastoreo extensivo y la aplicación de fertilizantes sintéticos a base de Nitrógeno con poco control actúan como fuentes importantes a las emisiones atmosféricas por las altas pérdidas N en procesos de nitrificación y desnitrificación, así como también influyen las diferentes prácticas culturales (Van Der Hoek et al., 2007); (Popp et al., 2010).

La fertilización nitrogenada a cultivos y pastos para alimentación de ganado hacen parte de las prácticas que más aportan a las emisiones de gases efecto invernadero (cerca del 14% del total de las emisiones procedentes de la agricultura en el 2011) (Tubiello et al., 2014). Estos autores reportaron que a nivel global, las emisiones anuales de  $N_2O$  por aplicación de estiércol como fertilizante aumentaron más del 12% entre 2001 y 2011, con aporte de N principalmente proveniente del estiércol de ganado bovino (45%) y cerdos (18%); mientras que las emisiones procedentes de excrementos y orina dejados en los pastos aumentaron un 16% en ese mismo periodo.

Las emisiones de  $N_2O$  procedentes de los residuos de cultivos como frijol, maíz, papa, zanahoria y yuca; contribuyeron aproximadamente al 0,8% del total de emisiones de este GEI en el periodo estudiado. De acuerdo a Tubiello et al., (2014), para el año 2011, las emisiones anuales mundiales totales de residuos de los cultivos fueron casi el 4% del total de emisiones procedentes de la agricultura, esto debido a los residuos cultivos como el arroz, trigo, maíz y soya. En este estudio, la contribución a las emisiones procedentes de la quema de residuos de cosecha, se estimaron como nulas, dado que no se tienen cifras oficiales sobre la quema de este tipo de material en los 10 municipios que hacen parte del Valle de Aburrá. A nivel mundial para el año 2011, esta práctica sólo aportó el 0,5% del total de las emisiones del sector agricultura, con la quema de residuos provenientes del cultivo de maíz, trigo, arroz y caña de azúcar (Tubiello et al., 2014).

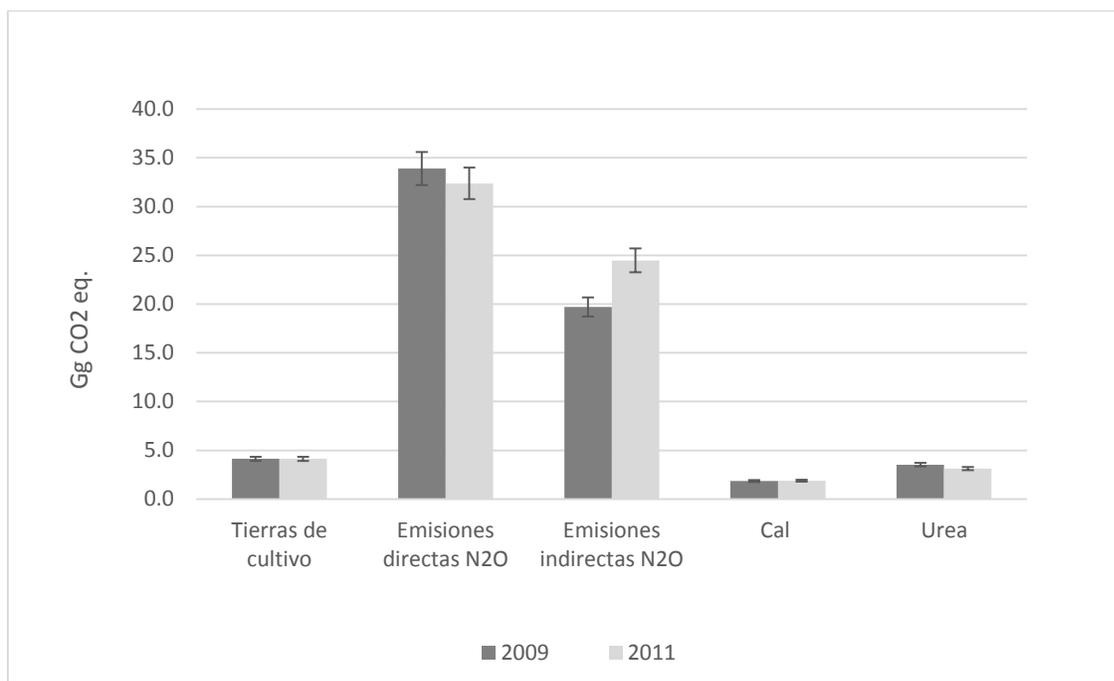
Se estimó que la contribución de la agricultura a las emisiones globales de  $N_2O$  para el año 2004 fue de alrededor del 35% (Asociación Internacional de la industria de los fertilizantes (IFA), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2004). En Colombia para ese mismo año, las emisiones de  $N_2O$  correspondieron al 19,1% de las emisiones totales colombianas, en las cuales el módulo de agricultura aportó el 38,09% al total de  $CO_2$  eq emitidos (IDEAM, 2009).

En cuanto a las emisiones asociadas con tierras de cultivo, las emisiones correspondieron al 6% del total para ambos años, de las cuales, el 100% se debe a las emisiones de  $CO_2$  por cambios en el uso del suelo, el cual ha implicado principalmente el paso de tierras de uso forestal, pastizales y rastrojos, a tierras de cultivo como consecuencia del avance de la frontera agrícola, en concordancia con lo reportado por (Sierra et al., 2007). Este estudio

pudo determinar que 689,5 ha en pastos y uso forestal pasaron a ser cultivos agrícolas en 2009 y 2011, generando una perturbación del C del suelo almacenado y la biomasa (IPCC, 2013).

La Figura 4-4 muestra las emisiones en CO<sub>2</sub> eq. para cada categoría analizada. Allí se evidencia el mayor aporte de las emisiones directas e indirectas de N<sub>2</sub>O, como parte de las prácticas de fertilización que se llevan a cabo en el Valle de Aburrá.

Figura 4-4. Emisiones de CO<sub>2</sub> eq. para el Valle de Aburrá (2009 y 2011)



#### 4.4 Cuantificación de incertidumbres

Se tomaron como fuentes de incertidumbre en este Inventario la estimación los datos de actividad y el uso de los factores de emisión por defecto, los cuales podrían tener fuentes y sumideros no identificados, falta de transparencia o exhaustividad, error en los modelos, errores en la medición intrínsecos, o falta de representatividad de los datos y factores de emisión los cuales podría no ser tan aplicables a las condiciones de los sistemas de producción evaluados (Milne et al., 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, se tomaron como fuentes de verificación para las cantidades de fertilizantes utilizadas por los productores de la zona, el concepto de expertos y de productores de los principales cultivos de la zona de estudio, como puede observarse en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Comparativo dosis de fertilizantes aplicados según varias fuentes

Cultivo	Cantidad de N (kg/ha/año)		
	Reportado	Productores	Expertos
Café	250	260	230
Caña panelera	62.5	60	142
Fique	0	0	0
Cebolla junca	480	200	161
Frijol arbustivo	53	125	130
Mora	120	90	99
Cítricos	150	40	136
Pastos	161	235	235
Papa	275	--	184
Plátano	220	--	161
Maíz	100	--	153
Tomate chonto	300	--	173
Tomate de árbol	300	--	169
Aguacate	102	--	122
Pimentón	228	--	111
Apio	468	--	175
Espinaca	224	--	122

Se estimó la incertidumbre derivada de las áreas de cultivo para las dos fuentes empleadas (Mapas de coberturas y Anuario Estadístico 2009 y 2011), las originadas por las aplicaciones de nitrógeno, fertilizante orgánico, urea y cal a los suelos, y las derivadas de los factores de emisión usados para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O. Las incertidumbres combinadas obtenidas para cada categoría mediante el método de propagación de errores, los cuales pueden observarse en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Estimación de la incertidumbre por el método de propagación de errores para las emisiones de GEI por producción agrícola en el Valle de Aburrá en 2009 y 2011

Categorías	Gas	Emisiones 2009	Emisiones 2011	Incertidumbre datos de actividad	Incertidumbre factores de emisión	Incertidumbre combinada
		(Gg CO <sub>2</sub> eq)	(Gg CO <sub>2</sub> eq)	(%)	(%)	(%)
Tierras de cultivo	CO <sub>2</sub>	4.1	4.1	46	50	68
Emisiones Directas	N <sub>2</sub> O	33.9	32.4	57	50	76
Emisiones Indirectas	N <sub>2</sub> O	19.7	24.5	57	50	76
Encalado	CO <sub>2</sub>	1.9	1.9	41	50	65
Aplicación Urea	CO <sub>2</sub>	3.5	3.1	46	50	68

La magnitud de las incertidumbres reportadas en la Tabla 4-5, es reflejo de las dificultades que se presentaron para la consecución de información de fuentes confiable y detalladas, correspondientes a las características propias de la zona de estudio. La carencia de información geográfica con mayor precisión, más actualizada y confiable también representa un obstáculo a la hora de determinar los usos del suelo y su evolución en el tiempo, lo que incrementa las incertidumbres en el inventario.

Se utilizó una incertidumbre del 50% para los factores de emisión por default suministrados por el (IPCC, 2006), los cuales contribuyeron a la elevación de la incertidumbre total del ejercicio. Estos factores de emisión pueden no ser adecuados y no reflejar el comportamiento real de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con actividades agrícolas de la región (Flynn et al., 2005),

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Las emisiones de GEI derivadas de la producción agrícola en el Valle de Aburra para los años 2009 y 2011, correspondieron a 63,1 y 66,0 Gg CO<sub>2</sub> eq., respectivamente. Estas emisiones corresponden aproximadamente al 1,3% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero del Valle de Aburrá para el año 2009 y 2011.

La fertilización nitrogenada es la principal fuente de N<sub>2</sub>O en el Valle de Aburrá, con un aporte del 85% de las emisiones para el año 2009 y 86% para el 2011. De estas, el aporte de nitrógeno sintético y nitrógeno orgánico por fertilización con estiércol de cerdos y aves actúan como la principal fuente. El cambio en el uso de suelos forestales y pastizales a cultivos también fue una de las principales fuentes de aportes de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, con un aporte del 6% del total de emisiones.

Dado que la aplicación de nitrógeno en los cultivos y pastizales es una importante fuente de N<sub>2</sub>O hacia la atmósfera se propone reducir o mejorar las prácticas de fertilización en el Valle de Aburrá, definir mejor las cantidades de N aplicado al suelo con base en análisis de suelos y en las necesidades reales de los cultivos. Establecer recomendaciones apropiadas para el uso de N, definiendo cuáles son las fuentes y su velocidad de liberación; y definir políticas de acompañamiento al productor más efectivas y eficientes.

Aunque solo el 6% de las emisiones es producto del cambio en el uso del suelo por avance de la frontera agrícola, es un hecho que se debe resaltar pues esto implica la tala de bosque natural y plantado, pérdida de rastrojos altos y bajos. Esto implica la reducción en la captura de CO<sub>2</sub> proveniente no solo de la producción agrícola por perturbación del suelo, empleo de cal y urea, sino por los demás sectores como las fuentes móviles y la industria. Además implica la pérdida de los servicios ecosistémicos que los bosques proveen, tales

como biodiversidad, protección de las fuentes hídricas, reducción de la erosión, calidad paisajística, entre otros.

La imposibilidad de obtener información estadística de fuentes como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en relación a la venta de fertilizantes en el Valle de Aburrá, fuente de información recomendada por el IPCC para los inventarios de GEI para TIER 1, también fue uno de los inconvenientes más destacados en este estudio, por lo que fue necesario obtener información de otras fuentes, que pueden no ser representativas. Tampoco existen estudios sobre el comportamiento del sector agrícola en la región que permitan obtener factores de emisión asociados a la fertilización en la zona de estudio.

Es necesario mejorar la calidad y la exhaustividad en la estimación de las emisiones de GEI para reducir la incertidumbre. Realizar un inventario siguiendo una aproximación TIER 2, permitirá tener una mejor aproximación a las emisiones o absorciones reales, por lo que se hace necesario realizar investigación de campo que permita tener información de fuentes directas y tener acceso a datos más confiables, con mayor aplicabilidad a las condiciones locales.

Conocer más a fondo las formas de producción agrícolas para poder intervenirlas e identificar medidas apropiadas de mitigación y adaptación del cambio climático es una tarea importante y una asignatura pendiente en el Valle de Aburrá y el departamento de Antioquia. En la medida en que se conozca cómo los productores desempeñan su labor podrá definirse con mayor certeza cuántas emisiones y/o absorciones de gases de efecto invernadero se generan y cuáles son las aproximaciones más adecuadas para reducirlas sin afectar la productividad agrícola. Adicionalmente, las políticas públicas definidas para la solución de la problemática ambiental y en especial las medidas destinadas a la mitigación y adaptación al cambio climático, deberán basarse en las particularidades de cada región.

## A. Anexo: Factores de emisión empleados

	Factor de emisión	Unidad	Valor	Referencia
Biomasa	Tasa de acumulación de biomasa (G)	ton C/ha/año	2.6	IPCC, 2006. Cuadro 5.1
	Pérdida de carbono de la biomasa (L)	ton C/ ha/año	21	IPCC, 2006. Cuadro 5.1
	Biomasa aérea cultivos permanentes	ton / ha	70.5	IPCC, 2006. Cuadro 5.2
	Biomasa aérea cultivos transitorios	ton / ha	10	IPCC, 2006
	Ciclo Cosecha/Madurez	año	8	IPCC, 2006. Cuadro 5.1
	Existencias de carbono en la biomasa después de un año ( $\Delta$ CG) Cultivo anual	ton C /ha	5	IPCC, 2006. Cuadro 5.9
	Existencias de carbono en la biomasa después de un año ( $\Delta$ CG) Cultivo perenne	ton C /ha	2.6	IPCC, 2006. Cuadro 5.9
Carbono en el suelo	Uso de la tierra (FLU)	Adimensional	1	IPCC, 2006. Cuadro 5.5
	Laboreo (FMG)	Adimensional	1.09	IPCC, 2006. Cuadro 5.5
	Entrada (FI)	Adimensional	1	IPCC, 2006. Cuadro 5.5
Emisiones N <sub>2</sub> O	EF1 (aportes de N de fertilizantes sintéticos y orgánicos, residuos agrícolas y N mineralizado)	kg N <sub>2</sub> O-N /kg N	0.01	IPCC, 2006. Cuadro 11.1
	EF3 PRP (N depositado en suelos por vacunos en pastoreo)	kg N <sub>2</sub> O-N /kg N	0.02	IPCC, 2006. Cuadro 11.1
	EF4 (volatilización y re-deposición de N)	kg N <sub>2</sub> O-N / (kg NH <sub>3</sub> -N + NO <sub>x</sub> -N volatilizado)	0.01	IPCC, 2006. Cuadro 11.3
	EF5 (lixiviación y escurrimiento)	kg N <sub>2</sub> O-N / (kg N lixiviación/escurrimiento)	0.0075	IPCC, 2006. Cuadro 11.3
	FracGASF (Volatilización de fertilizante sintético)	(kg NH <sub>3</sub> -N + NO <sub>x</sub> -N) / (kg N aplicado)	0.1	IPCC, 2006. Cuadro 11.3
	FracGASM (Volatilización fertilizantes orgánicos, excretas y orina de animales en pastoreo)	(kg NH <sub>3</sub> -N + NO <sub>x</sub> -N) / (kg N aplicado o depositado)	0.2	IPCC, 2006. Cuadro 11.3
	FracLIXIVIACIÓN-(H) (perdidas de N por lixiviación y escurrimiento)	kg N	0.3	IPCC, 2006. Cuadro 11.3
Cal	FE cal dolomita	Adimensional	0.13	IPCC, 2006
Urea	FE urea	Adimensional	0.2	IPCC, 2006



## **B. Anexo: Resumen hojas de cálculo**

## Resumen hojas de cálculo año 2009

Category	Annual change in carbon stocks in biomass	Annual change in carbon stocks in biomass	Annual change in carbon stocks in mineral soils	Annual change in carbon stocks in mineral soils	Annual change in carbon stocks in dead wood/litter	Annual change in carbon stocks in dead wood/litter	<b>Total</b>
	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )	
Cropland Remaining Cropland	0	0	13.21	-0.05	0	0.00	-0.05
Land Converted to Cropland	-2426.25	8.9	1452.61	-5.33	-167.019	0.61	4.2

Category	Annual C emissions from liming	Annual C emissions from liming
	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )
Liming	504.70718	<b>1.85</b>
Urea Fertilization	961.70130	<b>3.53</b>

Direct N <sub>2</sub> O Emissions from Managed Soils	Category	Annual direct N <sub>2</sub> O-N emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct CO <sub>2</sub> emissions produced from managed soils
		(kg N <sub>2</sub> O-N yr <sup>-1</sup> )	(kg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> eq yr <sup>-1</sup> )
	Anthropogenic N input to estimate annual direct N <sub>2</sub> O-N emissions produced from managed soils	40824.55724	64152.87566	0.064	19.88739
	Urine and dung inputs to grazed soils	28763.1496	45199.23509	0.045	14.01176

Indirect N <sub>2</sub> O Emissions from Managed Soils	Category	Annual direct N <sub>2</sub> O-N emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct CO <sub>2</sub> emissions produced from managed soils
		(kg N <sub>2</sub> O-N yr <sup>-1</sup> )	(kg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> eq yr <sup>-1</sup> )
	Anthropogenic N input	16863.08608	26499.13526	0.026	8.21473
	Urine and dung inputs to grazed soils	23606.96653	37096.66169	0.037	11.49997

## Resumen hojas de cálculo 2011

Category	Annual change in carbon stocks in biomass	Annual change in carbon stocks in biomass	Annual change in carbon stocks in mineral soils	Annual change in carbon stocks in mineral soils	Annual change in carbon stocks in dead wood/litter	Annual change in carbon stocks in dead wood/litter	Total
	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )	
Cropland Remaining Cropland	0	0	13.21	-0.05	0	0.00	-0.05
Land Converted to Cropland	-2426.25	8.9	1452.61	-5.33	-167.019	0.61	4.2

Category	Annual C emissions from liming	Annual C emissions from liming
	(tonnes C yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> )
Liming	513.87050	1.88
Urea Fertilization	855.80000	3.14

Direct N <sub>2</sub> O Emissions from Managed Soils	Category	Annual direct N <sub>2</sub> O-N emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct CO <sub>2</sub> emissions produced from managed soils
		(kg N <sub>2</sub> O-N yr <sup>-1</sup> )	(kg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> eq yr <sup>-1</sup> )
	Anthropogenic N input to estimate annual direct N <sub>2</sub> O-N emissions produced from managed soils	38901.95754	61131.64756	0.061	18.95081
	Urine and dung inputs to grazed soils	27558.49569	43306.20752	0.043	13.42492

Indirect N <sub>2</sub> O Emissions from Managed Soils	Category	Annual direct N <sub>2</sub> O-N emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct N <sub>2</sub> O emissions produced from managed soils	Annual direct CO <sub>2</sub> emissions produced from managed soils
		(kg N <sub>2</sub> O-N yr <sup>-1</sup> )	(kg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg N <sub>2</sub> O yr <sup>-1</sup> )	(Gg CO <sub>2</sub> eq yr <sup>-1</sup> )
	Anthropogenic N input	21579.29922	33910.32735	0.034	10.51220
	Urine and dung inputs to grazed soils	28685.71567	45077.55319	0.045	13.97404

## Bibliografía

- Alcaldía de Medellín y Universidad Nacional de Colombia. (2009). *Coberturas vegetales, uso actual del suelo y determinación de conflictos de uso del suelo con base en el POT de la zona rural del municipio de Medellín*. Medellín.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá. (2007). *Plan de Desarrollo Metropolitano. METROPOLI 2008-2020. Hacia la integración regional sostenible*. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2010). *Atlas Area Metropolitana del Valle de Aburrá*. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2012). *Plan de Gestión Pura Vida 2012-2015*. Medellín.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad Nacional de Colombia y Universidad Pontificia Bolivariana. (2013). *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Valle de Aburrá, años 2009 y 2011. Documento general*. Sin publicar, Medellín.
- Asociación Internacional de la industria de los fertilizantes (IFA), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2004). *Estimaciones globales de emisiones gaseosas de NH<sub>3</sub>, NO y N<sub>2</sub>O provenientes de tierras agrícolas*. Roma.
- Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. (22 de Abril de 1992). IFA. Recuperado el 25 de Octubre de 2013, de <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/LIBRARY/Our-selection2/World-Fertilizer-Use-Manual/by-type-of-crops>
- Bonilla, N. (2009). *Cultivo de maíz*. San José.
- Caballero, M., & Lozano, S. y. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria Volumen 8, Número 10*, 2-12.
- Castellanos, P. (1999). *Manejo integrado del cultivo de cebolla de rama Allium fistulosum L. para el departamento de Risaralda*. Pereira: Universidad de Caldas.

- CENICAFE. (2012). Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafe*(424), 1-8.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2008). Fertilización del cultivo de la yuca.
- Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). (Sin fecha). *Guía técnica cultivo de tomate*. El Salvador.
- Comisión Tripartita. (2012). *Lineamientos de ordenación territorial para Antioquia (LOTA) Fase II*. Medellín.
- CORPOICA. (1986). *Proyecto de transferencia de tecnología sobre el cultivo de la mora*.
- CORPOICA. (2006). *El cultivo de tomate bajo invernadero*. Rionegro, Antioquia: CORPOICA.
- CORPOICA. (2006). *Manejo sostenible del cultivo del Plátano*. Bucaramanga: CORPOICA.
- CORPOICA. (2008). *Tecnología para el cultivo del Aguacate*. Rionegro, Antioquia: CORPOICA.
- CORPOICA y SENA. (s.f.). *Curso de actualización en el cultivo de la Piña*. CORPOICA.
- DANE. (2007). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de Censo 2005: [www.dane.gov.co/censo/](http://www.dane.gov.co/censo/)
- Departamento administrativo de Planeación. (01 de Abril de 2014). *Gobernación de Antioquia*. Obtenido de [www.antioquia.gov.co](http://www.antioquia.gov.co)
- Echeverri, C. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revis ta Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 85-96.
- EPA - United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *EPA*. Recuperado el 10 de Febrero de 2014, de [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- FAO y CORPOICA. (2007). *Buenas prácticas en la producción de frijol voluble*. Medellín.
- Flynn, H., Smith, J., Smith, K., Wright, J., Smith, P., & Massheder, J. (2005). Climate- and crop-responsive emission factors significantly alter estimates of current and future nitrous oxide emissions from fertilizer use. *Global Change Biology*, 11(9), 1522-1536.
- Gobernación de Antioquia. (2010). Anuario Estadístico de Antioquia, 2009 [Recurso electrónico]. Medellín, Antioquia, Colombia.

- Gobernación de Antioquia. (2012). Anuario Estadístico de Antioquia, 2011 [Recurso electrónico]. Medellín, Antioquia, Colombia: Departamento Administrativo de Planeación.
- Hernández, J. (2009). *Cultivo de frijol*. San José.
- IDEAM. (2004). *Cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Recuperado el 22 de 06 de 2013, de <http://www.cambioclimatico.gov.co>
- IDEAM. (2007). *Información técnica sobre el cambio climático y los gases de efecto invernadero*. Bogotá.
- IDEAM. (2009). *Segunda comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2009). *Segunda comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá D.C.
- International Plant Nutrition Institute (IPNI). (2003). *Manual de nutrición y fertilización de pastos*. Quito.
- IPCC. (2000). *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse inventories*. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanul S., Buendía L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., and Tanabe K., (eds). Japan: Published: IGES.
- IPCC. (2004). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) Introducción*. Ginebra.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Japón: IGES.
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II, y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change*. Cambridge: IPCC.
- IPCC. (2013). *Cambio Climático Bases Físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Resumen para responsables de políticas*. Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

- IPCC. (31 de Marzo de 2014). Informe del IPCC: El cambio climático produce riesgos generalizados, pero es posible oponer respuestas efectivas. Un calentamiento elevado del clima dificultará las respuestas. Yokohama, Japón. Recuperado el 27 de Abril de 2014, de [https://www.ipcc.ch/pdf/ar5/pr\\_wg2/140331\\_pr\\_wgII\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/ar5/pr_wg2/140331_pr_wgII_es.pdf)
- Milne, A., Glendining, M., Bellamy, P., Misselbrook, T., Gilhespy, S., Rivas, M., . . . Whitmore, A. (2014). Analysis of uncertainties in the estimates of nitrous oxide and methane emissions in the UK's greenhouse gas inventory for agriculture. *Atmospheric Environment*, 94 - 105.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. (Febrero de 2007). Resolución Número 0187. Bogotá.
- Molina, E. (2000). Nutrición y fertilización de la naranja. *Informaciones agronómicas*, 5-11.
- Molina, E., Salas, R., & Castro, A. (1993). Growth curve and nutrients absorption in strawberries (*Fragaria x ananassa* cv. Chandler). *Agronomia Costarricense*, 17, 67-73.
- Monómeros Colombovenezolanos S.A. (1998). *Fertilización de cultivos de clima frío*. Bogotá: Saenz y Cia Ltda.
- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Nuez, F. G. (2003). *El cultivo de pimientos, chiles y ajíes*. Madrid.
- Popp, A., Lotze-Campen, H., & Bodirsky, B. (2010). Food consumption, diet shifts and associated non-CO2 greenhouse gases from agricultural production. *Global Environmental Change*(20), 451-462.
- Pulido, A. (2012). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para la región Cundinamarca-Bogotá*. Bogotá.
- Ramírez, F. (2012). En Antioquia Fertilización a la carta. *Revista PAPA, Federación Colombiana de Productores de papa*. No. 20, 26-29.
- Seminario Consorcio Lechero. (s.f.). *Consorcio Lechero La Cadena láctea de Chile*. Recuperado el 29 de Julio de 2013, de <http://www.consorciolechero.cl/chile/docs/brassicas-forrajeras.pdf>

- Sierra, C., del Valle, J., Orrego, S., Moreno, F., Harmon, M., Zapata, M., . . . Benjumea, J. (2007). Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management*, 243, 299–309.
- SIMAP. (2007-2012). *Sistema metropolitano de áreas protegidas y el proyecto de cinturón verde*.
- Stehfest, E., & Bouwman, L. (2006). N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(3), 207-228.
- Tubiello, F., Salvatore, M., Córdor, R., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., . . . Flammini, A. (2014). Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. 1990 – 2011 Analysis. *FAO Statistics Division. Working Paper Series ESS/14-02*.
- Universidad nacional de Colombia. (2010). *Determinación de los requerimientos hídricos del cilantro*. Palmira.
- Universidad técnica del Norte. (2011). Efecto de la aplicación de silicio en el segundo año de producción en el cultivo del tomate de árbol. Ecuador.
- Van Der Hoek, K., Van Schijndel, M., & Kuikman, P. (2007). *Direct and indirect nitrous oxide emissions from agricultural soils, 1990 - 2003. Background document on the calculation method*. Netherlands: RIVM.
- WMO, UNEP, IPCC, SPIRIT. (08 de 10 de 2013). IPCC Inventory Software Versión 2.11.5029.17605. *2006 IPCC Guidelines*. Tokyo, Japan.