



**ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DIFUSORAS DE GASES EFECTO  
INVERNADERO EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS COLOMBIANAS: DIÓXIDO  
DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) Y METANO (CH<sub>4</sub>)**

**HAROLD DAVID CUADROS TEJEDA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)  
ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE (ECAPMA)  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
PALMIRA, COLOMBIA**

**2017**

**ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DIFUSORAS DE GASES EFECTO  
INVERNADERO EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS COLOMBIANAS: DIÓXIDO  
DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) Y METANO (CH<sub>4</sub>)**

**HAROLD DAVID CUADROS TEJEDA**

**CÓDIGO: 1115065283**

Proyecto aplicado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Ambiental**

Asesora

**YOHEN CUELLAR ALVAREZ**

**Ingeniera Química, Magíster en Ingeniería Ambiental**

Línea de Investigación:

**Evaluación de impactos ambientales y sostenibilidad ambiental**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)  
ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE (ECAPMA)  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
PALMIRA, COLOMBIA**

**2017**

*(Dedicatoria)*

*A mi papá José Uriel por ser el principal ejemplo en mi vida, que gracias a su fortaleza me brindo toda la fuerza para llevar a cabo mi carrera y este proyecto; a mi esposa Diana carolina por siempre estar a mi lado brindándome todo su amor y comprensión, dándome el regalo más maravilloso: nuestra hija “Gabriela”.*

*¡Gracias a ustedes!*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser el hacedor y dueño de todas mis cosas.

A la universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por darme la oportunidad de estudiar este prestigioso pregrado, especialmente a la escuela ECAPMA.

A mi asesora Yohen Cuellar, quien ha sido parte importante de este proceso, brindando sus conocimientos y experiencia.

A mis padres, hermanos, esposa e hija que me brindaron todo su apoyo y que participaron directa o indirectamente en la elaboración de este proyecto.

## RESUMEN

Teniendo en cuenta los diferentes estudios desarrollados principalmente en América del Sur sobre emisiones atmosféricas producidas por reservorios, se determina que las centrales hidroeléctricas emiten gases efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (de Lucena, Schaeffer, & Szklo, 2010; Demarty & Bastien, 2011; Rocha Lessa, dos Santos, Lewis Maddock, & Santos Bezerra, 2015; Soito & Freitas, 2011; Weisser, 2007; Yang *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015), que tienen incidencia sobre el calentamiento global y el cambio climático. De este modo, por medio de la metodología aportada por el panel intergubernamental para el cambio climático sobre la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas IPCC(2006), se estimaron las emisiones difusoras de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) producidas por los principales embalses de las centrales hidroeléctricas en Colombia, generando valores de emisión, comparando las emisiones calculadas entre las hidroeléctricas del país y con otros modos de generación eléctrica en Colombia.

Las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> calculadas con la metodología propuesta por el IPCC se estimaron en 773 Gg CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup> y de 10,78 Gg CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>, lo que equivale a una emisión total de 1.042,5 Gg CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup> (1.042.500 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>), que representa el 4,4 % del total de emisiones generadas por el sector eléctrico colombiano (23.458.556,28 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>); confirmando que los embalses hidroeléctricos estudiados generan emisiones GEI que no se están teniendo en cuenta dentro de los inventarios nacionales de emisiones atmosféricas y aunque no

son relevantes al compáralos con otras fuentes generadoras de energía en el país, están contribuyendo al calentamiento global.

En Colombia se recomienda la elaboración y ejecución de un modelo que cuantifique las emisiones de cualquier embalse para conocer el estado real de las emisiones de GEI por parte de los reservorios existentes, estableciendo medidas de mitigación adecuadas para reducir sus aportes al calentamiento global.

**Palabras clave:** Gases de efecto invernadero, factor de emisión, embalse hidroeléctrico, calentamiento global, emisiones difusoras, dióxido de carbono, metano.

## ABSTRACT

Having into account the different studies principally developed in South America about atmospheric emissions produced by reservoirs, which has determined that the hydroelectric power plants emits greenhouse effect gasses (GHG) to the atmosphere (from Lucena, Schaeffer, and Szklo, 2010; demarty and bastion, 2011; Rocha Lessa, dos santos, Lewis Maddock, and Santos Bezerra, 2015; Soito and Freitas, 2011; Weisser, 2007; Yang et al., 2014; Zhang et al., 2015), which has incidence over the global warming and the climatic change. In this way, by the methodology contributed by the intergovernmental panel for the climatic change over the estimations of emission of greenhouse gas effect coming from permanent drowned lands IPCC(2006), it is estimated that the diffusers emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and Methane (CH<sub>4</sub>) produce by the main reservoir of the hydroelectric power plants in Colombia, generating emission values, comparing the emissions calculated between the hydroelectric power plants of the country and by other methods of electric generation in Colombia .

The diffusives emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, calculated with the methodology proposed by the IPCC, they estimated around 773 Gg CO<sub>2</sub> and 10,78 Gg CH<sub>4</sub> per year, in this way, this is equivalente a total emission of 1.042,5 Gg CO<sub>2</sub> (1.042.500 t CO<sub>2Eq</sub> per year), which represents the 4.4 % the total of the emission generated by the Colombian electric sector (23.458.556,28 t CO<sub>2Eq</sub> per year); confirming that all the hydroelectric reservoir studied are generating GEI emissions not having into account the fact that they are inside of the national inventories of atmospheric emissions and even if they are not relevant in comparison with another energy producers in the country which are contributing to the global warming.

In Colombia is recommended the elaboration and execution of a model that quantifies the emission of any type of reservoir to know the real conditions of the GEI emissions of them, establishing the right mitigation measurements to reduce their contribution to global warming.

**Keywords:** Greenhouse gasses, Missioning factor, hydroelectric reservoir, global warming, diffusing emission, Carbonic dioxide, methane.



## CONTENIDO

RESUMEN .....	V
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS .....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	XII
1. INTRODUCCION .....	XIII
2. OBJETIVOS .....	5
2.1 Objetivo General.....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
3. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1 Gases efecto invernadero (GEI) y embalses. ....	6
3.2 Tipos de emisión en embalses.....	9
3.3 Estudios en América Latina. ....	11
3.4 Situación Energética en Colombia. ....	12
4. METODOLOGÍA .....	20
5. RESULTADOS.....	26
5.1 Muestra de cálculo central hidroeléctrica San Carlos. ....	26
5.1.1 Estimación emisiones difusoras de CO <sub>2</sub> .....	27
5.1.2 Estimación emisiones difusoras de CH <sub>4</sub> . ....	28
5.2 Estimación de las emisiones difusoras en centrales hídricas colombianas. ....	29
5.3 Comparación de emisiones difusoras entre centrales hídricas colombianas.....	30
5.4 Comparación de emisiones difusoras provenientes de centrales hidroeléctricas con otros modos de generación existentes en Colombia.....	32
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	35
7. CONCLUSIONES .....	38
8. BIBLIOGRAFIA .....	41
ANEXOS .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático..	7
Figura 2: Emisiones de GEI en embalses .....	10
Figura 3: Tasa de crecimiento anual y proyección de demanda energética.....	13
Figura 4: Crecimiento anual demanda de energía eléctrica (SIN 1T14) vs PIB, población y temperatura .....	14
Figura 5: Distribución de energía en Colombia.....	15
Figura 6: Histórico mensual de generación por tecnología (GWh) .....	18
Figura 7: Esquema metodológico para calculo y análisis de emisiones difusoras de GEI por embalses hidroeléctricos .....	25
Figura 8: Emisiones difusoras de CO <sub>2</sub> Eq por central hidroeléctrica (Gg año <sup>-1</sup> ).....	31
Figura 9: Comparación FE embalses y sector eléctrico.....	34
Figura 10: Emisiones difusoras de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> (Gg año <sup>-1</sup> ).....	35
Figura 11: Comparación emisiones GEI, embalses y sector eléctrico.....	36

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Generación mensual por tipo de central .....	12
Tabla 2: Capacidad instalada por tecnología.. .....	16
Tabla 3: Capacidad instalada en cada región por tipo de recurso (MW).. .....	16
Tabla 4: Caracterización centrales hidroeléctricas colombianas. ....	19
Tabla 5: Emisiones medidas de CO <sub>2</sub> provenientes de tierras inundadas .....	21
Tabla 6: Emisiones medidas de CH <sub>4</sub> provenientes de tierras inundadas .....	23
Tabla 7: Datos generales embalse Punchiná – San Carlos. ....	26
Tabla 8: Emisiones difusoras de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> .....	29
Tabla 9: Comparación emisiones difusoras CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> .....	30
Tabla 10: Emisiones CO <sub>2</sub> -Eq GEI generación eléctrica por tipo de planta.....	32
Tabla 11: Emisiones GEI embalses hídricos y sector energético. ....	33

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

### Símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	m <sup>2</sup>
V	Volumen	m <sup>3</sup>
W	Vatio “o” Watt	J/s
Gg	Gigagramo	10 <sup>9</sup> g
t	Tonelada	10 <sup>6</sup> g

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
GEI	Gases de efecto invernadero
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub> Eq	Dióxido de carbono equivalente
MO	Materia orgánica
FE	Factor de emisión
SIN	Sistema interconectado nacional

## 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como finalidad determinar la incidencia en el calentamiento global de los embalses de centrales hidroeléctricas en Colombia, principalmente las emisiones difusoras de Gases Efecto Invernadero (GEI) que esta tecnología genera, haciendo énfasis en la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>).

Weo (citado por Paucar, 2014) refiere al interés manifestado por las tecnologías limpias en los últimos años, las centrales hidroeléctricas se han mantenido en todo el mundo como la energía renovable más utilizada, suministrando aproximadamente el 20% de la electricidad generada a nivel mundial; en los países en vía de desarrollo este porcentaje se encuentra cercano al 33% de la energía eléctrica producida, donde se considera como una fuente de energía en apogeo por ser la fuente energética comercial renovable más económica e importante, estos porcentajes demuestran un incremento en la globalización de la energía hidráulica enfocándose principalmente en países en vías de desarrollo. A nivel mundial el 90% de las energías renovables utilizadas corresponde a las generadas por las centrales hidroeléctricas y según estudios realizados por la UNESCO y la Agencia Internacional de Energía (IEA), la producción de energía hidráulica mundial creció un 65% hasta el años 2010 manifestándose principalmente en países Latinoamericanos, Africanos y Asiáticos, con un ritmo anual 1,7%, proyectando un incremento global del 60% al llegar al año 2030 (citado por Paucar, 2014).

En Colombia actualmente se estima un crecimiento a futuro de la demanda eléctrica entre 3,9% y 4,4%, por tal motivo la Unidad de planeación minero energética (UPME) adelanta el

desarrollo de nuevos proyectos en los próximos ocho años para la puesta en marcha de nuevas centrales hídricas, entre ellos el proyecto Ituango, considerado el más importante para la generación hidroeléctrica en Colombia, entraría en operación aproximadamente para el año 2018-19, con el fin de suplir la demanda eléctrica garantizando un servicio confiable que se ajuste al escenario de crecimiento de la demanda eléctrica.

El aumento de la contaminación atmosférica debido a las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a la atmósfera producidas por los embalses de las centrales hidroeléctricas colombianas, contribuyen al calentamiento global y al cambio climático, pese a que esta es considerada una energía limpia. En este aspecto en Colombia existe desconocimiento sobre sus factores de emisión, ya que se encuentran pocos estudios a nivel mundial, justificado en que la energía hidráulica es una fuente de energía renovable y que por ende no debe generar este tipo de contaminación.

León, Guerin, Melo, & Loaiza (2014) consideran que la implementación y ejecución de centrales hidroeléctricas suponen un relevante cambio en el uso del suelo por medio de sus actividades antrópicas, modificando la interacción natural de estos ecosistemas fluviales y terrestres, al convertirlos en ecosistemas acuáticos lacustres; los cuales son capaces de emitir gases efecto invernadero (GEI), que en comparación con las energías térmicas la hidroenergía puede dejar de considerarse como energía limpia desde el punto de vista de las emisiones atmosféricas que puede presentar.

Como en Colombia existen pocos datos específicos sobre este tema y el crecimiento de las centrales hidroeléctricas en el país avanza con forme a los requerimientos energéticos; se hace fundamental un estudio sobre los factores de emisión generados por los embalses de la centrales hidroeléctricas, la incidencia de estos en los gases efecto invernadero (GEI) con respecto a la temperatura, geografía, clima, calidad del agua y características del lugar; para así poder comprender la dinámica de estos cuerpos de agua y aportar información a la base de datos desarrollada por diversos organismos internacionales como por ejemplo Cuenca Amazónica (Brasil y Guayana Francesa), los cuales aúnan esfuerzos para tener información precisa sobre la cuantificación de emisiones de GEI a la atmósfera por parte de embalses, principalmente tropicales.

Loaiza (2016) realiza un estudio sobre la cuantificación de GEI generados por embalses tropicales, específicamente en la hidroeléctrica de Calima – Valle del Cauca, aportando información que permite conocer el comportamiento y la cuantificación más precisa de la injerencia de los embalses en un medio tropical.

Para determinar las emisiones difusoras de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) en los reservorios colombianos analizados se optó por utilizar el método del panel intergubernamental para el cambio climático propuesto por el IPCC(2006), apéndice 2, Nivel 2: Enfoque posible para estimar las emisiones de  $\text{CO}_2$  provenientes de las tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas; para determinar las emisiones difusoras de Metano ( $\text{CH}_4$ ) en los reservorios se optó por utilizar el método del panel intergubernamental para el cambio climático propuesto por el

(IPCC, 2006.), apéndice 3, Nivel 1: Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de tierras inundadas: Base para su futuro desarrollo metodológico.

La aplicación del modelo de Desarrollo Sostenible sobre la construcción de embalses en zonas tropicales permitirá predecir y cuantificar las emisiones de GEI por parte de estos antes de llevarse a cabo el proceso de llenado, para poder estudiar las diferentes alternativas sobre las fuentes energéticas en el sector; generando a largo plazo sistemas regionales que permitan la elaboración de inventarios de GEI a la atmósfera, estos sistemas solo serán posible cuando se tenga información documentada del comportamiento de estos ecosistemas acuáticos lacustres.

En este sentido, la presente investigación busca comprender la dinámica de estos cuerpos de agua, con el objetivo de establecer una estimación de las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> provenientes de estos ecosistemas, lo cual sea útil para establecer medidas de mitigación en embalses hidroeléctricos tropicales.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Estimar las emisiones difusoras de gases de efecto invernadero producidos por los embalses de las centrales hidroeléctricas de Colombia.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Calcular el valor de las emisiones difusoras de gases de efecto invernadero, provenientes de la generación hidroeléctrica en Colombia.
- Comparar las emisiones calculadas entre centrales hidroeléctricas de Colombia.
- Comparar las emisiones de la generación de energía hidroeléctrica con otros modos de generación existentes en Colombia.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Gases efecto invernadero (GEI) y embalses.

Palau, Alonso, & Corregidor (2010) afirman que:

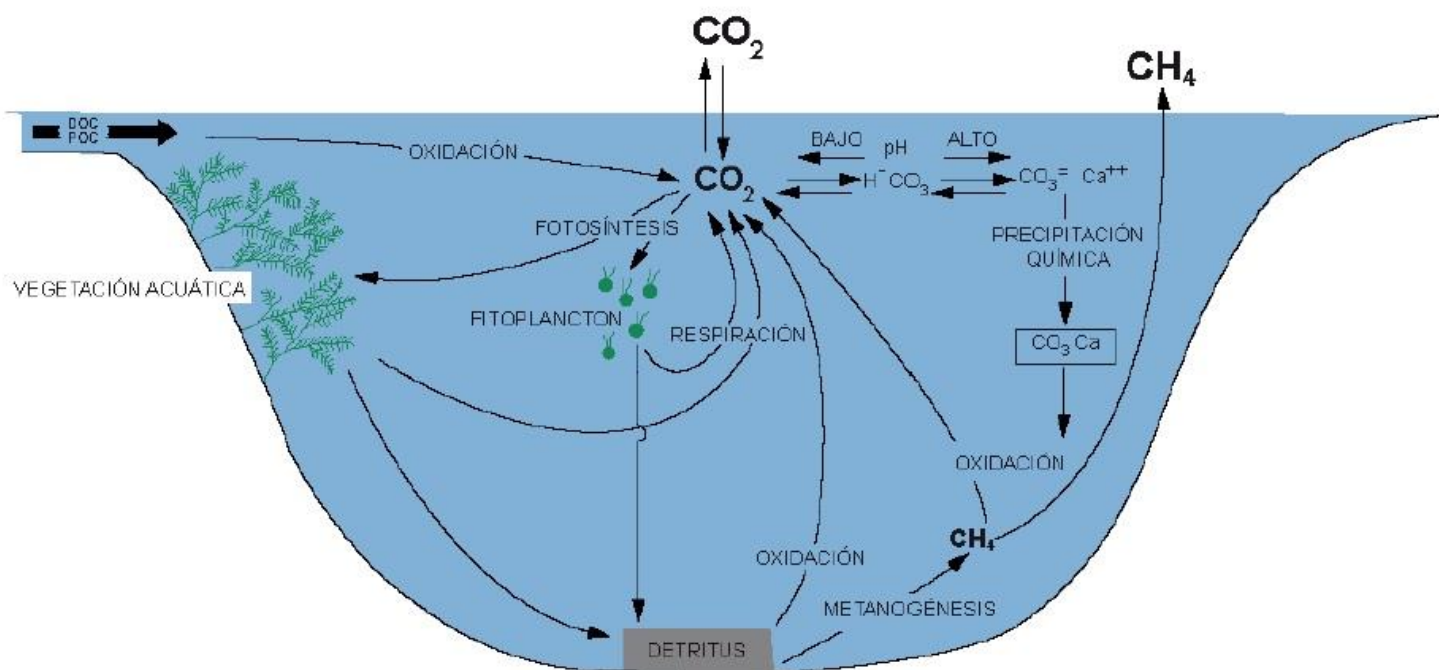
La posible contribución de los embalses al cambio climático viene a través de sus emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), que junto con los compuestos que forman parte del sistema carbónico-carbonatos ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) son las formas químicas inorgánicas más importantes del carbono en los ecosistemas acuáticos. (p.2)

Esto quiere decir que el flujo normal de los gases efecto invernadero (GEI) en la biósfera son altamente modificados, por ejemplo, la absorción del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por parte de la vegetación se suspende debido a la deforestación e inundación de terrenos de cobertura vegetal para la adecuación del embalse; la materia orgánica (M.O) acumulada en el fondo de los embalses por el ahogamiento del suelo sufre nuevas dinámicas en cuanto a las reacciones químicas, como lo es la desmineralización anaerobia, siendo una fuente emisora de GEI a la atmósfera (figura 1); los embalses también actúan como barreras capturando la M.O que arrastran los ríos que le surte generando una mayor acumulación en el fondo de los reservorios (León et al., 2014). Esto significa que “el metano ( $\text{CH}_4$ ) que se produce en embalses se origina por la descomposición de la vegetación acumulada al fondo de estos, en especial en zonas tropicales debido a las características climáticas” (Paucar, 2014, p.14). Estas emisiones atmosféricas de  $\text{CH}_4$  “representan alrededor de 1,6 % de emisiones GEI a escala mundial, siendo el  $\text{CH}_4$  un gas que contamina hasta 21 veces más que el  $\text{CO}_2$ ” IPCC (citado por Paucar, 2014, p.14).

León et al. (2014) refieren que los embalses contribuyen a escala global con aproximadamente entre 4% y 12% de las emisiones antrópicas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  sustancialmente, donde un promedio del 90% de metano es producido en la región trópica del planeta. Para Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., & Sokona (2011) las emisiones de GEI en embalses son probablemente insignificantes cuando se consideran las emisiones netas generadas en estos sistemas, lo cual genera una gran diferencia de conceptos; pero la discusión no debe centrarse en la comparación de emisiones entre embalses y cuerpos de agua naturales, sino, en determinar cuál es el cambio antes y después del embalse en términos de emisiones (Pareekh, 2011); ya que antes del embalse el lugar pudo haber sido un bosque natural (sumidero de gases) lo que supondría unas emisiones netas mayores después del llenado.

**Figura 1:** Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático.

Fuente: Palau et al. (2010)



Durante la primera fase después del llenado los embalses tienden a emitir mayor cantidad de gases efecto invernadero debido a su alta cantidad de materia orgánica y a la descomposición de la vegetación inundada, donde aumenta la actividad bacteriana y por ende el aumento en las emisiones atmosféricas, estas emisiones tienden a disminuir durante el proceso de envejecimiento del embalse, se da en altas concentraciones durante los primeros años y disminuye lentamente con el tiempo, específicamente se presenta más rápido en aguas frías que en aguas cálidas, por lo que el tiempo estimado en embalses tropicales es de aproximadamente diez (10) años, transcurrido este tiempo los embalses de estas zonas tienden a estabilizarse y las emisiones GEI tienden a disminuir (Lima, Ramos, & Bambace, 2008).

Por medio de la descomposición del carbono orgánico presente en los embalses se forma el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Las principales fuentes aportantes del carbono orgánico dentro de un embalse pueden ser la vegetación y los suelos inundados al ser llenados, la descarga continua de materia orgánica (M.O.) por parte de sus afluentes, que pueden arrastrar aguas residuales, aguas industriales, entre otras; el crecimiento de plantas costeras en tiempo de bajo nivel, el crecimiento de plancton y plantas acuáticas en el embalse. De igual forma dentro del ciclo del carbono estos pueden captar  $\text{CO}_2$  atmosférico por medio del proceso fotosintético llevado a cabo por plantas acuáticas y el plancton, lo cual, en ocasiones puede ser mayor que las emisiones de  $\text{CO}_2$  Cardó (Citado por Paucar, 2014).

Paucar (2014) sostiene que el proceso de formación del Metano ( $\text{CH}_4$ ) se genera por la descomposición de la materia orgánica y los sedimentos del fondo del embalse por parte de bacterias que los van metabolizando por vía detrítica en condiciones anaerobias, de acuerdo a

esto los embalses tropicales tienen una cantidad mínima de oxígeno en la capa más profunda del cuerpo de agua; cierta parte del  $\text{CH}_4$  generado es convertido en  $\text{CO}_2$  debido a el proceso de oxidación al subir a la superficie del embalse, las cantidades más altas de emisión en cuanto a  $\text{CH}_4$  se encuentran en embalses tropicales de menor profundidad, debido a que las burbujas tienen menos tiempo para oxidarse antes de llegar a la superficie. Lima et al. (2008) indica que gracias al aporte de  $\text{CH}_4$  generado en grandes centrales hidroeléctricas distribuidas en el mundo, se generan cerca de 2.184 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente, cifras relacionadas con los cálculos aportados por el IPCC que indican que los embalses y cuerpos de agua naturales son los responsables de un promedio del 22% en cuanto a las emisiones de  $\text{CH}_4$  a nivel mundial. Por tal motivo los embalses pueden ser considerados como la mayor fuente emisora de GEI de carácter antrópico.

### **3.2 Tipos de emisión en embalses.**

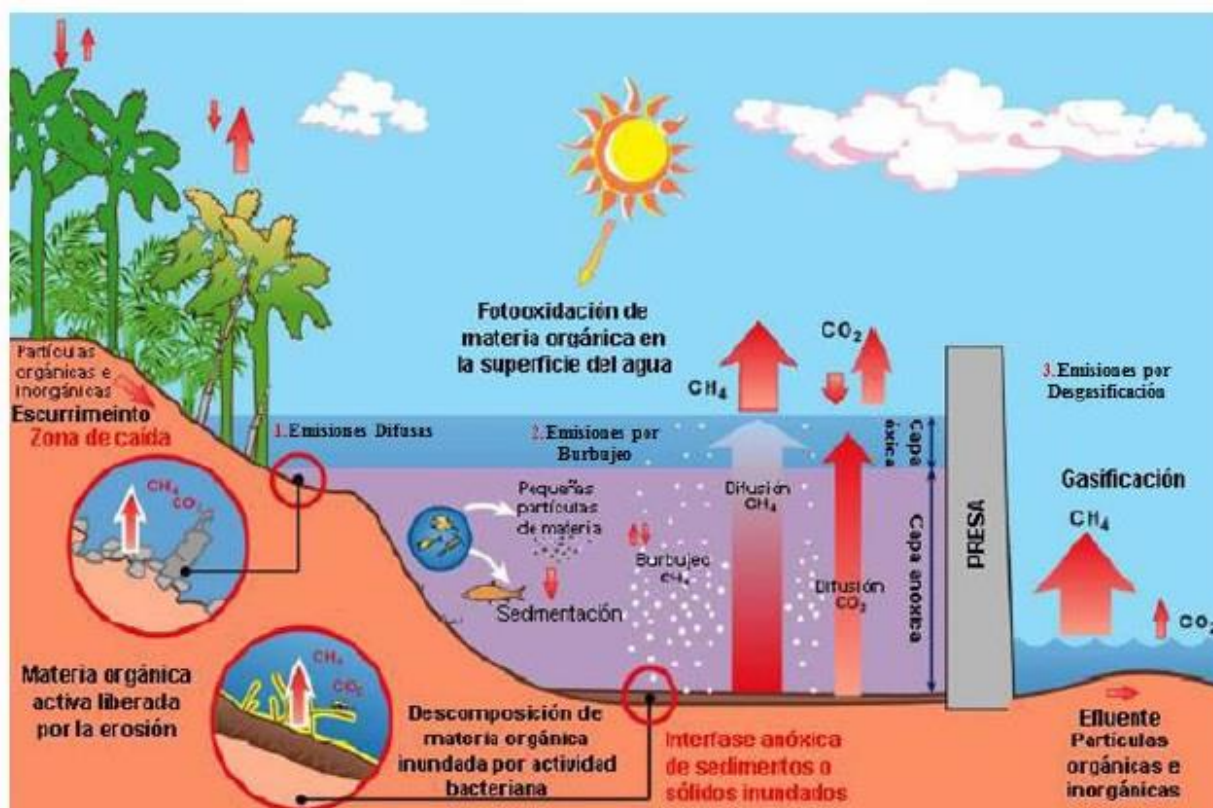
(IPCC, 2006) Las emisiones de dióxido de carbono y metano dentro de los ecosistemas acuáticos, se pueden generar de tres formas (figura 2), las cuales son:

- ❖ Emisiones difusoras: generada por la difusión molecular por medio de la interfaz agua-aire, estas emisiones se estiman por cada  $\text{m}^2$ , lo que las hace muy importantes.
- ❖ Emisiones por burbujas: son emisiones de gas generadas por la interfaz agua-sedimento, proveniente del sedimento a través de la columna de agua, por medio de burbujas. Es una vía minoritaria de emisiones de  $\text{CO}_2$ , pero importante en las emisiones de  $\text{CH}_4$ ,

principalmente en regiones templadas y tropicales y en embalses con poco tiempo de inundación.

- ❖ Emisiones de desgasificación: se presentan por el cambio repentino en la presión hidrostática de los embalses, así como de la superficie creciente de intercambio aire/agua después de que el agua de los reservorios fluye a través de una turbina y/o una vía de desagüe. En los embalses tropicales jóvenes se considera como fuente emisora de  $\text{CH}_4$  importante, estimándose en emisiones cercanas al 40% en embalses no superiores a diez años de edad, Delmas (Citado por Paucar, 2014).

**Figura 2:** Emisiones de GEI en embalses. Fuente: IPCC (Citado por Paucar, 2014)



### 3.3 Estudios en América Latina.

Las centrales hidroeléctricas pueden emitir cantidades significativas de gases de efecto invernadero, sobre todo debido a las inundaciones de la biomasa y el suelo. La cantidad de liberación de gases de efecto invernadero depende del tamaño del depósito, el tipo y cantidad de cobertura vegetal inundada, el tipo de suelo, la profundidad del agua, y el clima (Weisser, 2007).

Estudios realizados en diferentes reservorios tropicales, en las áreas amazónicas de Brasil, develan la importancia de la emisión de GEI por parte de estas centrales hídricas, principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ), el cual es precursor del cambio climático y 21 veces mayor en cuanto a su potencial de calentamiento global en comparación al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en una proyección a 100 años (Zhang et al., 2015). Actualmente en países de América del Sur se adelantan estudios sobre las emisiones GEI a la atmósfera generados por los reservorios hidroeléctricos, logrando avanzar sobre el tema y presentar los factores que afectan las emisiones de GEI en las centrales hidráulicas como son: la influencia de las turbinas y vertederos en las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ , las emisiones presentes aguas abajo en los ríos, la materia orgánica, la temperatura, la latitud geográfica, la edad de los reservorios, los valores de pH en el agua, la vegetación distribuida en la superficie del embalse, niveles de fluctuación del agua y el oxígeno disuelto en el agua; contando con parámetros de datos de los factores de emisión de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$  para países de la región como Brasil, Paraguay, Panamá, entre otros. Por tanto, Colombia debería incluir estos factores dentro de las emisiones de GEI de la generación de energía (Yang et al., 2014), utilizando la metodología internacional desarrollada por la IPCC para el cálculo de los inventarios de emisiones.

### 3.4 Situación Energética en Colombia.

Durante el mes de Octubre del 2015 el parque generador aportó al SIN (Sistema Interconectado Nacional) un total de 5703,88 GWh (Tabla 1), aumentando 265,16 GWh con relación al mes de Septiembre y en comparación al año anterior en el mismo mes el registro se incrementó en un 5,69% (UPME, 2015).

**Tabla 1:** Generación mensual por tipo de central. Fuente: UPME (2015)

<b>Tecnología</b>	<b>Generación [GWh]</b>	<b>Participación (%)</b>
<b>ACPM</b>	259,77	4.55%
<b>AGUA</b>	2906,03	50.95%
<b>COGENERACIÓN</b>	50,12	0.88%
<b>CARBON</b>	737,37	12.93%
<b>COMBUSTOLEO</b>	111,10	1.95%
<b>GAS</b>	1419,62	24.89%
<b>JET-A1</b>	0,00	0.00%
<b>MEZCLA GAS - CARBÓN</b>	0,00	0.00%
<b>QUEROSENE</b>	17,14	0.30%
<b>MENORES AGUA</b>	150,31	2.64%
<b>MENORES GAS</b>	45,76	0.80%
<b>VIENTO</b>	6,67	0.12%
<b>TOTAL</b>	5703,88	100 %

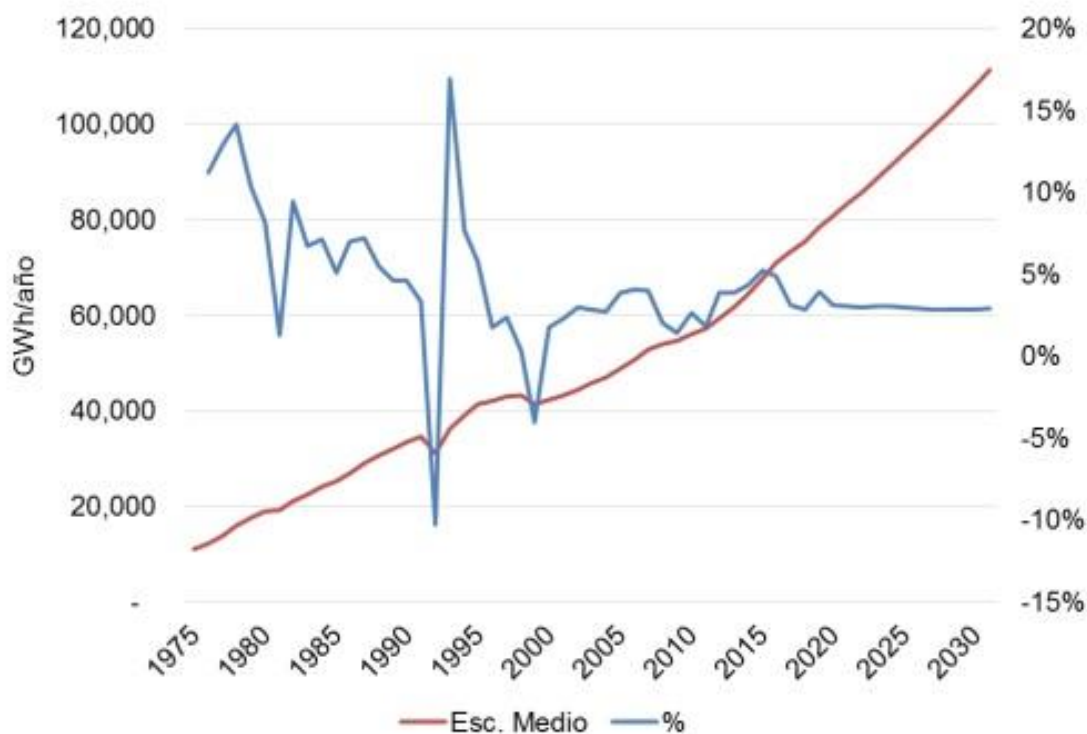
En esta tabla se puede observar que el mayor aporte al SIN es realizado por las centrales hidroeléctricas del país, con un aporte aproximado de 53,58% del total de la energía producida, incluyendo grandes plantas hidráulicas y generadores menores; es decir, 3065,33 GWh (UPME, 2015).



De acuerdo a la variable económica del país, la demanda de energía también se ve afectada, produciéndose un discontinuidad en su crecimiento (figura 3); según las proyecciones realizadas por la UPME se estima un promedio de crecimiento para el periodo 2012-2020 del 3,1% y para el periodo 2020-2030 del 2,9% Macia & Andrade (2013)

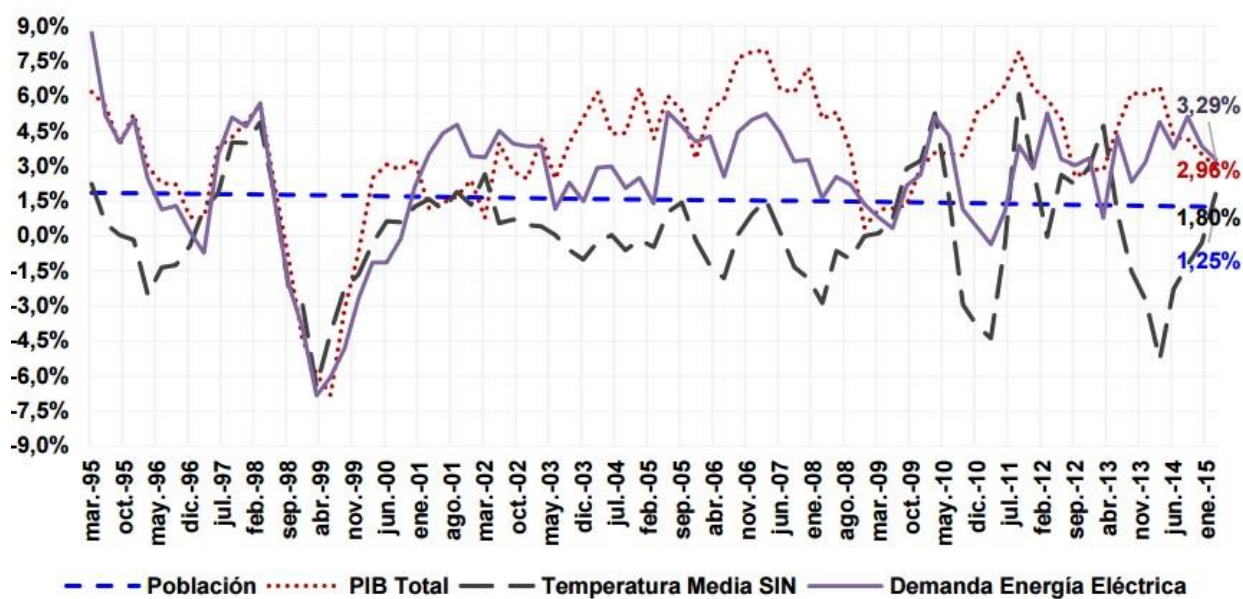
**Figura 3:** Tasa de crecimiento anual y proyección de demanda energética.

Fuente: UPME (2013)



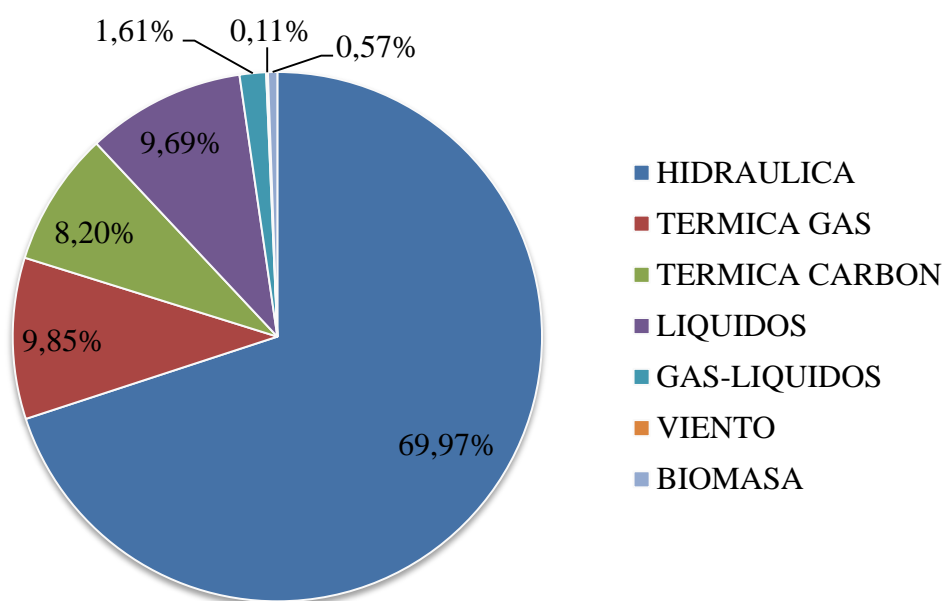
Para el periodo 2010-2014 el crecimiento anual de la demanda energética en Colombia presento un crecimiento promedio del 3,6% y un crecimiento promedio del 0,57% para la demanda de potencia máxima (Figura 4). Debido a los ciclos económicos durante el periodo 1992 a 2013 la demanda energética y de potencia máxima se han visto influenciados con una frecuencia de cada diez (10) años aproximadamente, como por ejemplo la crisis del sudeste asiático en 1998-1999 y la crisis de las hipotecas subprime en 2008-2009 UPME (2015).

**Figura 4:** Crecimiento anual demanda de energía eléctrica (SIN 1T14) vs PIB, población y temperatura. Fuente: UPME (2015).



En Colombia el 69,97% de la generación eléctrica corresponde a la energía hidráulica, el 19,66% a las energías térmicas a gas y carbón (figura 5), contándose con una capacidad instalada de aproximadamente el 16436 MW, de los cuales se calculan que 11500,5 MW corresponden a la hidroenergía (tabla 2); la región Andina es la que alberga la mayor cantidad de centrales hidroeléctricas en el país, debido a su geografía optima (clima tropical, precipitaciones de 1500 a 4000 mm al año, entre otros) que facilita la construcción y operación de embalses Macias et al. (2013).

**Figura 5:** Distribución de energía en Colombia. Fuente: (UPME, 2015).



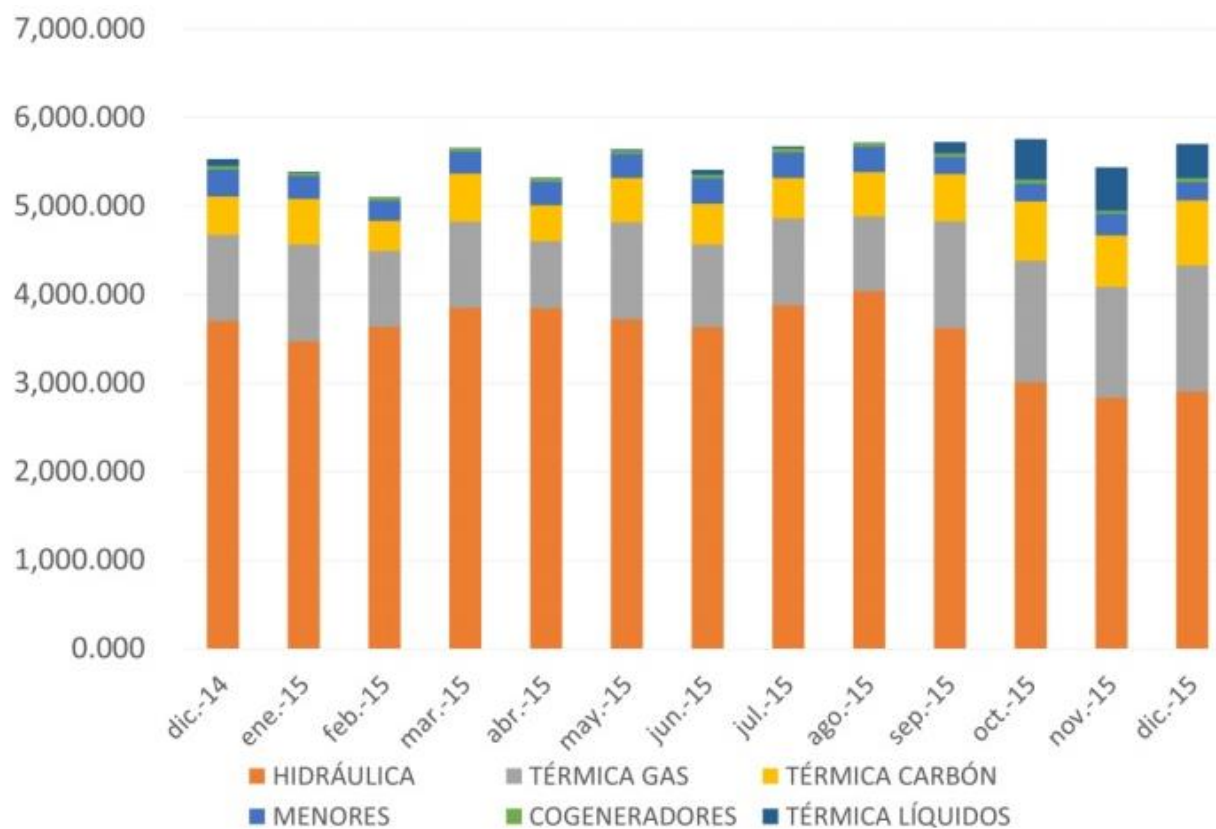


Guaviare									
<b>Suroccidente</b>									
Caldas									
Cauca									
Huila									
Nariño									
Putumayo	410	2735,2	93,2			11,8	46		3296,1
Quindío									
Risaralda									
Tolima									
Valle del cauca									
Caquetá									
<b>Total general</b>	<b>1247</b>	<b>11500</b>	<b>93,2</b>	<b>1348,4</b>	<b>299</b>	<b>1619,4</b>	<b>310</b>	<b>18,4</b>	<b>16436</b>

En el anexo A, se representa gráficamente la distribución de la capacidad instalada en el país por cada área eléctrica y su participación por recurso en (%).

En la figura 6 se establece la evolución histórica de la generación de energía de acuerdo al tipo de central; a partir de agosto del 2015 y hasta noviembre del mismo año, la producción hidroeléctrica presenta un comportamiento decreciente, presentando un crecimiento marginal en diciembre con respecto al mes anterior; este comportamiento es asociado al periodo climático conocido como el fenómeno de El Niño.

**Figura 6:** Histórico mensual de generación por tecnología (GWh). Fuente: (UPME, 2015).



En la tabla 4 se observan las principales centrales hidroeléctricas en Colombia, las cuales son objeto de estudio de la presente investigación, ordenadas de mayor a menor capacidad instalada en el país.

**Tabla 4:** Caracterización centrales hidroeléctricas colombianas.

Hidroeléctrica	Departamento/Municipio	Área inundada (ha)	Año puesta en servicio	Capacidad Almacenamiento (m <sup>3</sup> )	Volumen útil (m <sup>3</sup> )	Ubicación (ríos)	Clima	m.s.n.m	Capacidad instalada (MW)	Bibliografía
San Carlos	Antioquia/ San Carlos	340	1984	61,7 x 10 <sup>6</sup>	53.23 x 10 <sup>6</sup>	Embalse Punchiná Río Guatapé Río San Carlos	Tropical Húmedo	775	1240	(Palacios, 2013) (ISAGEN S.A., 2013) (Escobar, 2010) (Larrahondo, 1993)
El Guavio	Cundinamarca/ Ubalá.	1500	1992	1043 x 10 <sup>6</sup>	950 x 10 <sup>6</sup>	Río Guavio Río Batatas Río Chivor	Tropical Húmedo	1642	1213	(Palacios, 2013) (Peña, 2015) (INGETEC, n.d.) (Larrahondo, 1993)
Chivor	Boyacá/ Santa María	1260	1977	760 x 10 <sup>6</sup>	668 x 10 <sup>6</sup>	Embalse la Esmeralda Río Batá	Tropical Húmedo	1280	1000	(Palacios, 2013) (AES Chivor, n.d.) (Larrahondo, 1993)
Sogamoso	Santander/ Girón Betulia	7000	2014	4800 x 10 <sup>6</sup>		Embalse Topocoro Río Sogamoso	Tropical Húmedo	320	820	(Palacios, 2013) (ISAGEN S.A., 2015)
Porce III	Antioquia/ Amalfí, Anorí, Gómez Plata y Guadalupe	461	2010	169 x 10 <sup>6</sup>	127 x 10 <sup>6</sup>	Río Porce	Tropical Húmedo	680	660	(Palacios, 2013) (INGETEC, n.d.)
Guatapé	Antioquia/ San Rafael, Guatapé y Peñol	6240	1978	1071 x 10 <sup>6</sup>		Embalse Peñol-Guatapé Río Nare	Tropical Húmedo	1887	560	(Palacios, 2013) (EPM, 2013) (Larrahondo, 1993)
Betania	Huila/ Campoalegre Hobo y Yaguará	7400	1987	1971 x 10 <sup>6</sup>		Río Magdalena Río Yaguará	Tropical Húmedo	564	540	(Palacios, 2013) (Larrahondo, 1993)
Porce II	Antioquia/ Amalfí y Anorí	890	2001	142 x 10 <sup>6</sup>		Río Porce	Tropical Húmedo	869	405	(Palacios, 2013) (EPM, 2013)
El Quimbo	Huila/ Gigante , El Agrado , Garzón ,Paicol,Tesalia	8250	2015	3215 x 10 <sup>6</sup>	1824 x 10 <sup>6</sup>	Río Suaza	Tropical Húmedo	720	400	(Palacios, 2013) (EMGESA, n.d)
Miel I	Caldas/ Norcasia	1220	2002	571 x 10 <sup>6</sup>	445 x 10 <sup>6</sup>	Embalse Amaní Río la Miel	Tropical Húmedo	445	396	(Palacios, 2013) (ISAGEN S.A., 2013) (Uribe, 2014)
Alto Anchicayá	Valle del Cauca/ Buenaventura y Dagua	170	1974	45x106	30x106	Río Verde Río Anchicayá	Tropical Húmedo	655	365	(Palacios, 2013) (Larrahondo, 1993) EPSA. (2017)
Urra I	Córdoba/ Tierra Alta	7400	2000	1740x106	1234x106	Río Sinú	Tropical-Húmedo	130,5	340	(Palacios, 2013) (URRA S.A., 2015)
Salvajina	Cauca/ Suarez	2031	1985	906x106	753x106	Río Cauca	Tropical Húmedo	1155	285	(Palacios, 2013) (Larrahondo, 1993) EPSA. (2017)
Jaguas	Antioquia/ San Rafael San Roque Alejandría	1060	1988	208x106	180x106	Río Nare Río Guatapé	Tropical Húmedo	1247	170	(Palacios, 2013) (ISAGEN S.A., 2013)
Calima	Valle del cauca/ Calima Darién	1934	1966	530x106	437x106	Río Calima Río Bravo	Tropical Húmedo	1450	132	(Loaiza, 2016.) (Palacios, 2013) (Larrahondo, 1993) EPSA. (2017)

Fuente: Elaboración propia

#### 4. METODOLOGÍA

Para determinar las emisiones difusoras de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en los reservorios se optó por utilizar el método del panel intergubernamental para el cambio climático propuesto por el IPCC(2006), apéndice 2, Nivel 2: Enfoque posible para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas, utilizando los factores de emisión específicos del país. Mediante la siguiente ecuación:

**Ecuación 1:** Emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de tierras convertidas en tierras inundadas (Nivel 2) (IPCC, 2006).

*Emisiones de CO<sub>2</sub> LW inundación*

$$= \left[ \left( (P_f * E_f(CO_2)_{dif}) + (P_i * E_i(CO_2)_{dif}) \right) * (A_{inundacion,superficie} * f_A * 10^{-6}) \right]$$

Dónde:

Emisiones de CO<sub>2</sub> LW inundación = Total de las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las tierras convertidas en tierras inundadas, Gg de CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>.

P<sub>f</sub> = Periodo libre de hielos, días año<sup>-1</sup>

P<sub>i</sub> = Periodo cubierto de hielos, días año<sup>-1</sup> (Los períodos cubiertos de hielos no son aplicables para nuestra región).



$E_f(\text{CO}_2)_{\text{dif}}$  = Promedio diario de las emisiones difusoras provenientes de la interfaz aire-agua durante el periodo libre de hielos,  $\text{kg de CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ .

$E_i(\text{CO}_2)_{\text{dif}}$  = Emisiones difusoras relacionadas con el periodo cubierto de hielos,  $\text{kg de CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ .

$A_{\text{inundación, superficie total}}$  = Área total de la superficie del reservorio, incluidas las tierras inundadas, los lagos y ríos, ha.

$f_A$  = Fracción del área total del reservorio que se inundó en los últimos 10 años, adimensional.

Para estimar el promedio diario de las emisiones difusoras de  $\text{CO}_2$  se debe aplicar los valores establecidos en la tabla 5, donde se visualizan las emisiones medidas para diversas zonas climáticas, integrando las variaciones espaciales (intra reservorios, regionales) y variaciones temporales (cambios estacionales) establecidas por las emisiones de los reservorios, de igual forma los flujos en la interfaz agua aire (IPCC, 2006).

**Tabla 5:** Emisiones medidas de  $\text{CO}_2$  provenientes de tierras inundadas (IPCC, 2006).

Clima	Emisiones difusoras (periodo libre de hielos)				
	$E_f(\text{CO}_2)_{\text{dif}}$ ( $\text{kg. de CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )				
	Mediana	Min.	Max.	$N_m$	$N_{\text{res}}$
<b>Polar / Boreal muy húmedo.</b>	11,8	0,8	34,5	1011	20
<b>Templado frío,</b>	15,2	4,5	86,3	633	20

<b>húmedo.</b>					
<b>Templado cálido, húmedo.</b>	8,1	-10,3	57,5	507	33
<b>Templado cálido, seco.</b>	5,2	-12,0	31,0	390	43
<b>Tropical, muy húmedo.</b>	44,9	11,5	90,9	642	7
<b>Tropical, seco.</b>	39,1	11,7	58,7	197	5

Los valores de la segunda columna representan las medianas de las emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales corresponden en sí a las medias aritméticas de los flujos medidos sobre los reservorios individuales, los valores Mín y Máx corresponden a los más bajos y los más altos de todas las mediciones individuales dentro de una región climática dada; se dan sólo como indicación de la variabilidad Nm = cantidad de mediciones; Nres = cantidad de reservorios muestreados. Estas mediciones pueden incluir las emisiones no antropogénicas (p. ej., emisiones provenientes del carbono en la cuenca corriente arriba) y posibles cálculos dobles de emisiones antropogénicas (p. ej., aguas servidas de las zonas urbanas de la región del reservorio) y de este modo pueden sobreestimar las emisiones (IPCC, 2006).

Se debe mencionar que los factores de emisión de CO<sub>2</sub> provenientes de tierras inundadas se tomarán de los datos reportados para países de la región, como lo es el caso de Brasil.

Para determinar las emisiones difusoras de Metano (CH<sub>4</sub>) en los reservorios se optara por utilizar el método del panel intergubernamental para el cambio climático propuesto por el (IPCC, 2006.), apéndice 3, Nivel 1: Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de tierras inundadas: Base para su futuro desarrollo metodológico. Mediante la siguiente ecuación:

**Ecuación 2:** Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de las tierras inundadas , Nivel 1 (IPCC, 2006).

$$Emisiones\ de\ CH_4\ WW_{inundacion} = P * E(CH_4)_{dif} * A_{inundacion\ superficie\ total} * 10^{-6}$$

Dónde:

Emisiones de  $\text{CH}_4$  WW inundación = Total de las emisiones de  $\text{CH}_4$  provenientes de las tierras inundadas Gg de  $\text{CH}_4$  año<sup>-1</sup>.

P = periodo libre de hielos, días año<sup>-1</sup> (por lo general, 365 para las estimaciones de inventario anuales, o menos en los países con periodo con cobertura de hielo).

$E(\text{CH}_4)_{\text{dif}}$  = promedio diario de las emisiones difusoras, kg. De  $\text{CH}_4$  ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

$A_{\text{inundación superficie total}}$  = área total de la superficie inundada, incluidas las tierras inundadas, los lagos y ríos, ha.

Para estimar el promedio diario de las emisiones difusoras de  $\text{CH}_4$  se debe aplicar los valores establecidos en la tabla 6, donde se visualizan las emisiones medidas para diversas zonas climáticas, integrando las variaciones espaciales (intra reservorios, regionales) y variaciones temporales (cambios estacionales) establecidas por las emisiones de los reservorios, de igual forma los flujos en la interfaz agua aire (IPCC, 2006).

**Tabla 6:** Emisiones medidas de  $\text{CH}_4$  provenientes de tierras inundadas (IPCC, 2006).

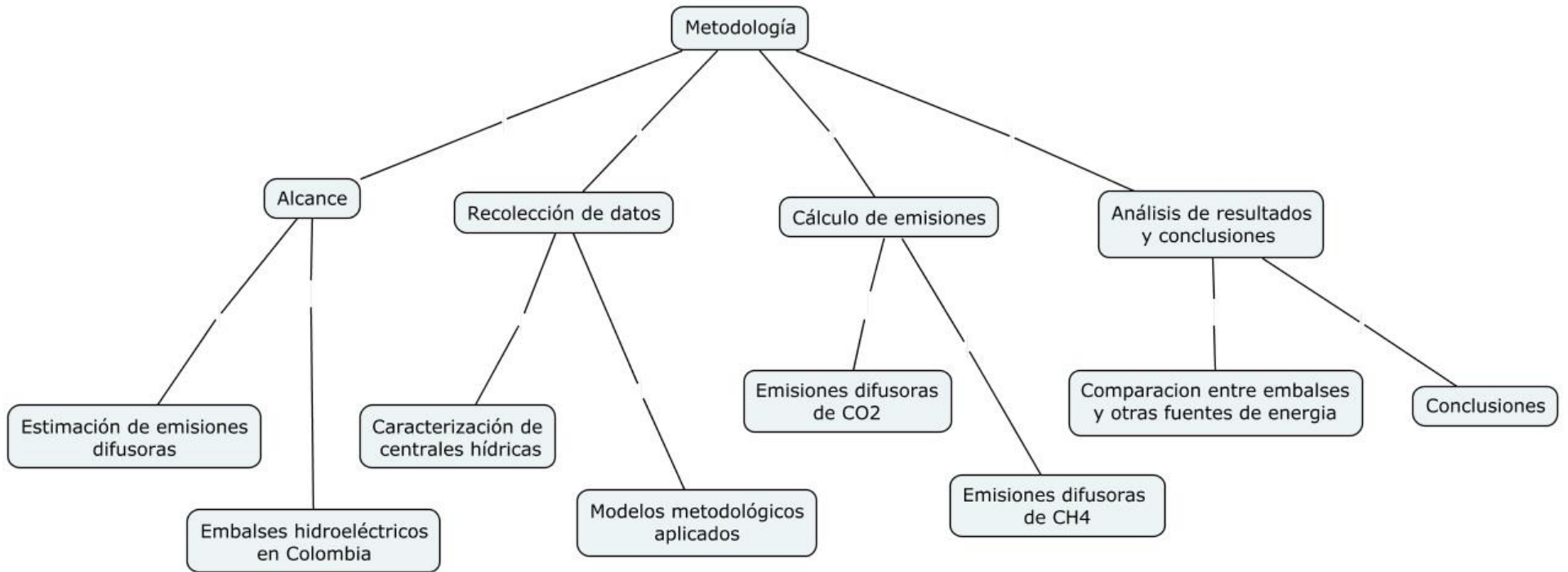
Clima	Emisiones difusoras (periodo libre de hielos)				
	$E(\text{CH}_4)_{\text{dif}}$ (kg. de $\text{CH}_4$ ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )				
	Mediana	Min.	Max.	$N_m$	$N_{\text{res}}$
<b>Polar / Boreal muy húmedo.</b>	0,086	0,011	0,3	253	13
<b>Templado frío,</b>	0,061	0,001	0,2	233	10

<b>húmedo.</b>					
<b>Templado cálido, húmedo.</b>	0,150	-0,05	1,1	416	16
<b>Templado cálido, seco.</b>	0,044	0,032	0,09	135	5
<b>Tropical, muy húmedo.</b>	0,630	0,067	1,3	303	6
<b>Tropical, seco.</b>	0,295	0,070	1,1	230	5

Los valores de la segunda columna representan las medianas de las emisiones de CH<sub>4</sub>, las cuales corresponden en sí a las medias aritméticas de los flujos medidos sobre los reservorios individuales, los valores Mín y Máx corresponden a los más bajos y los más altos de todas las mediciones individuales dentro de una región climática dada; se dan sólo como indicación de la variabilidad Nm = cantidad de mediciones; Nres = cantidad de reservorios muestreados. Estas mediciones pueden incluir las emisiones no antropogénicas (p. ej., emisiones provenientes del carbono en la cuenca corriente arriba) y posibles cálculos dobles de emisiones antropogénicas (p. ej., aguas servidas de las zonas urbanas de la región del reservorio) y de este modo pueden sobreestimar las emisiones (IPCC, 2006).

Se debe mencionar que los factores de emisión de CH<sub>4</sub> provenientes de tierras inundadas se tomarán de los datos reportados para países de la región, como lo es el caso de Brasil.

**Figura 7:** Esquema metodológico para cálculo y análisis de emisiones difusoras de GEI por embalses hidroeléctricos



Fuente: Elaboración propia

## 5. RESULTADOS

Utilizando los métodos propuestos por el panel intergubernamental para el cambio climático (IPCC), en cuanto a reservorios tropicales, contextualizados en la metodología del presente trabajo, se estiman las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de los embalses Colombianos destinados al uso hidroeléctrico del país.

### 5.1 Muestra de cálculo central hidroeléctrica San Carlos.

**Tabla 7:** Datos generales embalse Punchiná – San Carlos.

<b>Datos</b>		
<b>Clima</b>	Tropical Húmedo	-
$E_f(CO_2)_{dif}$	44,9	$kg CO_2 ha^{-1} dia^{-1}$
$E(CH_4)_{dif}$	0,630	$kg CH_4 ha^{-1} dia^{-1}$
<b>Periodo libre de hielos</b>	365	Días
<b>Área inundada</b>	340	ha
<b>Año puesta en servicio</b>	1984	-
<b>Fracción del área total inundada</b>	1	-

Los datos para determinar el clima de los embalses presentes en este trabajo se determina de acuerdo a (Sanchez, 2016), donde explica que según la posición de Colombia entre los trópicos de cáncer y capricornio se está dentro del macro clima tropical a nivel global; así mismo debido a la posición geográfica de los embalses estudiados y a las precipitaciones anuales presentadas en el área de influencia de estos embalses, se determinan como tipo de clima tropical-húmedo.

Los datos para la fracción del área total inundada corresponden al porcentaje (%) de llenado del embalse que se inundó en los últimos 10 años, como el embalse Punchiná cumplió con el 100% de su llenado su fracción es 1.

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.1 Estimación emisiones difusoras de CO<sub>2</sub>.

#### Ecuación 1:

*Emisiones de CO<sub>2</sub> LW inundación*

$$= \left[ \left( (P_f * E_f(CO_2)_{dif}) + (P_i * E_i(CO_2)_{dif}) \right) * (A_{inundacion,superficie} * f_A * 10^{-6}) \right]$$

Datos:

Emisiones de CO<sub>2</sub> LW inundación = Total de las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las tierras convertidas en tierras inundadas, Gg de CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>.

$$P_f = 365 \text{ días año}^{-1}$$

P<sub>i</sub> = Los períodos cubiertos de hielos no son aplicables para nuestra región.

$$E_f(CO_2)_{dif} = 44,9 \text{ kg de CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}.$$

E<sub>i</sub>(CO<sub>2</sub>)<sub>dif</sub> = No aplica para el clima tropical

$$A_{inundación, superficie total} = 340 \text{ ha.}$$

$$f_A = 100\% \text{ de llenado, } 1.$$

Los datos aplicados para la ecuación uno (1) son tomados de la tabla seis (7), donde se especifican los datos para el embalse Punchiná perteneciente a la hidroeléctrica San Carlos.

*Emisiones de CO<sub>2</sub> LW inundación*

$$= \left[ \left( (365 \text{ días año}^{-1} * 44,9 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}) + (0) \right) * (340 * 1 * 10^{-6}) \right]$$

$$\text{Emisiones de } CO_2 \text{ LWinundacion} = [(16388,5 \text{ kg } CO_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}) * (3,4 * 10^{-4} \text{ ha})]$$

$$\text{Emisiones de } CO_2 \text{ LWinundacion} = \mathbf{5,6 \text{ Gg } CO_2 \text{ año}^{-1}}$$

### 5.1.2 Estimación emisiones difusoras de CH<sub>4</sub>.

#### Ecuación 2:

$$\text{Emisiones de } CH_4 \text{ WWinundacion} = P * E(CH_4)_{dif} * A_{inundacion \text{ superficie total}} * 10^{-6}$$

Datos:

Emisiones de CH<sub>4</sub> WW inundación = Total de las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de las tierras inundadas Gg de CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>.

$$P = 365 \text{ días año}^{-1}$$

$$E(CH_4)_{dif} = 0,630 \text{ kg De } CH_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}.$$

$$A_{inundación \text{ superficie total}} = 340 \text{ ha.}$$

Los datos aplicados para la ecuación dos (2) son tomados de la tabla seis (7), donde se especifican los datos para el embalse Punchiná perteneciente a la hidroeléctrica San Carlos.

$$\text{Emisiones de } CH_4 \text{ WWinundacion} = 365 \text{ dias año}^{-1} * 0,630 \text{ kg } CH_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1} * 340 \text{ ha} * 10^{-6}$$

$$\text{Emisiones de } CH_4 \text{ WWinundacion} = \mathbf{0,08 \text{ Gg } CH_4 \text{ año}^{-1}}$$



## 5.2 Estimación de las emisiones difusoras en centrales hídricas colombianas.

En la tabla 8 se establecen los resultados de la estimación para emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en las principales centrales hídricas colombianas. Los datos necesarios para aplicar tanto la ecuación uno (1) como la ecuación dos (2), son tomados de las tabla tres, cuatro y cinco (4,5,6), donde se establecen los datos generales para cada central hidroeléctrica y el promedio diario de las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de acuerdo al clima presente en el entorno del embalse; también se relaciona la energía anual generada (GWh) con la estimación de las emisiones difusoras de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2-Eq</sub> para cada reservorio.

**Tabla 8:** Emisiones difusoras de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>

Hidroeléctrica	Energía Anual Generada	Emisiones CO <sub>2</sub>	Emisiones CH <sub>4</sub>	Emisiones de	Emisiones totales CO <sub>2-Eq</sub>
				CH <sub>4</sub> convertidas en CO <sub>2-Eq</sub>	
	(GWh)	(Gg año <sup>-1</sup> )	(Gg año <sup>-1</sup> )	(Gg año <sup>-1</sup> )	(Gg año <sup>-1</sup> )
San Carlos	6020	5,6	0,08	2	7,6
El Guavio	5700	24,6	0,34	8,5	33,1
Chivor	3626	20,6	0,28	7	27,6
Sogamoso	5056	114,7	1,6	40	154,7
Porce III	3605	7,6	0,11	2,75	10,35
Guatapé	1945	102,3	1,4	35	137,3
Betania	2304	121,3	1,7	42,5	163,8
Porce II	1294	14,6	0,2	5	19,6
El Quimbo	2216	135,2	1,9	47,5	182,7
Miel I	1460	20	0,28	7	27
Alto Anchicayá	2291	2,8	0,04	1	3,8
Urta I	1421	121,3	1,7	42,5	163,8
Salvajina	1050	33,3	0,47	11,75	45,05
Jaguas	770	17,4	0,24	6	23,4
Calima	180	31,7	0,44	11	42,7
<b>TOTAL</b>	<b>38938</b>	<b>773</b>	<b>10,78</b>	<b>269,5</b>	<b>1042,5</b>

La energía anual generada corresponde a los datos aportados por la UPME, para el año 2016. El potencial de calentamiento global (PCG) del CH<sub>4</sub> durante 100 años es 25, lo que significa que las emisiones de una tonelada métrica de CH<sub>4</sub> son equivalentes a las emisiones de 25 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> respectivamente (IPCC, 2007).

Fuente: elaboración propia.

### 5.3 Comparación de emisiones difusoras entre centrales hídricas colombianas.

La central hidroeléctrica el Quimbo aporta la mayor cantidad de emisiones difusoras a la atmósfera, con una emisión total estimada de CO<sub>2</sub>-Eq de 182,7 Gg año<sup>-1</sup>, relacionando este valor con su área total inundada, ya que su embalse contiene la mayor superficie de agua; en la figura 8 se presentan los valores estimados de las emisiones difusoras entre las centrales hídricas colombianas, en la tabla 9 se establecen estos valores de mayor a menor valor emisor, donde se puede observar la relación existente entre área inundada y la emisión de GEI. Entre más grande sea la superficie del embalse, más posibilidades de emitir mayores cantidades de gases efecto invernadero.

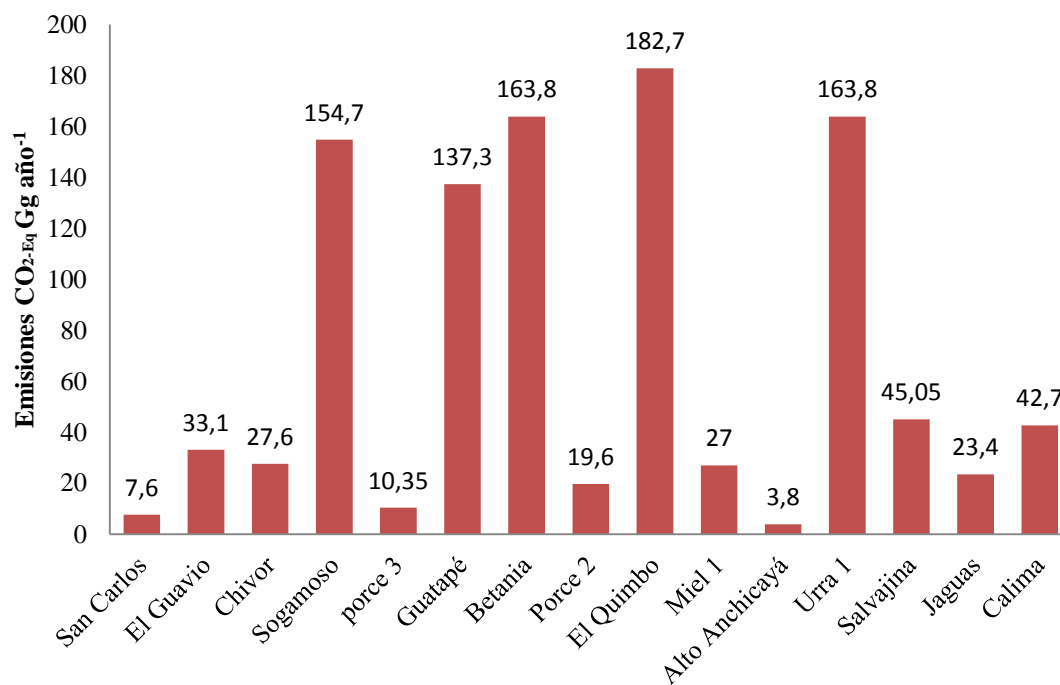
**Tabla 9:** Comparación emisiones difusoras CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>

Hidroeléctrica	Energía Anual Generada	Área Inundada	Emisiones CO <sub>2</sub>	Emisiones CH <sub>4</sub>	Emisiones de CH <sub>4</sub> convertidas en CO <sub>2</sub> -Eq	Emisiones totales CO <sub>2</sub> -Eq
	(GWh)	(ha)	(Gg año <sup>-1</sup> )	(Gg año <sup>-1</sup> )	(Gg año <sup>-1</sup> )	(Gg año <sup>-1</sup> )
<b>El Quimbo</b>	2216	8250	135,2	1,9	47,5	182,7
<b>Betania</b>	2304	7400	121,3	1,7	42,5	163,8
<b>Urta I</b>	1421	7400	121,3	1,7	42,5	163,8
<b>Sogamoso</b>	5056	7000	114,7	1,6	40	154,7
<b>Guatapé</b>	1945	6240	102,3	1,4	35	137,3

<b>Salvajina</b>	1050	2031	33,3	0,47	11,75	45,05
<b>Calima</b>	180	1934	31,7	0,44	11	42,7
<b>El Guavio</b>	5700	1500	24,6	0,34	8,5	33,1
<b>Chivor</b>	3626	1260	20,6	0,28	7	27,6
<b>Miel I</b>	1460	1220	20	0,28	7	27
<b>Jaguas</b>	770	1060	17,4	0,24	6	23,4
<b>Porce II</b>	1294	890	14,6	0,2	5	19,6
<b>Porce III</b>	3605	461	7,6	0,11	2,75	10,35
<b>San Carlos</b>	6020	340	5,6	0,08	2	7,6
<b>Alto Anchicayá</b>	2291	170	2,8	0,04	1	3,8
<b>TOTAL</b>	<b>38938</b>	<b>47156</b>	<b>773</b>	<b>10,78</b>	<b>269,5</b>	<b>1042,5</b>

Fuente: Elaboración propia

**Figura 8:** Emisiones difusoras de CO<sub>2</sub>-Eq por central hidroeléctrica (Gg año<sup>-1</sup>).



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4 Comparación de emisiones difusoras provenientes de centrales hidroeléctricas con otros modos de generación existentes en Colombia.

De acuerdo a los datos aportados en la tabla 10, las plantas eléctricas a base de ACPM son las que más emisiones de CO<sub>2-Eq</sub> generan a la atmósfera con aproximadamente 10.500.081,36 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>, seguido de las plantas eléctricas de carbón con un total estimado de 8.211.919,2 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>. El factor de emisión (FE) más alto lo encontramos en las plantas de ACPM, indicando que un MWh generado por estas plantas equivale a una emisión aproximada de 3,4 t CO<sub>2-Eq</sub>.

**Tabla 10:** Emisiones CO<sub>2-Eq</sub> GEI generación eléctrica por tipo de planta.

<b>Tipo de planta</b>	<b>Energía anual generada (MWh)</b>	<b>Emisiones totales (t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Factor de emisión (FE) (t CO<sub>2-Eq</sub>/MWh)</b>
<b>Agua</b>	38.938.000	1.042.500	0,03
<b>ACPM</b>	3.117.240	10.500.081,36	3,4
<b>Bagazo</b>	601.440	376.606,32	0,63
<b>Carbón</b>	8.848.440	8.211.919,2	1
<b>Combustóleo</b>	1.333.200	3.175.320,72	2,4
<b>Gas</b>	17.035.440	1.102.604,16	0,1
<b>Querosene</b>	205.680	92.024,52	0,45

Los datos de las centrales hídricas son tomados de la tabla 9 y para el resto de plantas provienen de (UPME, 2015), los cuales se pasaron de GWh a MWh y de Gg CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup> a t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>. El FE se obtiene al dividir el total de las emisiones sobre la energía generada.

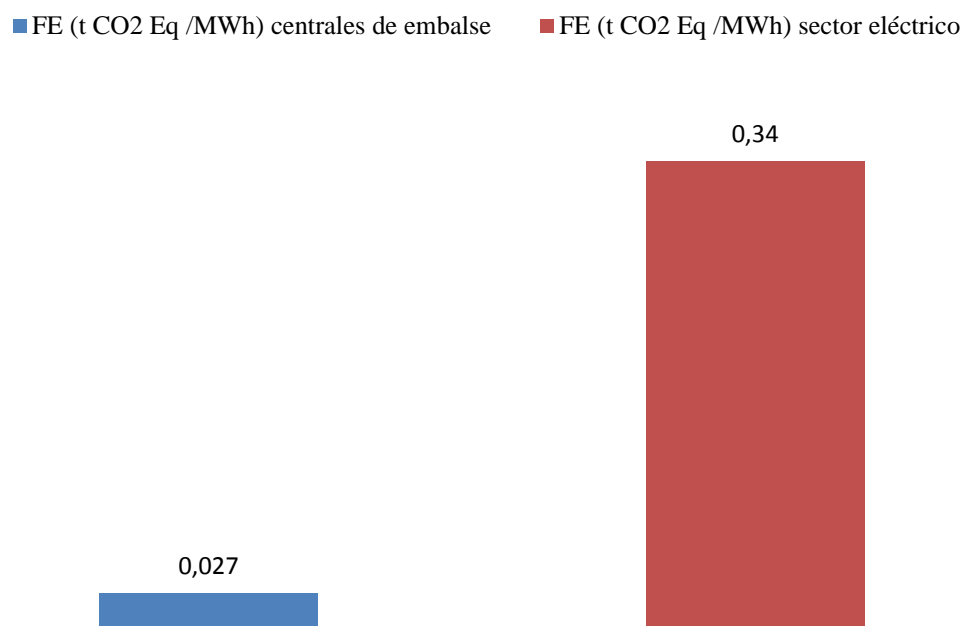
Fuente: Elaboración propia

Los embalses destinados a la producción hidroeléctrica del país emiten una cantidad relativamente pequeña de 1.042.500 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup> en comparación con los otros modos de generación eléctrica en Colombia (Tabla 11), pero cuyo valor emisor no se está teniendo en cuenta en los inventarios nacionales de emisiones atmosféricas y es el sector que más energía aporta al SIN con aproximadamente 38.938.000 MWh año<sup>-1</sup>, cercano al 69,97% del total aportante de energía. En la figura 9 se compara el FE entre los embalses hídricos y el sector eléctrico.

**Tabla 11:** Emisiones GEI embalses hídricos y sector energético.

	<b>Energía anual generada (MWh)</b>	<b>Emisiones totales (t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Factor de emisión (FE) (t CO<sub>2-Eq</sub>/MWh)</b>
<b>Embalse hidroeléctricos analizados</b>	38.938.000	1.042.500	0,03
<b>Sector eléctrico colombiano</b>	68.446.505,16	23.458.556,28	0,34
Los datos para los embalses hidroeléctricos analizados son tomados de la tabla 10. Para los datos del sector eléctrico colombiano están incluidos todas las formas de generación eléctrica existentes actualmente (UPME, 2015).			

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 9:** Comparación FE embalses y sector eléctrico.

Fuente: elaboración propia

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las emisiones difusoras de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) fueron calculadas con la metodología del IPCC(2006), apéndice 2, Nivel 2: Enfoque posible para estimar las emisiones de  $\text{CO}_2$  provenientes de las tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas y por el IPCC(2006), apéndice 3, Nivel 1: Emisiones de  $\text{CH}_4$  provenientes de tierras inundadas.

Por medio de los cálculos realizados en los embalses de las centrales hídricas colombianas analizadas se estimaron valores para las emisiones difusoras de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , obteniendo resultados de  $773 \text{ Gg año}^{-1}$  para las emisiones difusoras de  $\text{CO}_2$  y de  $10,78 \text{ Gg año}^{-1}$  para las emisiones difusoras de  $\text{CH}_4$ , tal como se representa en la figura 10.

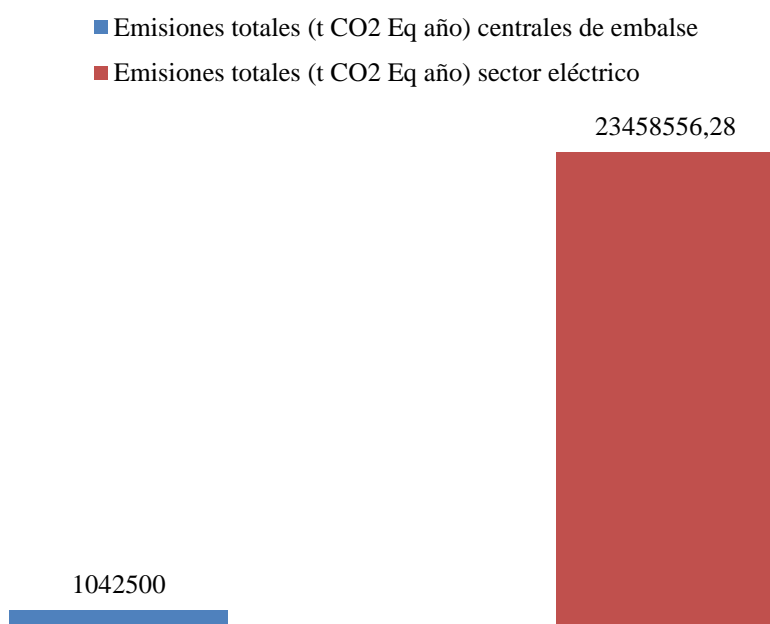
**Figura 10:** Emisiones difusoras de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  ( $\text{Gg año}^{-1}$ )



Fuente: Elaboración propia

En los embalses hidroeléctricos se estimó un  $\text{CO}_{2\text{-Eq}}$  de  $1.042,5 \text{ Gg año}^{-1}$  ( $1.042.500 \text{ t CO}_{2\text{-Eq}} \text{ año}^{-1}$ ); el cual tiende a ser normal dentro de la tasa emisiva de la generación eléctrica en Colombia, aproximada a  $23.458,55 \text{ Gg CO}_{2\text{-Eq}} \text{ año}^{-1}$  ( $23.458.556,28 \text{ t CO}_{2\text{-Eq}} \text{ año}^{-1}$ ), véase la figura 11. A pesar de ser una estimación, nos brindan una idea general de las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  en embalses tropicales.

**Figura 11:** Comparación emisiones GEI, embalses y sector eléctrico.



Fuente: Elaboración propia

En la estimación de los embalses analizados destinados a la generación hidroeléctrica en Colombia, se calcularon las emisiones difusoras de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , haciéndose necesario la realización de análisis correspondientes a las emisiones por burbuja (sedimento-agua) en los embalses mencionados, para establecer la influencia total de las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ .



Para estimar las emisiones por desgasificación se hace necesario contar con los estudios y mediciones correspondientes a los factores anteriormente mencionados, ya que en embalses tropicales, especialmente jóvenes se consideran como una fuente emisora importante de GEI.

Un caso de estudio para estimar las emisiones de desgasificación se llevó a cabo en el embalse de Susqueda – España:

Donde se optó por utilizar un modelo de “caja negra”, midiendo o estimando los flujos de carbono en las entradas y en las salidas del embalse. Se trabaja con el supuesto de que la cantidad entrante equivale a la saliente, que incluye la cantidad de carbono almacenado en el sedimento, más la almacenada en la masa de agua del mismo embalse por aumento de volumen durante del período de estudio. (Palau & Alonso, 2008, p.33)

## 7. CONCLUSIONES

De acuerdo al quinto informe de evaluación, desarrollado por el IPCC, américa latina y el caribe esperan impactos importantes con respecto al cambio climático, por lo tanto se hace fundamental desarrollar medidas de mitigación para minimizar las emisiones de GEI a la atmósfera. En este sentido, Colombia ha trazado políticas para reducir la emisión de estos gases y se ha comprometido por medio de tratados internacionales a reducir el 30% del total de las emisiones de GEI para el año 2030.

En el caso de la generación eléctrica, Colombia busca aprovechar el potencial hídrico y climático del país para satisfacer la demanda generada a mediano y largo plazo, permitiendo un desarrollo sostenible energético, centrándose en la generación hidroeléctrica.

En países emergentes como Colombia y en gran parte de américa latina, las centrales hidroeléctricas son implementadas a gran medida como una fuente de generación eléctrica limpia. Gracias a las investigaciones y estudios existentes a nivel mundial, los embalses implementados para la generación hidroeléctrica emiten cantidades significativas de GEI, contribuyendo al calentamiento global, dependiendo de la ubicación geográfica del embalse, su edad, área, profundidad, fluctuaciones del nivel del agua, cantidad de nutrientes y carbono, tiempo de rotación, ubicación de aliviaderos y turbinas.

Se puede concluir que los embalses hidroeléctricos ubicados en áreas tropicales son una fuente importante de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> que contribuyen al calentamiento global,

emitiendo mayor cantidad de GEI que los embales ubicados en otras áreas geográficas, como las templadas o boreales.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> calculadas con la metodología propuesta por el IPCC en la presente investigación, nos brindan una idea generalizada del presente de los embales analizados. Lográndose estimar emisiones difusoras de 773 Gg CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup> y de 10,78 Gg CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>, lo que equivale a una emisión total de 1.042,5 Gg CO<sub>2-Eq</sub> año (1.042.500 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>). Reafirmando que los embales hidroeléctricos estudiados generan emisiones GEI.

Las emisiones difusoras estimadas en los embales colombianos analizados (1.042.500 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>) representan el 4,4 % del total de emisiones generadas por el sector eléctrico (23.458.556,28 t CO<sub>2-Eq</sub> año<sup>-1</sup>). Se concluye que las emisiones generadas por la hidroelectricidad no son relevantes en cuanto a la comparación con el total de emisiones provenientes del sector energético colombiano.

Se espera que en Colombia se socialice este tema y a mediano plazo se puedan hacer investigaciones que brinden información donde se conozca el estado real de las emisiones de GEI por parte de los reservorios existentes. Teniendo en cuenta que la generación hidroeléctrica es la mejor opción para abastecer la demanda energética en países emergentes como Colombia, no se debe hacer una desestimación de los GEI que se puedan emitir y que estén contribuyendo con el calentamiento global. Cada país debe saber la incidencia en este tema relevante y así contribuir con el desarrollo sostenible.

En Colombia se recomienda la elaboración y ejecución de un modelo que cuantifique las emisiones de cualquier embalse, en función de todos sus parámetros, como área inundada, edad del embalse, temperatura del agua, entre otros; e incluir la tasa emisiva dentro de los inventarios nacionales.

## 8. BIBLIOGRAFIA

AES Chivor. (En Línea). *La Central Hidroeléctrica de Chivor*. Recuperado de:

<http://www.chivor.com.co/qui/SitePages/La%20Central%20Hidroel%C3%A9ctrica%20de%20Chivor.aspx>

De Lucena, A. F. P., Schaeffer, R., & Szklo, A. S. (2010). Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. *Global*

*Environmental Change*, 20(2), 342–350. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.004>

Demarty, M., & Bastien, J. (2011). GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and

equatorial regions: Review of 20 years of CH<sub>4</sub> emission measurements. *Energy Policy*, 39(7), 4197–4206. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.033>

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., & Sokona, Y. (2011). Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

EMGESA S.A. (En Línea). Central Hidroeléctrica el Quimbo. *Área de influencia*. Recuperado de:

<http://www.proyectoelquimboemgesa.com.co/site/ElProyecto/%C3%81readeinfluencia.aspx>

EPM. (2013). Sistema de generación de energía EPM. *Central Guatapé*. Recuperado de:  
<http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/Centraleshidroel%C3%A9ctricas.aspx>

EPSA. (2017). *Presencia geográfica*. Recuperado de:  
<http://portal.epsa.com.co/nosotros/presencia-geogr%C3%A1fica>

Escobar, C.A. (2010). Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse Punchiná (Antioquia). *Eia*. 14, 97-113. Recuperado de:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n14/n14a09.pdf>

IPCC. (2007). *Forzamiento radiativo neto mundial, potenciales de calentamiento mundial y pautas de forzamiento*. Cuarto informe de evaluación: cambio climático. Recuperado de:  
[https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html)

IPCC. (2006). *Apéndice 3, Emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de tierras inundadas: Base para su futuro desarrollo metodológico*. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (pp. 1–8). Recuperado de: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4\\_Volume4/V4\\_p\\_Ap3\\_WetlandsCH4.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_p_Ap3_WetlandsCH4.pdf)

IPCC. (2006). *Apéndice 2, Enfoque posible para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de las tierras convertidas en tierras permanentemente inundadas: Base para su futuro*

desarrollo metodológico. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra* (pp. 1–10). Recuperado de: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4\\_Volume4/V4\\_p\\_Ap2\\_WetlandsCO2.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_p_Ap2_WetlandsCO2.pdf)

INGETEC. (En Línea). *Central Hidroeléctrica El Guavio*. Recuperado de: [https://www.ingetec.com.co/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=28:guavio&Itemid=35&lang=es](https://www.ingetec.com.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=28:guavio&Itemid=35&lang=es)

ISAGEN S.A. (2013). Centrales de generación. *Central hidroeléctrica San Carlos*. Recuperado de: [https://www.isagen.com.co/comunicados/Central\\_sancarlos\\_2013.pdf](https://www.isagen.com.co/comunicados/Central_sancarlos_2013.pdf)

ISAGEN S.A. (2013). Centrales de generación. *Central Hidroeléctrica Miel I*. Recuperado de: [https://www.isagen.com.co/comunicados/central\\_mielI\\_2013.pdf](https://www.isagen.com.co/comunicados/central_mielI_2013.pdf)

ISAGEN S.A. (2013). Centrales de generación. *Central hidroeléctrica Jaguas*. Recuperado de: [https://www.isagen.com.co/comunicados/Central\\_jaguas\\_2013.pdf](https://www.isagen.com.co/comunicados/Central_jaguas_2013.pdf)

ISAGEN S.A. (2015). Centrales de generación. *Central hidroeléctrica Sogamoso*. Recuperado de: <https://www.isagen.com.co/comunicados/Sogamoso2015.pdf>

Larrahondo, M. (1993). Aprovechamiento acuícola de embalses en Colombia. En FAO, *Avances en el manejo y aprovechamiento acuícola de embalses en América Latina y el Caribe*.

Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab488s/AB488S04.htm#ch3>

León, J., Guerin, F., Melo, E., & Loaiza, S. (2014). Adaptaciones metodológicas de muestreo para la cuantificación de gases de efecto invernadero en embalses de montaña. *Acta Agronómica*. Recuperado de:

*Agronómica*. Recuperado de:

<https://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=Adaptaciones+metodol%C3%B3gicas+de+muestreo+para+la+cuantificaci%C3%B3n+de+gases+de+efecto+invernadero+en+embalses+de+monta%C3%B1a.&btnG=&lr=#0>

Lima, I., Ramos, F., Bambace, L., Rosas, R., (2008). Methane Emissions from Large Dams as Renewable Energy Resources: A Developing Nation Perspective. *Miting adapt Strat Glob Change*, 13, 193-206.

Loaiza, S., (2016). *Cuantificación de gases de efecto invernadero generados en represa y embalses tropicales: caso Calima – Valle del Cauca*. Universidad Nacional de Colombia,

Palmira, Colombia. Recuperado de:

[http://www.bdigital.unal.edu.co/53862/1/Sandra\\_Patricia\\_Loaiza-2016.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/53862/1/Sandra_Patricia_Loaiza-2016.pdf)

Macías, A.M., & Andrade, J. (2013). *Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático*. Recuperado de:



[http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/generacion\\_electrica\\_bajo\\_escenarios\\_cambio\\_climatico.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/generacion_electrica_bajo_escenarios_cambio_climatico.pdf)

Palacios, R., (2013). *Inventario documentado de represas en Colombia*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11360/1/PalaciosSierraRicardoAndres2013.pdf>

Palau, A., Alonso, M., & Corregidor, D. (2010). Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (río Ter, NE España). *Ingeniería del agua*, 17(3), 247-255. Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12515/palau.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Palau, A & Alonso, M. (2008). *Embalses y cambio climático*. Recuperado de: <http://endesabiodiversidad.com/uploads/pubs/Embalses-y-cambio-climatico.pdf>

Parekh, A., Kenway, P., (2011). *Monitoring poverty and social exclusion in wales*, York: Joseph Rowntree Foundation.

Paucar, M., (2014). *Estudio de emisiones de metano producidas por embalses en centrales hidroeléctricas en Ecuador*. Pontifica universidad católica de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de:

<http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1492/1/T-SENESCYT-00625.pdf>

Peña, C.F. (2015). *Modelación Numérica del Comportamiento de la Presa del Proyecto Hidroeléctrico El Guavio*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Recuperado de: [file:///C:/Users/user/Downloads/CF-Maestr%C3%ADa%20en%20Ingenier%C3%ADa%20Civil-1057582512%20\(11\).pdf](file:///C:/Users/user/Downloads/CF-Maestr%C3%ADa%20en%20Ingenier%C3%ADa%20Civil-1057582512%20(11).pdf)

Rocha Lessa, A. C., dos Santos, M. A., Lewis Maddock, J. E., & Santos Bezerra, C. Dos. (2015). Emissions of greenhouse gases in terrestrial áreas pre-existing to hydroelectric plant reservoirs in the Amazon: The case of Belo Monte hydroelectric plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1728–1736. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.067>

Sánchez, M., (2016). *El clima tropical*. Meteorología en red. Recuperado de: <http://www.meteorologiaenred.com/el-clima-tropical.html>

Soito, J. L. D. S., & Freitas, M. A. V. (2011). Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3165–3177. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.006>

UPME. (2013). Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia. Recuperado de:  
[http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion\\_demanda\\_e\\_e\\_Abr\\_2013.pdf](http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_e_e_Abr_2013.pdf)

UPME (2015). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano*. Subdirección de energía eléctrica – grupo de generación. Recuperado de:  
[http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento\\_Variables\\_Diciembre\\_2015.pdf](http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento_Variables_Diciembre_2015.pdf)

UPME (2015). *Plan de expansión de referencia generación – transmisión, 2015-2029*.

Recuperado de:

[http://www.upme.gov.co/Docs/Plan\\_Expansion/2016/Plan\\_Expansion\\_GT\\_2015-2029/Plan\\_GT\\_2015-2029\\_VF\\_22-12-2015.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2016/Plan_Expansion_GT_2015-2029/Plan_GT_2015-2029_VF_22-12-2015.pdf)

UPME. (2016). *Embalses*. Sistema de información eléctrico Colombiano. Recuperado de:  
[http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneracion%2fEmbalses+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fGeneracion%2fEmbalses+(SIN))

Uribe, M. (2014). *Evaluación de la huella hídrica azul y gris de la central hidroeléctrica Miel I de Isagen S.A E.S.P.* Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Recuperado de:  
<https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/5305/Proyecto%20de%20Grado%20final%20-%20Marcela%20Uribe%20Vanegas.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

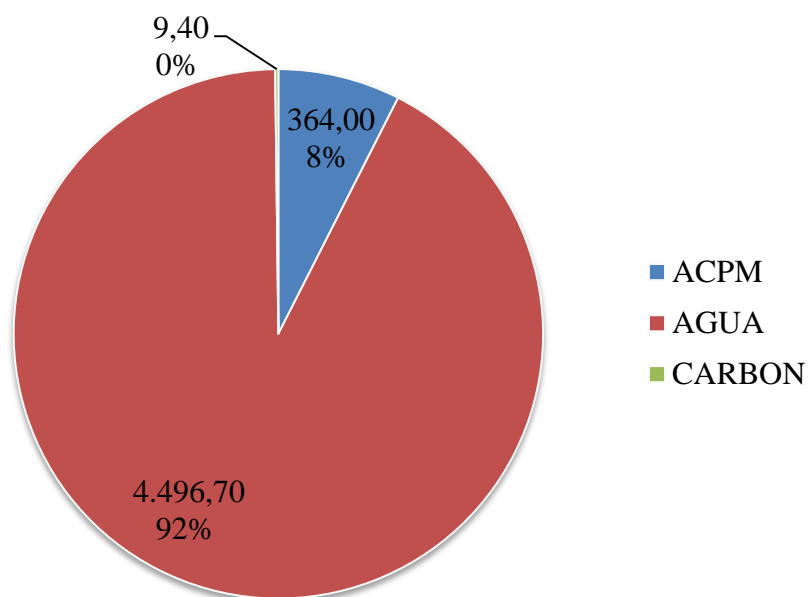
- URRA S.A. (2015). *Descripción técnica hidroeléctrica Urra I*. Recuperado de:  
<http://urra.com.co/descripcion-tecnica/>
- Weisser, D. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, 32(9), 1543–1559. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>
- Yang, L., Lu, F., Zhou, X., Wang, X., Duan, X., & Sun, B. (2014). Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. *Acta Ecologica Sinica*, 34(4), 204–212. <http://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.05.011>
- Zhang, J., Luo, C.-Y., Curtis, Z., Deng, S., Wu, Y., & Li, Y. (2015). Carbon dioxide emission accounting for small hydropower plants—A case study in southwest China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 755–761. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.027>

## ANEXOS

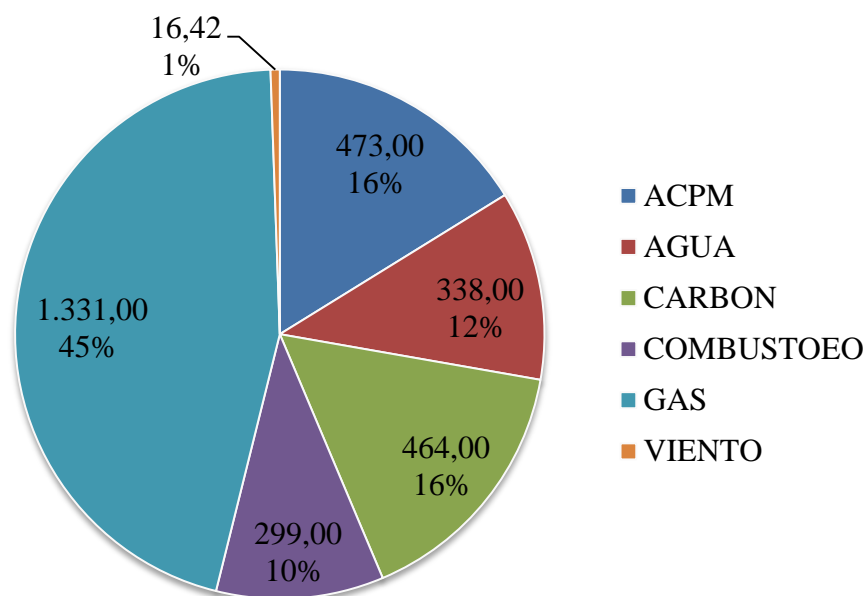
**Anexo A:** distribución de la capacidad instalada en el país por área eléctrica y su participación por recurso en (%).

**Anexo A.1:** Capacidad instalada en el área eléctrica de Antioquia (MW, %).

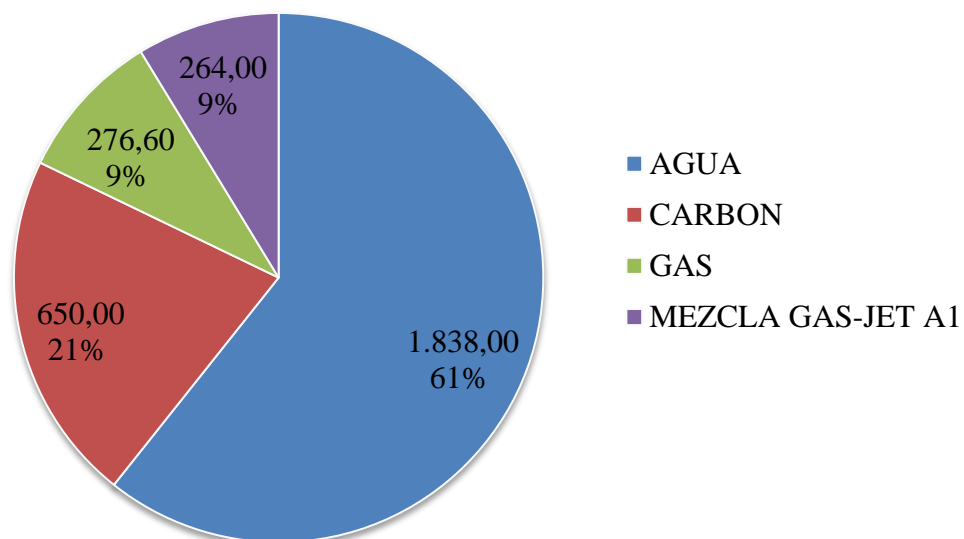
Fuente: (UPME, 2015).



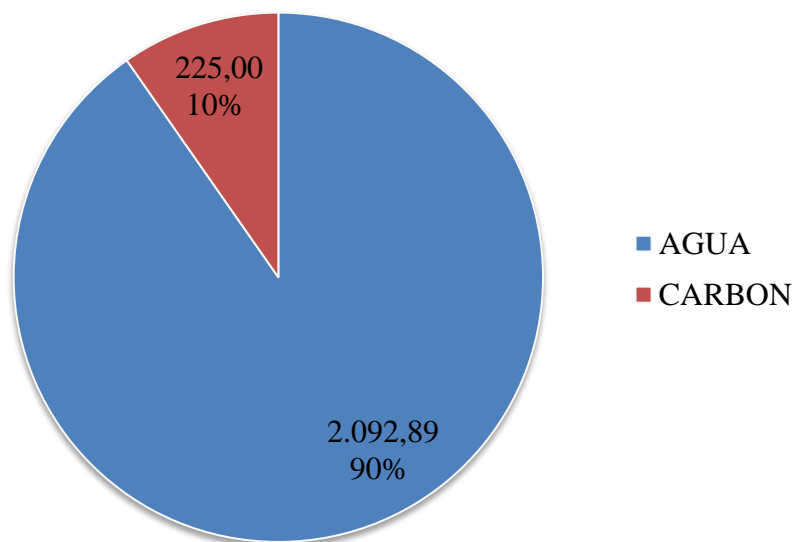
**Anexo A.2:** Capacidad instalada en el área eléctrica del Caribe (MW, %). Fuente: (UPME, 2015).



**Anexo A.3:** Capacidad instalada en el área eléctrica Nordeste (MW, %). Fuente: (UPME, 2015).



**Anexo A.4:** Capacidad instalada en el área eléctrica Oriental (MW, %). Fuente: (UPME, 2015).



**Anexo A.5:** Capacidad instalada en el área eléctrica Suroccidente (MW, %).

Fuente: (UPME, 2015).

