

**CALCULO DE HUELLA DE CARBONO DE UNA PLANTA DE AGUA RESIDUAL DE
UN PARQUE INDUSTRIAL UBICADO EN MALAMBO, ATLANTICO**



**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ADMINISTRADOR
AMBIENTAL**

PROGRAMA: ADMINISTRACION AMBIENTAL

Autor:

Hellman Junior Iglesias Fernández

James Elioenai Laguna Ibarra

Universidad de la Costa CUC

Departamento de Civil y Ambiental

Barranquilla, Colombia

2021

**CALCULO DE HUELLA DE CARBONO DE UNA PLANTA DE AGUA RESIDUAL DE
UN PARQUE INDUSTRIAL UBICADO EN MALAMBO, ATLANTICO**

Autor: Hellman Junior Iglesias Fernández

James Elioenai Laguna Ibarra

Tutor: Dilson Goethe

Cotutor: Fabian Atencio

Línea de investigación: Gestión y Sostenibilidad Ambiental

Barranquilla, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, junio de 2021

Dedicatoria

A Dios, por darme la vida, por permitirme llegar a donde estoy, y saber que ha sido mi fortaleza y mi calma cuando lo he necesitado. Gracias por darme la perseverancia y la sabiduria para lograr mis metas.

A mis Padres, por todo sus esfuerzos y su incondicional e inconmensurable amor, han sido mi motivacion para seguir luchando cada dia.

A mi hermana Laura, tu siempre has sido mi inspiracion. Por lo que has logrado, has sido mi empujon para yo arriesgarme a cualquier situacion.

A mi hermano Andres, un dia te dije que mis sueños los cargo con los tuyos. Este trabajo tambien es para ti.

A mis amigos Katheryn, Cristian y Fredy, ustedes me demostraron la paciencia, la perseverancia y el animo para seguir persiguiendo mis sueños, fueron mi calma en mis dias de angustia y desespero por culminar este trabajo.

A la Banda; soñamos desde que somos niños, cada uno esta cumpliendo sus sueños en el tiempo de Dios, son parte de este trabajo de grado para cumplir con ese engranaje que tenemos de soñadores y eso fue motivacion para culminar esta investigacion.

A mi compañero James y mis tutores Dilson y Fabian, gracias por el trabajo en equipo, por las manos de cada uno cuando me encuentre en el suelo, por cada uno de sus conocimientos y el tiempo dedicado a este trabajo de grado.

Para ti, que si llegaste a este trabajo de grado buscando ayuda. No dejes de soñar nunca.

Hellman Junior Iglesias Fernandez

Dedicatoria

A Dios, primeramente, por haberme abierto las puertas de estudio en una universidad, trabajar en este proyecto, darme sabiduría, tiempo, y disciplina para llevar a cabo esta investigación.

A mis padres, por preguntarme cada 2 minutos como iba mi tesis, por darme la posibilidad y la motivación de pensar que se puede realizar lo que siempre se quiere.

A mis hermanos, por su ayuda y motivación durante el periodo de la universidad, el cual soy un ejemplo para seguir para ellos.

A mi compañero Helman y tutores Dilson y Fabian, por haberme entusiasmado a realizar el proyecto de grado, por su dedicación, orientación y asesoramiento en la elaboración del proyecto.

A Álvaro Valdivieso, por asesorar indirectamente el trabajo, por su disponibilidad, apoyo y su colaboración prestada en la última etapa del proyecto a grado.

Al Ing. Alfonso López y a PIMSA, por abrirnos las puertas de las instalaciones y compartir su información para realizar nuestro proyecto de grado.

Por último, agradezco a todos mis compañeros de facultad, por su amistad y apoyo durante todo el proceso de estudio.

James Elioenai Laguna Ibarra

Agradecimientos.

“Den gracias a Dios en toda situacion, porque esta es su voluntad para ustedes en Cristo Jesus.” 1 Tesalonicenses 5:18

A Dios, proveedor supremo que nos ha acompañado y guiado a lo largo de la carrera, por ser la fortaleza en momentos de frustracion, ademas por brindarnos la oportunidad de obtener nuevos conocimientos y vivir cada dia nuevas experiencias que atestiguan que nunca hemos estado solos.

A la Universidad de la Costa por su apoyo y por brindarnos la posibilidad de convertirnos en unos profesionales excepcionales. A nuestros tutores Dilson Goethe y Fabian Atencio, quienes con sus conocimientos y apoyo nos guiaron a traves de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscabamos.

Queremos agradecer al ingeniero Alfonso Lopez por brindarnos todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigacion, la confianza en abrirnos las puertas de las instalaciones de PIMSA. A nuestro colega Alvaro Valdivieso, por ayudarnos en la etapa final y ser la guia de luz al final del tunel.

Agradecemos a todos los profesores del programa de Ingenieria y Administracion Ambiental y el programa Administracion de Empresas, porque diariamente nos impartieron sus conocimientos con toda la vocacion al servicio y por su amistad. En especial a nuestros compañeros: Jose, Natalia, Carolina, Maria, Broyer, Luisa, Enmanuel, excelentes profesionales que con mucha responsabilidad contribuyeron enormemente en nuestra formacion academica.

Hellman Iglesias y James Laguna

Resumen

Las actividades de saneamiento en Colombia emiten un 4% del total de Gases de efecto invernadero, de las cuales un 1,3% está representado por la emisión de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Esta investigación tiene como objetivo estimar la huella de carbono de la planta de tratamiento de aguas residuales de un Parque Industrial ubicado en el municipio de Malambo, Atlántico. Para ello se tomó como referencia las directrices del Greenhouse Gas Protocol Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte (edición revisada) del World Resource Institut - WRI y el World Business Council for Sustainable Development WBCSD, en la que se estructuraron las siguientes etapas: Fase A: Caracterización de procesos, Fase B: Calculo de Emisiones, Fase C: Calculo de Remoción y Fase D: Formulación de Estrategias de mejora. Se concluye que las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero son de 6925 TonCO₂e/año para el 2019, la cual se ve reducida a 6490 TonCO₂e/año por las remociones cuyo valor es de 434 Ton/hectarea. En tal sentido, dado estos resultados, es posible inferir que alrededor del 94% de las emisiones emitidas pueden ser compensada por 1 hectárea de *Roystonea Regia*, finalmente estos resultados sugieren que es probable que dadas las extensiones en hectáreas del complejo industrial y partiendo de su diversidad biológica podría existir una emisión neutral.

Palabras Clave: Huella de Carbono, Planta de Agua Residual, Remoción, Ecuaciones

Alometrica

Abstract

Sanitation activities in Colombia emit 4% of total greenhouse gases, of which 1.3% is represented by the emission of Wastewater Treatment Plants. This research aims to estimate the carbon footprint of the wastewater treatment plant of an Industrial Park located in the municipality of Malambo, Atlántico. For this, the guidelines of the Greenhouse Gas Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (revised edition) of the World Resource Institute - WRI and the World Business Council for Sustainable Development WBCSD were taken as a reference, in which the following stages were structured: Phase A: Process characterization, Phase B: Emissions calculation, Phase C: Removal calculation and Phase D: Formulation of improvement strategies. It is concluded that the total emissions of Greenhouse Gases are 6925 TonCO₂e / year for 2019, which is reduced to 6490TonCO₂e / year due to the removals whose value is 434 Ton / hectare. In this sense, given these results, it is possible to infer that around 94% of the emissions emitted can be offset by 1 hectare of *Roystonea Regia*, finally these results suggest that it is probable that given the extensions in hectares of the industrial complex and starting from its biological diversity there could be a neutral emission.

Keywords: Carbon Footprint, Wastewater Plant, Removal, Allometric Equation

CONTENIDO

Introducción	14
1. Problema.....	16
1.1. Planteamiento del Problema.....	16
1.2 Formulacion del Problema	19
2. Objetivos de la Investigación	19
2.1 Objetivo general	19
2.2 Objetivo especifico	19
3. Justificación.....	20
4. Marco de Referencia.....	23
4.1 Marco Teórico de la Investigación.....	23
4.1.1 Calentamiento Global	23
4.1.2 Efecto Invernadero y Gases de Efecto Invernadero	24
4.1.3 Actividades Productivas y Gases de Efecto Invernadero	26
4.1.4 Saneamiento Básico.....	28
4.1.5 Tratamiento de Agua Residual	28
4.1.6 Huella de Carbono	31
4.1.7 Metodologías para la medición de la huella de carbono (HdC)	32
4.1.8 Sumidero de Carbono	34
4.1.9 Metodologías de Huella de Carbono que incluya Compensación	35
4.2 Marco Legal	36
4.3 Estado del Arte	39
5. Marco Metodológico	42
6. Resultados.....	51
6.1 Fase A.....	51
6.1.1 Ubicación del Parque Industrial de Malambo S.A	51
6.1.2 Descripción del Sistema de Tratamiento	52
6.1.3 Recopilación de Datos	57
6.2 Fase B.....	64
6.2.1 Vertimiento Industrial Tratado	67
6.2.2 Materia Orgánica Degradable en las Aguas	67

6.2.3 Consumo de Energía.....	68
6.3 Fase C.....	70
6.3.1 Captura de CO2 vs Biomasa Aérea	75
6.3.2 DAP vs Biomasa Aérea	76
6.3.3 Abundancia según su Clase Diamétrica	77
6.4 Fase D.....	78
6.4.1 Análisis de emisión-compensación	78
6.4.2 Estrategias de Mejora	79
7. Conclusiones.....	82
8. Recomendaciones	84
Bibliografía	85

Lista de Figuras

Figura 1; Efecto Invernadero.	25
Figura 2; Localizacion general e imagen satelital de PIMSA y sistema de tratamiento.....	51
Figura 3; Esquema Básico del Sistema de Tratamiento – Lagunas de oxidación	53
Figura 4; Lagunas de Oxidación	54
Figura 5; Motobomba centrifuga de 10HP	55
Figura 6; Huella de Carbono en porcentajes según su alcance.....	69
Figura 7; Zona de muestreo	70
Figura 8; Porcentaje de CO2 captado de cada árbol	74
Figura 9; Captura de CO2 vs Biomasa aérea	75
Figura 10; DAP vs Biomasa aérea de la especie	76
Figura 11; Abundancia de arboles según su DAP	77
Figura 12; Porcentaje de emisiones de GEI vs Compensación	79

Lista de Tablas.

Tabla 1; GEI y su potencial de Calentamiento Global para un horizonte de 100 años	26
Tabla 2; Tratamientos biológicos según eficiencia remocional de DBO entre el 85-95%	30
Tabla 3; Metodologías internacionales	33
Tabla 4; Normatividad del Cambio climático en Colombia	36
Tabla 5; Fases de la Metodología	43
Tabla 6; Tipos de Alcance	45
Tabla 7; Herramienta de Calculo	47
Tabla 8; Resultados de la entrada del Sistema de Tratamiento de aguas residuales en PIMSA...	58
Tabla 9; Resultados de salida del sistema de tratamiento de aguas residuales en PIMSA	60
Tabla 10; Fuentes de emisión según su alcance y datos de actividades	65
Tabla 11; Factores de emisión para tratamiento de aguas residuales industriales	66
Tabla 12; Variables para el cálculo de la remoción de biomasa aérea	71
Tabla 13; Dióxido de Carbono capturado por las especies	73
Tabla 14; Tabla de Frecuencia	77

Lista de Ecuaciones.

Ecuación 1; Emisión de gases de efecto Invernadero	46
Ecuación 2; Emisión CO ₂ eq	46
Ecuación 3; Ecuación alométrica para estimar remoción	48
Ecuación 4; Ton/ha de C almacenado	49
Ecuación 5; Ton CO ₂ removido	49
Ecuación 6; Balance	50
Ecuación 7; Conversión de L/s a L/año	61
Ecuación 8; Concentración DQO*capacidad de bombeo	62
Ecuación 9; Conversión de mg a Kg	62
Ecuación 10; Total de materia orgánica en aguas residuales	62
Ecuación 11; Conversión de HP a MW	63
Ecuación 12; Numero de horas en un año	63
Ecuación 13; Consumo de energía	64
Ecuación 14; Factor de emisión	66
Ecuación 15; Total de misión de Residuos líquidos industriales	67
Ecuación 16; Conversión de Kg a Ton	67
Ecuación 17; Total de emisión de materia orgánica degradable	67
Ecuación 18; Total de emisión de consumo de energía	68
Ecuación 19; Emisiones de GEI consolidadas	68
Ecuación 20; Balance de Emisiones	78

Introducción

El Calentamiento Global es el aumento de la temperatura del planeta Tierra. Según la investigación científica (ONU, 2020) el mundo está muy lejos de cumplir los objetivos prometidos en el Acuerdo de Paris en 2015. Se estima que en el 2020 hubo una disminución entre el 4% y 7% a causa de las medidas del confinamiento por la Pandemia del COVID-19, sin embargo, las concentraciones ya están regresando a niveles previos a la pandemia, asegura la ONU (ONU, 2020).

De igual forma el Calentamiento global y los gases de efecto invernadero ya no son ajenos a las empresas, en los últimos 50 años, al menos 20 empresas están detrás del 33% de las emisiones de GEI a nivel mundial (Taylor & Watts, 2019). En Colombia en los últimos 24 años se aumentó las emisiones de GEI en un 10% (Semana, 2018). Las empresas y sus tratamientos a los vertimientos son grandes generadores de GEI, se prevé que se genera entre un 3% y 7% de GEI. El Parque Industrial de Malambo (PIMSA) administra y presta servicio de acueducto y alcantarillado a las empresas que desarrollan sus procesos productivos. Por lo cual generan GEI en el tratamiento de las aguas residuales, PIMSA desea implementar medidas de cuantificación, seguimiento, verificación de emisiones y/o remociones de los GEI de su organización para crecer ambientalmente, ser margen de responsabilidad ambiental y contribuir con la lucha contra el cambio climático a nivel internacional.

El sector privado juega un papel protagonista en este sentido, debiendo establecer estrategias para reducir sus emisiones de GEI, una de ellas es: midiendo su huella de carbono en todas las actividades de la empresa y extendiéndola a su cadena de suministro para establecer objetivos públicos de reducción de emisiones a corto y largo plazo.

En el presente documento se recogen los resultados de la estimación de la huella de carbono de la planta de aguas residuales de un Parque Industrial ubicado en el municipio de Malambo, Atlántico, así como la metodología para la cuantificación de los gases de efecto invernadero en los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales que puede servir de guía para otras compañías, convirtiéndose en un insumo indispensable para la replicación de experiencia similares. Por otro lado, se ilustrará la remoción de GEI por la biomasa a partir del levantamiento de un inventario forestal en el área de influencia directa de la planta de tratamiento y por último se proponen estrategias de mejorar el proceso a fin de reducir o compensar el impacto hacia el cambio climático.

1. Problema

1.1. Planteamiento del Problema

El calentamiento global (CG) es el aumento observado en más de un siglo de la temperatura del sistema climático de la Tierra; es un fenómeno cuyas causas antropogénicas obedece a la quema de combustibles fósiles; la contaminación generada por los residuos sólidos, la sobrepoblación, el uso indiscriminado de recursos naturales, la deforestación progresiva, la industrialización. El CG es un sinónimo que se ha utilizado para describir el fenómeno que altera la vida a las personas y comunidades, presenta además un impacto negativo desgastando la atmosfera, incrementando los patrones climáticos y exponiendo al planeta a condiciones meteorológicas extremas (Godoy & Espinoza, 2018).

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2018), en el mundo, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) alcanzaron 405,5 partes por millón (ppm) en el año 2017, incrementando en cerca de un 82% en la última década desde 1990, se ha producido un incremento del 41% del forzamiento radiactivo total causado por los GEI de larga duración. Además, cerca del 40% el metano que se emite en la atmosfera procede de fuentes naturales, mientras que un 60% proviene de actividades humanas como la ganadería de rumiantes, cultivo de arroz, explotación de combustibles fósiles.

Adicionalmente en el año 2017 el metano atmosférico alcanzo un nuevo máximo de 1859 ppm, por lo que se sitúa actualmente en un 257% de su nivel preindustrial, para el mismo año la concentración atmosférica del Óxido Nitroso fue de 329,9 ppm, es decir, un 122% de su nivel en la era preindustrial, es el causante de un 6% del forzamiento radiactivo provocado por los GEI.

Según cifras de la OMS (OMS, 2018), unos 7 millones de personas en el mundo mueren prematuramente todos los años a causa de enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica. Por lo que el cambio climático se ha suscitado como un fenómeno alarmante para dirigentes políticos, sectores productivos y sociedades en general. Un estudio del Banco Mundial (Semana, 2016) y el instituto de mediciones y evaluación de Salud, advierte que la contaminación atmosférica se ha transformado en la contaminación más letal y el cuarto factor principal de riesgos de fallecimiento, estos fallecimientos costaron a la economía mundial aproximadamente US\$5 billones. Para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), el costo global de las muertes causadas por alta contaminación del aire se ubicaría entre los US\$18 y los \$25 billones al año para el 2060.

Ahora bien, en America Latina, Peru, Chile, Mexico, Brasil, Colombia fueron los paises mas contaminados durante el 2019 según un informe de la Plataforma Air Visual (Expok, 2019). America Latina (AL) y el Caribe a pesar de solo representar cerca del 5% de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. (CNN, 2017). Es especialmente vulnerable a los efectos predisibles del cambio climatico debido a su ubicación geografica, distribucion territorial de su poblacion, e infraestructura, y dependencia de recursos naturales fragiles para actividades economicas y modos de sustento. (W. Vergara, 2013). Los daños ambientales originados por el calentamiento global para el 2019, podrian generar una caida del PIB mundial en un 15% (Semana, 2019). Para el 2030, el cambio climatico costara 80 millones de puestos de trabajo (ONU, 2019), lo que conllevaria con perdidas economicas valuadas en USD \$ 2,3 trillones. El Banco mundial advierte que si no se toman medidas de adaptacion con urgencia los impactos del cambio climatico podrian empujar a la pobreza a 100 millones de personas en 2030.

De igual forma, según el Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático (SIAC, 2017) los impactos del cambio climático en Colombia por los componentes sectoriales suman el 4,3% del PIB, (Duarte, 2014) se espera que en el país para el año 2015, las pérdidas de PIB a causa del cambio climático sean relativa en un 4,5% del PIB nacional.

Teniendo claro lo anterior, en Colombia en los últimos 24 años se aumentó en un 10% la emisión de GEI (Semana, 2018). El país ocupa el puesto 34 entre 184 países monitoreados en emisiones de gases y el quinto lugar en América Latina. Según datos del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC, 2015), el sector agropecuario es la principal fuente de emisión de GEI del país, no obstante, las actividades de saneamiento emiten un 4% de GEI en el país, de las cuales un 1,3% está representado por las emisiones de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en lugares con alcantarillados alcanzando una cifra de 9,2 Mton CO₂ eq (IDEAM, 2016).

Por otro lado, la region Caribe Colombiana en el año 2012 emitia el 43,29% de GEI a nivel nacional, el departamento del Atlantico llego a la cifra de 7,42%; el sector de saneamiento a causa de disposicion de rellenos, tratamientos de aguas residuales y la incineracion de desechos el departamento del Atlantico llego a una cifra de 0,49% (IDEAM, 2016).

En tal sentido, la planta de tratamiento de agua residual en el Parque Industrial de Malambo es contribuyente de GEI, anualmente tratan aproximadamente 10983 kg de aguas residuales industriales que contienen en promedio 86,04 DBO₅ y 114,56 de DQO.

1.2 Formulacion del Problema

La intención de desarrollar la siguiente es la consecución de la respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cuál es el aporte de emisiones de CO₂ generados en el año 2019 por la planta de tratamiento de aguas residuales en el Parque Industrial del municipio de Malambo, Atlántico?

2. Objetivos de la Investigación

2.1 Objetivo general

Estimar la huella de carbono de la planta de tratamiento de aguas residuales de un Parque Industrial ubicado en el Municipio de Malambo, Atlántico

2.2 Objetivo específico

- Describir el proceso de tratamiento de aguas residuales del Parque Industrial de Malambo
- Cuantificar la cantidad de Gases de Efecto Invernadero emitidos directa e indirectamente por la planta de tratamiento de agua residual.
- Proponer estrategias de mejora para reducir y/o compensar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero emitidos por la planta de tratamiento de aguas residuales del Parque Industrial de Malambo.

3. Justificación

En Colombia los GEI en el sector industrial emiten cada año 21,3 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente, lo cual representa el 12% del total de las emisiones asociadas en su mayoría al desarrollo de actividades como: transporte de mercancías, uso de compuestos químicos, consumo de materias primas, consumo de energía, generación de residuos, vertimientos de aguas residuales entre otros (MinCIT, 2014).

La generación y el tratamiento de las aguas residuales contribuye un factor relevante frente al cambio climático, ya que su generación representa entre un 3% y un 7% de todas las emisiones contaminantes. Además de esto, se estima, que entre el 80-90% de estas aguas son liberadas al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento, lo que puede generar emisiones de metano y óxido nitroso en las aguas receptoras (ONU, 2020)

La huella de carbono- HdC es un indicador de sostenibilidad que permite cuantificar las emisiones de los gases de efecto invernadero- GEI asociado al desarrollo de una determinada actividad. La HdC se ha posicionado como una de las formas más destacadas para optimizar en el consumo de energía y optimizar el uso de los recursos materiales en los procesos. Por tanto, valora objetivamente los impactos generados por la emisión de los GEI de una persona, organización, evento o producto sobre el medio ambiente (Estévez, 2017)

En la última década las investigaciones sobre la huella de carbono han aumentado significativamente, la importancia de un indicador ambiental que demuestre la contribución frente al cambio climático, ha ayudado a las empresas, organizaciones o industrias a formular políticas ambientales para reducir los gases de efecto de invernadero mediante el uso eficiente de los recursos y la producción más limpia, generando consigo mejoras en la imagen de la

empresa, mayor competitividad en el mercado y atracción hacia la financiación de proyectos para la mejora de desempeño ambiental de la organización. (Grupo Bancolombia, 2020).

La pandemia del COVID-19 ha sido oportunidad para que los empresarios inviertan en los bonos de carbono que son figuras económicas que permiten la creación de fondos para la realización de proyectos de recuperación ambiental y que reduzcan su huella de carbono. Un estudio realizado por el Foro Económico Mundial FEM (Toro, 2021) asegura que Colombia tiene un 3% de proyectos de soluciones ambientales, para el año 2020 (Perilla, 2020) el Banco de Bogotá financio con 300.000 millones de COP a proyectos que respondan las categorías establecidas, una de ellas es el tratamiento de aguas residuales, lo que interesaría PIMSA para formar parte de proyectos orientados en la conservación del medio ambiente.

La medición de huella de Carbono es uno de los temas de interés para la administración del Parque Industrial Malambo, dado que según la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial-ONUUDI, este represente un epicentro ideal para la reconversión ideológica hacia un parque eco-industrial, que a partir del concepto adoptado en la Guía Reconversión de Parques Industriales Sostenibles resulta relevante conocer y gestionar el % de reducción de dióxido de carbono equivalente como una métrica de los componentes de sostenibilidad de la organización.

Así mismo, se entiende la complejidad que puede ser una transición de un parque industrial hacia un parque ecoindustrial, en cierto sentido, el parque busca involucrar de forma paulatina todos los procesos entre ellos, por lo cual la medición de la huella de carbono a las organizaciones es con el fin de definir de manera conjunta estrategias de reducción de gases de efecto invernadero que le permitan obtener la certificación de carbono neutro, lo cual generaría reconocimiento a nivel nacional e internacional, siendo esta primera experiencia un

modelo replicable para otras plantas de agua residual que deseen la implementacion de medidas de reduccion para huella de carbono.

Los resultados de la presente investigación son de gran relevancia científica dado que hay pocas investigaciones de este tema en específico, en el cual se podrá brindar nuevos conocimientos y resultados referente al marco metodológico y operativo a la sociedad científica, empresarios, profesionales investigadores que deseen ampliar o fortalecer los conocimientos relacionados con el abordaje de la investigación.

4. Marco de Referencia

4.1 Marco Teórico de la Investigación

4.1.1 Calentamiento Global

El Calentamiento global (CG) es un fenómeno físico que se ha ido incrementando, generando efectos negativos que están afectando cada vez más los ecosistemas terrestres. El CG ha sido de la mano con una tendencia hacia un incremento en el CO₂ atmosférico, lo que indica que la causa de esta tendencia hacia el calentamiento es una intensificación del efecto invernadero (Mondragón, Sandoval, & Breña, 2019).

El CG es un fenómeno ecológico relacionado con el aumento de la temperatura de la Tierra en los últimos siglos (DW, 2020), este fenómeno es causado por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Para (Roldan, 2017) el CG se refiere al aumento gradual de la temperatura terrestre, aire y océanos.

4.1.1.1 Consecuencias del Calentamiento Global

El CG ya se ha sentido en nuestro planeta, quizás uno de los más claros es que los glaciares se derriten; la tendencia hacia un aumento en el nivel del mar es lenta pero segura, con lo que las ciudades costeras se encuentran en riesgo cada vez más grande de inundaciones (Caballero, Lozano, & Ortega, 2017).

La razón de este incremento del CO₂ atmosférico puede estar ligada con procesos naturales, como también una significación del componente humano, dado que la combustión de carbón, petróleo y gas, la deforestación, el desarrollo de la ganadería, el uso de fertilizantes y gases fluorados han ocasionado un aumento en la cantidad de CO₂ atmosférico, incrementando el efecto invernadero y contribuyendo al CG (CE, 2018). Es difícil cuantificar

que proporción del CG es atribuible a causas naturales y que proporción es atribuible a causas humanas.

Afectará además los patrones climáticos, modificando cuando y cuanto llueve en cada región y esto tiene consecuencias económicas y ecológicas. Es claro que la agricultura será una rama de la actividad humana muy vulnerable al cambio climático, pero también lo será la salud, ya que habrá cambios en la distribución de muchas enfermedades, por mencionar un ejemplo (Caballero, Lozano, & Ortega, 2017).

4.1.2 Efecto Invernadero y Gases de Efecto Invernadero

El Efecto Invernadero (EI) se refiere a un mecanismo por medio del cual la atmósfera de la Tierra se calienta (Caballero, Lozano, & Ortega, 2017). Para (Jurado & Lizcano, 2015) el EI es un fenómeno que ocurre en forma natural en la atmósfera (ver *Figura 1*) al que se les atribuye a los gases componentes de la atmósfera planetaria, los cuales retienen parte de la energía emitida por el suelo cuando este ha sido calentado por la radiación solar y reenviando de nuevo dicha energía en forma de calor a la tierra. El efecto invernadero ayuda a que la energía recibida por la radiación solar no regrese inmediatamente al espacio, esto hace que exista en el planeta una temperatura aceptable para el desarrollo de la vida.

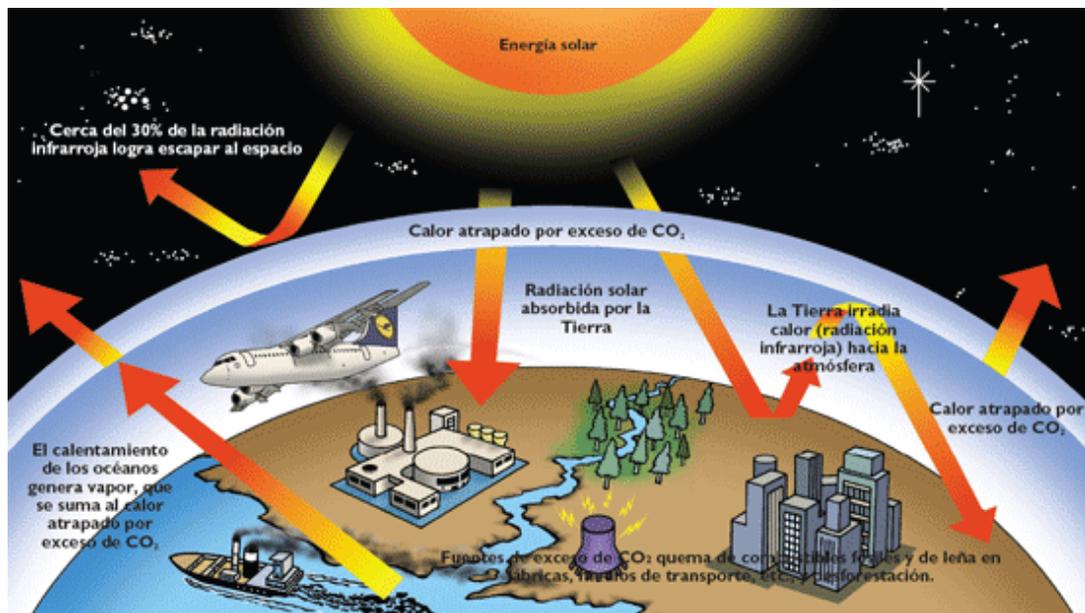


Figura 1; Efecto Invernadero. Fuente: (Sepúlveda, 2013)

El EI es necesario en cierto grado, pero su crecimiento en el planeta debido a las altas emisiones de gases contaminantes como el metano y el dióxido de carbono generado por la actividad humana, hace que exista un calentamiento global traducido en un cambio climático el cual ya es un problema ambiental (Jurado & Lizcano, 2015).

Los gases que ocasionan el efecto invernadero son: Dióxido de Carbono (CO₂); Metano (CH₄); Monóxido de Nitrógeno (N₂O); Ozono (O₃); Clorofluorocarbonos (CFC); Vapor de Agua (H₂O)

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC) (Ccoalition, 2020) utiliza el concepto de potencial de calentamiento mundial (PCM) para comparar la capacidad que distintos gases tienen que atrapar el calor en la atmósfera en comparación con el dióxido de carbono. La siguiente tabla nos enseña la contribución que incluye cada una de estas sustancias mencionadas anteriormente.

Tabla 1

GEI y Su Potencial de Calentamiento Global para un Horizonte de 100 Años

Gases de Efecto Invernadero – GEI		Potencial de Calentamiento Global (para obtener CO ₂ e multiplicar por)	
		IPCC 2007	IPCC 2013
Dióxido de Carbono	CO ₂	1	1
Metano	CH ₄	25	28
Óxido Nitroso	N ₂ O	298	265
Hidrofluorocarbonados	SF ₆	22800	23.500
Hidrofluorocarbonados	HFC'S	124 – 14.800	<13.900
Perfluorocarbonados	PFC'S	7390 – 12.200	<12400
Trifluoruro de Nitrogeno	NF ₃	----	17.200

Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Modificado: Autores

Todos estos gases también llamados gases de efecto invernadero atrapan una gran cantidad de energía expresada en calor, haciendo que el planeta se caliente; la problemática se centra en que la producción de estos gases ha aumentado hace más de un siglo y medio desde que empezó la revolución industrial, teniendo valores críticos en las últimas décadas (Sepulveda, 2011).

4.1.3 Actividades Productivas y Gases de Efecto Invernadero

Los procesos productivos producen GEI y, en particular, con las trayectorias del crecimiento económico de los países. De entre los distintos sectores productivos, no todos contribuyen por igual a la emisión de GEI.

El Sector Transporte (Vargas, 2018), genera más del 14% de los GEI alrededor del mundo de los cuales 75% equivale a transporte terrestre, por tal motivo es prioritario migrar a fuente limpias de energía y medios de transporte alternativos para disminuir su incidencia.

En el Sector Institucional, los colegios e instituciones de educación superior (Manso, Parrad, & Aristizabal, 2017) están involucradas en el consumo de combustibles fósiles, consumo de energía eléctrica, consumo de agua y papel, generación de residuos sólidos y residuos peligrosos, siendo de mayor parte a la generación de GEI.

Sector Agropecuario (Gonzalez & Annika, 2007); en varios procesos de este sector se emiten cantidades significativas de estos gases. Podemos encontrar: emisiones de NO₂ por aplicación de fertilizantes sintéticos, emisiones de NO₂ por aplicación de estiércol, emisiones de NO₂ por el almacenamiento y manejo de estiércol, emisiones de CH₄ debido al estiércol, emisiones de CH₄ a causa de la fermentación entérica, emisiones de CH₄ debido a anegamientos en cultivos de arroz.

Uso y Cambio del uso del Suelo (PROCLIM; INRENA, 2005), tiene en particular relevancia para la evolución futura de las emisiones de GEI, sin embargo, aún deben ser discutidas medidas de mitigación de GEI.

Sector Residuos (Salmeron, y otros, 2017); en la actualidad, la generación total de residuos a nivel mundial es de 17 millones de toneladas anuales, para el 2050 se estima que llegara a 27 millones de toneladas; de esta cantidad 1.3 millones de toneladas son Residuos sólidos Urbanos (RSU). Entre 1995-2005 las emisiones de GEI generados por RSU depositados en vertederos aumentaron aproximadamente en un 12%. Las emisiones aportadas por el biogás que se produce durante la descomposición de RSU en los vertederos, contienen CO₂, CH₄ y NO₂, contaminantes que generan una problemática al ambiente y bienestar público, intensificando de esta manera las concentraciones de GEI en la atmosfera y contribuyendo al efecto invernadero natural a través de emisiones antropogénicas que aportan al cambio climático.

Las aguas residuales domesticas e industriales están familiarizadas en el sector residuos, ya que provienen principalmente de las heces humanas y los residuos orgánicos provenientes de las actividades de producción industrial.

4.1.4 Saneamiento Básico

Es el conjunto de técnicas que permite eliminar higiénicamente residuos sólidos, excretas y aguas residuales, para tener un ambiente limpio y sano. (MinSalud, 2012).

Las empresas de agua y saneamiento (WaCClim, 2018) influyen colectivamente hasta en un 12% del consumo de energía primaria por región; y su mayor parte contribuye al consumo de agua caliente. Generalmente, las empresas de agua y saneamiento urbano representan entre el 1% y 2% del consumo total de energía mundial y en ocasiones el 6% de energía a nivel regional. Adicionalmente emiten entre un 3% y 7% de gases de efecto invernadero (ONU, 2020).

4.1.5 Tratamiento de Agua Residual

Las aguas residuales se generan en residencias, instituciones locales y comerciales e industriales. Estas pueden tratarse en el sitio donde se generan o bien pueden ser recogida y llevadas mediante una red de tuberías a una planta de tratamiento municipal.

El tratamiento de las aguas residuales (Rojas, 2002) es realizado con el propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radioactiva de los cursos y cuerpos de agua receptores.

4.2.5.1 Métodos de Tratamiento

Actualmente existe la tendencia de agrupar los métodos de tratamiento en dos grandes e independientemente de la eficiencia remocional de la carga orgánica: operaciones y procesos unitarios. La selección de tratamiento depende del uso al cual se le destinara al efluente tratado, la naturaleza de agua residual, la compatibilidad de las distintas operaciones y procesos, los medios disponibles de evacuación de los contaminantes finales y la posibilidad económica de las distintas combinaciones.

4.1.5.1.1 Tratamiento Preliminar

Son unidades de gran importancia (Perez, 2020) en una planta de aguas residuales, debido a que estas se encargan de la remoción de solidos gruesos, grasas, aceites, arenas, entre otros elementos de tamaño considerable que pueden ocasionar inconvenientes operacionales.

Está destinado a la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales (Rojas, 2002) con el objetivo específico de proteger las instalaciones, el funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar o reducir sensiblemente las condiciones indeseables relacionadas principalmente con la apariencia estética de las plantas de tratamiento.

4.1.5.1.2 Tratamiento Primario

Su principal función (Perez, 2020) es remover los sólidos en suspensión, mediante procesos de sedimentación, flotación, coagulación-floculación, o filtración. Se encuentra unidades como: sedimentadores primarios, procesos de coagulación- floculación, tanques de homogenización, tanques de igualación, entre otros.

Tiene como objetivo la remoción por medios físicos o mecánicos (Rojas, 2002) de una parte sustancial del material sedimentable o flotante, Es decir, el tratamiento primario es capaz de remover no solamente la materia que incomoda, sino también una fracción importante de la carga orgánica y que puede representar entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50 y 65% de los sólidos suspendidos. Entre los tipos de tratamiento primario se citan: Sedimentación primaria, flotación, precipitación química, filtros gruesos, oxidación química, coagulación, floculación, sedimentación y filtración

4.1.5.1.3 Tratamiento Secundario

La reducción de los compuestos orgánicos presente en el agua residual (Rojas, 2002), acondicionada previamente mediante tratamiento primario, se realiza exclusivamente por procesos biológicos. Este proceso reduce o convierte la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta, en solidos sedimentables floculentos que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una eficiencia remocional de la DBO entre el 85% al 95%, y están compuestos por (Ver *Tabla 2*):

Tabla 2

Tratamientos biológicos según eficiencia remocional de DBO entre el 85-95%

Filtración Biológica	
Baja Capacidad (Filtros Básicos)	
Alta Capacidad	Filtros comunes
	Biofiltros
	Aero-filtros
	Accelo-filtros
Lodos Activados	
Convencional	
Alta Capacidad	
Contacto estabilización	
Aeración prolongada	
Lagunas	

Estabilización	Aerobia
	Facultativa
	Maduración
Aerada	Mezcla completa
	Aerada facultativa
	Facultativa con aeración mecánica
	Difusión de aire

Fuente: (Rojas, 2002), Modificado por: Autores

4.1.5.1.4 Manejo de Lodos

El tratamiento de las aguas residuales produce una serie de subproductos como son los residuos de las rejas, desarenadores y sedimentadores (Perez, 2020). Este caso específico se refiere a los productos retenidos en los sedimentadores tanto primario como secundario y que vienen a conformar la parte más importante de los subproductos.

Los lodos antes de su disposición final deben ser acondicionados a causa del alto contenido de materia orgánica putrescible y que de ninguna manera puedan ser dispuestos libremente.

El lodo procedente de las plantas de tratamiento varía según el tipo de planta (Rojas, 2002). En líneas generales se puede indicar que los lodos provienen de la sedimentación primaria y representa entre el 0.22% y en 0.93% del volumen de agua residual y el contenido de solidos volátiles es del 63 al 83%

4.1.6 Huella de Carbono

La huella de carbono es una medida utilizada para evaluar la cantidad de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero expresadas en toneladas de CO2 equivalente (tCO2-eq) que es causada por una actividad o se acumula durante la etapa de la vida de un producto. esto incluye actividades de individuos, poblaciones, gobiernos, empresas, organizaciones, procesos, sectores industriales, etc. Los productos incluyen bienes y

servicios. En el caso de querer calcular la huella de carbono teniendo en cuenta toda la cadena de valor en una industria, se deben tener en cuenta todas las emisiones directas e indirectas.

(Mancini, y otros, 2016) (Wiedmann & Minx, 2007)

4.1.6.1 Alcance 1: Emisiones Directas de GEI

Abarca las emisiones directas (Diaz & Ramos, 2017) como las que provienen de la producción química en equipos de procesos propios o controlados, como la generación de electricidad, calor o vapor procedentes de fuentes fijas como hornos, turbinas, maquinaria y demás equipos.

Procesos físicos o químicos resultantes del procesamiento de materiales como el cemento y/o de residuos, emisiones por combustión de combustibles por transporte de materiales y productos, por último, emisiones fugitivas de metano provenientes de las pilas de carbón.

4.1.6.2 Alcance 2: Emisiones Indirectas de GEI

Hace referencia a las emisiones indirectas de GEI (Diaz & Ramos, 2017), generadas por el uso de electricidad adquirida y consumida por la empresa.

4.1.6.3 Alcance 3: Otras Emisiones Indirectas de GEI

Contempla las actividades que no son propiedad ni están controladas por la empresa (Diaz & Ramos, 2017), por ejemplo, los viajes de negocio de empleados y vehículos propios de contratistas.

4.1.7 Metodologías para la medición de la huella de carbono (HdC)

Debido al interés por el cálculo de la huella de carbono y por las emisiones de GEI ha hecho que diferentes organizaciones en forma voluntaria presenten metodologías que se adaptan a proyectos específicos y responden a criterios y procesos de aprobación propios de

estas estructuras internacionales vinculadas con el Protocolo de Kioto para contabilizar e informar los impactos de los gases de efecto invernadero en productos y servicios.

Una vez establecidas las iniciativas para la medición de huella de carbono y por las emisiones de GEI, en los últimos años se han desarrollado varias metodologías estándar internacionales, las cuales se dividen en tres tipos (Ver *Tabla 2*):

Tabla 3

Metodologías internacionales

		Ejemplos
Guías Generales	Normas ISO que representan estándares de referencia para la medición de emisiones de GEI. Estos se inspiran en general, en estándares y metodologías desarrollados previamente, y tienen como objetivo ser un marco reconocido de confianza a los operadores de proyectos de medición de emisiones de GEI	ISO 14.040: Sobre Gestión Ambiental y análisis de CDV
		ISO 14.060: Sobre Gases de efecto Invernadero
		ISO 14.067: Esta inspirada en el PAS 2050 y pretendería "reemplazarlo" y constituir una referencia internacional
		ISO/WD 14.069: Precisa un nuevo estándar para la cuantificación de las emisiones de GEI de las organizaciones (empresas, administraciones)
Guías Especificas	Para la contabilidad, cálculo y monitoreo de los gases de efecto invernadero	GHG Protocolo: Un marco metodológico general que da pautas de trabajo para la determinación de herramientas de cálculo de GEI
		Bilian Carbone: es el método de cálculo de emisiones de GEI desarrollado por la ADEME, organismo público francés. Esta metodología está basada en un programa en formato Excel, acompañado de guías de utilización
		PAS 2050: apunta a "aplicar LCA sobre una amplia variedad de productos en

		<p>forma consistente para usuarios de la industria, enfocándose solamente en el indicador de Huella de Carbono</p> <p>PAS 2060: Está dedicado al cálculo de las emisiones de organismos (administración, empresas, sitio de producción), colectividades territoriales y particulares. Responde a las normativas del ISO y del GHG Protocol.</p> <p>IPCC: El Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC) es el responsable por analizar la ciencia relacionada con el cambio climático a nivel global”</p>
Herramienta de Calculo	Son para actividades específicas como el transporte o el comportamiento del consumidor.	Excel

Fuente: (CEPAL, 2011), tabla modificada por Autores.

4.1.8 Sumidero de Carbono

Es un depósito o almacén de carbono que funciona como fuente de sumidero de carbono (OECC, 2019). Por otro lado, se refieren al aumento de carbono almacenado en determinados ecosistemas, como consecuencia de determinadas actividades en el sector de uso de la tierra, cambio de uso del suelo y selvicultura.

Son depósitos de carbono (GeoInnova, 2019), es decir, espacios que absorben más carbono del que expulsan y que por lo tanto reducen la cantidad de carbono de la atmosfera. Es por esta razón por la que estos espacios son muy interesantes a la hora de plantear acciones de mitigación y adaptación al cambio climático.

También llamado Biomasa aérea (Diaz & Ramos, 2017), para realizar medidas de prevención, control, mitigación y/o compensación se debe tener en cuenta procedimientos naturales como la acción de las barreras vivas, pues son medidas simples, con bajos costos y grandes beneficios. La biomasa entonces representa la cantidad total de carbono orgánico almacenado en las porciones aéreas y subterráneas del ecosistema.

La consideración de bosques como sumideros de CO₂ (Adenex, 2020) debe ser una oportunidad para reducir la concentración de gases de efecto invernadero de la atmosfera, y, por lo tanto, a mitigar el cambio climático.

4.1.9 Metodologías de Huella de Carbono que incluya Compensación

Actualmente la metodología publica para el cálculo de huella de carbono que incluye compensación en sus ítems es el PAS 2060 (CEPAL, 2011). Constituye una herramienta potente en lo que conciernen las buenas prácticas de compensación de emisiones no reducibles de GEI, y está orientada a operadores que buscan ser neutros en carbono con un alto grado de reconocimiento.

Las ecuaciones alométrica permiten estimar la biomasa partiendo de características medibles en campo (García, Abanto, & Castillo, 2015). La ecuación alométrica describe una línea curva que representa la relación entre la biomasa y el diámetro o la altura de la planta (Sigala, Gonzalez, Prieto, Basave, & Jimenez, 2016). A partir de esta información se puede estimar la captura de CO₂, permitiendo a los estudios de huella de carbono incluir la compensación de las emisiones de GEI generadas.

4.2 Marco Legal

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático lo define como: cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempos comparables. Desde el año 2014, se inició la formulación de la Política Nacional de Cambio Climático en Colombia (IDEAM, 2017) donde se propone una gestión frente al cambio climático que contribuya a avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, que reduzca los riesgos asociados a las alteraciones por efectos del CC.

De acuerdo con lo anterior a continuación se listan los documentos, normas, leyes resoluciones en Colombia que relacionan la relevancia de reducir, mitigar y/o compensar el efecto de las emisiones de GEI. En la *Tabla 4*, observaremos de la normatividad del Cambio climático en Colombia (MinAmbiente, 2021) (Marin, 2019)

Tabla 4

Normatividad del Cambio climático en Colombia

Nomenclatura	Fecha de Expedición	Objeto de Aplicación
Normas		
Ley 1931	Julio 27/2018	La presente ley tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación, Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto

		<p>invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.</p>
Ley 164	Octubre 27/1994	<p>Por el cual se aprueba la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático hecha en Nueva York en 1992</p>
Ley 629	Diciembre 27/2000	<p>Por el cual se aprueba el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático</p>
Ley 1715	Mayo 13/2014	<p>La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como respuesta de la demanda.</p>
Decreto 298	Febrero 24/2016	<p>Establecer el Sistema Nacional de Cambio climático - SISCLIMA, con</p>

		<p>el fin de coordinar, articular, formular, hacer seguimiento y evaluar las políticas, normas, estrategias, planes, programas proyectos, acciones y medidas en materia de adaptación al cambio climático y de mitigación de GEI, cuyo carácter intersectorial y transversal implica la necesaria participación y corresponsabilidad de las entidades públicas del orden nacional, departamental, municipal o distrital, así como de las entidades privadas y entidades sin ánimo de lucro</p>
Resolución 340	Marzo 19/2005	<p>Por la cual se conforman los grupos internos o áreas de trabajo en las diferentes dependencias de la Estructura Orgánica del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y se determina su tarea.</p>
Resolución 551	Marzo 19/2009	<p>Artículo 12: Objeto de adopción de principios, requisitos y criterios y el establecimiento del procedimiento para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de GEI que optan al MDL.</p>
Resolución 1447	Agosto 1/2018	<p>Reglamentar el Sistema de Monitoreo, Reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional, en lo relacionado con el Sistema de Contabilidad de reducción de remoción de Emisiones de gases de Efecto Invernadero, el cual incluye el Registro</p>

		Nacional de Programas y Proyectos de acciones para la reducción de las Emisiones debido a la deforestación y la degradación Forestal de Colombia (REDD+)
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Documentos

El documento CONPES 3700 planteó la “Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia”, en la cual plantea priorizar cuatro estrategias de gestión del cambio climático, una de las cuales es el PNACC. Allí recomienda el alcance, el objetivo general y diez objetivos específicos que orientan la formulación e implementación del PNACC

Fuente: MinAmbiente, Uexternado. Modificado: Autores

4.3 Estado del Arte

En la presente investigación científica se presentarán varios antecedentes aplicados al cálculo de la huella de carbono en una planta de agua residual y el cálculo de la remoción; lo cual servirá de apoyo en la investigación gracias a sus hallazgos, métodos, técnicas empleadas que facilitaron la comparación y consolidación de las variables a implementar, así como estrategias de mejoras aplicable al contexto de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de PIMSA.

De este modo (Uggetti, Ferrer, Arias, & Garcia, 2012), determinaron la huella de carbono de los Rendimientos de los lechos de láminas de tratamiento de lodos, Sludge treatment reed bed systems (STRB). Al cual se realizó una evaluación del ciclo de vida utilizando emisiones de metano y óxido nitroso cuantificadas en dos STRB a gran escala ubicados en Dinamarca y España, según los resultados se estimó con el tratamiento 1 Tn de Lodos (peso húmedo) en la Guixa correspondido a 2,1 kg de CO2 eq, mientras que en Hadsten correspondió a 1 kg de CO2 eq, las emisiones de GEI corresponden a 0,09 y 0,25 kg de CO2 eq/metro 2d para el sistema danés y español. Estos resultados facilitan la formulación de estrategias de mejora para el sistema de tratamiento de lodos en la PTAR en PIMSA,

debido a los bajos costos de inversión, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento.

Por otra parte, en China se estudiaron 12 escenarios de PTAR, 4 de estas se examinaron su tratamiento y disposición de lodos, a las cuales se realizó su HdC con enfoque de ciclo de vida; se utilizaron tres alternativas de tratamiento los cuales son adoptados en la PTAR de China: anaeróbico, anoxico toxico (AAO), reactor de secuenciación por lotes (SBR) y zanja de oxígeno (OD) para tratar 20,000 m³/día de aguas residuales municipales sin procesar, lo cual se evidencio en la huella de carbono un 5817-9928 TonCO₂ eq por año; el estudio de reactor de secuenciación por lotes con digestión anaerobia de lodos y recuperación de energía a través de calor de electricidad tuvo menor huella de carbono mientras que (AAO) con el vertedero de lodos fue la mayor huella de carbono debido a las emisiones CH₄. Anaeróbico Anoxico toxico, reactor de secuenciación por lotes y zanjas de oxígeno ayudaron a reducir la huella de carbono en un 37%, 34% y 24%. Los análisis de las HdC establecieron que el tratamiento aeróbico del lodo no solo favorece la generación de grandes cantidades de CO₂, sino también a las emisiones de N₂O, el tratamiento anaeróbico aplica tanto a las aguas residuales como al tratamiento de lodos para reducir la huella de carbono (Chai, Zhang, Yu, Feng, & Wong, 2015)

En cambio, Aguas de Valladolid una compañía parte del Grupo SUEZ, dedicada a gestionar el ciclo integral del agua, realizo la huella de carbono ISO 14064, el cual tomo como año base el 2013, desarrollaron los alcances 1 y 2 en las instalaciones con control operativo, en los procesos incluyeron las actividades de potabilización, distribución y depuración de agua realizadas por la empresa como principales actividades. Para el cálculo de la huella de carbono se utilizó una calculadora elaborada por el Ministerio de Agricultura,

Alimentación y Medio Ambiente de España, cálculo de la huella de carbono fue de 8.522,68 tCO₂e con un indicador de eficiencia de 0,11 kgCO₂e por m³ de agua procesada. Las instalaciones que tienen un mayor aporte en las emisiones de GEI, es la Estación Depuradora de Aguas Residuales, la cual durante el 2014 generó 4987,48 tCO₂e, por el consumo de energía eléctrica, lo que representa el 67,7% del total de las emisiones, el alcance 2 fue el de mayor relevancia con un 85,7% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (Bonilla, 2016).

En la investigación de (Bonilla, 2016) quien tomo como base la ISO 14064, la cual empleo como metodología para determinar los GEI en la empresa aguas de Valladolid, abriendo puertas como opción en nuestra investigación la ISO 14064 para calcular la huella de carbono en la PTAR de PIMSA.

De la misma manera que (Chai, Zhang, Yu, Feng, & Wong, 2015), (Riffo, 2017) establecen el proceso annamox como una medida de mejora para reducción de la huella de carbono el cual aplica para PIMSA con los beneficios de reducción de las emisiones de N₂O y reducción en el consumo de energía generando beneficios económicos en una reducción de costo.

Por otra parte (Beatriz, 2018), realizo una investigación de huella de carbono como indicador para establecer el consumo energético que se produce en una planta de tratamiento con el fin de optimizar e innovar el consumo energético con energías renovables. Para el estudio de la huella de carbono utilizaron la metodología de análisis de ciclo de vida y el programa Water Energy Sustainability Tool (WWEST), para analizar 4 casos de estudios en diferente lugares para determinar que energía renovable sería más viable, en el caso número 4 se reduce un 100% el consumo energético de red, mitigando así las emisiones anuales de

2.754 toneladas con la producción de 3.396.326,39 kWh/año el capital invertido fue de 1.343.750 con un periodo de amortización de 7 años con el de la energía eólica.

Demostrando así que el aprovechamiento de energías renovables es viable económicamente y es buena estrategia para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual es aplicable como estrategia de mejora para la PTAR de PIMSA (Beatriz, 2018)

5. Marco Metodológico

En el presente estudio obedece a una investigación tipo descriptiva abordada bajo un enfoque mixto, para ello se estructuraron fases denominadas A,B,C y D de acuerdo a las directrices definidas Protocolo de Gases Efecto Invernadero. Estandar Corporativo de Contabilidad y Reporte (edición revisada) del World Resource Institute – WRI y el World Business Council for Sustainable Development WBCSD. (World Business Council for Sustainable Development, 2005) y además es una metodología de trayectoria donde se tiene que es una de las más usadas (AEC, 2019).

A continuación, se relaciona como a través de este abordaje metodológico se pretende el logro de los objetivos específicos de la investigación. Ver *Tabla 5*

Tabla 5

Fases de la Metodología

Fases de la metodología	Objetivos Específicos.
Fase A: Caracterización de procesos.	Describir el proceso de tratamiento de aguas residuales del Parque Industrial de Malambo
Fase B: Calculo de emisión de GEI Fase C: Calculo de la remoción de GEI	Cuantificar la cantidad de Gases de Efecto Invernadero emitidos directa e indirectamente por la planta de tratamiento de agua residual.
Fase D: Formulación de estrategias de mejora	Proponer estrategias de mejora para reducir y/o compensar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero emitidos por la planta de tratamiento de aguas residuales del Parque Industrial de Malambo

Fuente: Autores

Fase A: Caracterización de procesos: En esta etapa se llevó a cabo la recolección de información de acuerdo con fuente primas y secundarias: inicialmente se desarrolló una visita de inspección con el objetivo de comprender la operación del sistema de tratamiento de aguas residuales del parque industrial de malambo S.A – PIMSA y luego describirla. Así mismo se

procedió a solicitar información primaria del año 2019 sobre las características físicas del Sistema de Tratamiento, así como características fisicoquímicas del efluente con la finalidad de recopilar datos para estimar la Huella de Carbono.

Fase B: Calculo de la emisión de GEI: Esta se llevó a cabo teniendo en cuenta las directrices de Protocolo de Gases Efecto Invernadero. Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte (edición revisada) del World Resource Institut - WRI y el World Busine Council for Sustainable Development WBCSD (World Business Council for Sustainable Development, 2005) en cual se contempla el desarrollo del cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero en 5 etapas.

Primera Etapa: En la selección de los limites organizacionales existen dos tipos de enfoques: Enfoque de control operacional y enfoque de cuota de participación. Se seleccionó el enfoque operacional, ya que se ajusta más a las actividades del parque industrial de Malambo y el que permite mayor actuación para reducir los GEI.

Igualmente, se definen los limites operacionales donde se definirán las fuentes de emisión de GEI que se incluyan en el inventario.

Al establecer los límites operativos, se definen las fuentes de emisión de GEI que se incluyan en el inventario. De acuerdo con el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero, las emisiones se pueden clasificar según tres categorías como podemos ver en la *Tabla 6*:

Tabla 6

Tipos de Alcance

<p>Alcance 1: Emisiones directas de GEI</p>	<p>Emisiones directas que ocurren de fuentes que son propiedad de o están controladas por la empresa.</p>	<p>Ejemplo: Procesos industriales donde se ve involucrada la materia orgánica, vertimiento industrial tratado.</p>
<p>Alcance 2: Emisiones indirectas de GEI</p>	<p>Incluye las emisiones de la generación de electricidad adquirida y consumida por la empresa.</p>	<p>Electricidad adquirida se define como la que es comprada, o traída dentro del límite organizacional de la empresa.</p>
<p>Alcance 3: Otras emisiones indirectas</p>	<p>Incluye las emisiones indirectas expandidas que ocurren fuera de la organización a partir de fuentes no pertenecientes o controladas por la misma, pero que están ligadas a sus actividades.</p>	

Fuente: (GHG, 2015), *Modificado:* Autores

Segunda etapa: Para la selección del año base, se recomienda que sea un periodo representativo de la operación normal de la organización y que exista disponibilidad de datos auditables. La junta directiva de PIMSA debe establecer un año base, donde se dispongan los datos suficientes para poder realizar el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero de la organización.

Tercera etapa: De igual importancia, se identificaron los factores de emisión con relación a las actividades de la planta de tratamiento de agua residual de PIMSA, fue necesario consultar las ecuaciones de los autores (Doorn, Irving, & Palmer, 2006) para poder construir un inventario que nos permitiera llegar a la siguiente etapa.

Cuarta etapa: En relación con la tercera etapa; se lleva a cabo la cuantificación de gases de efecto invernadero.

Siempre y cuando exista un proceso de transformación química (combustión, fija o móvil, emisiones de procesos, degradación de materia orgánica), emisiones indirectas por electricidad consumida. Se podrá obtener la emisión de GEI a partir de la siguiente ecuación (ver *Ecuación 1*)

Ecuación 1

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Dato de actividad} \times \text{Factor de Emision}$$

Donde el Dato de actividad es: medida cuantitativa de la actividad que produce una emisión.

Factor de emisión: El factor de emisión depende del tipo y características del proceso de transformación o tipo sectorial.

Para terminar, se debe realizar una conversión de las emisiones de CH₄ obtenidas a CO₂-eq, mediante la siguiente ecuación (ver *ecuación 2*)

Ecuación 2

$$\text{Emisiones (CO}_2 \text{ eq)} = \text{Emisiones de GEI} \times \text{Potencial de Calentamiento Global}$$

El valor de Potencial de Calentamiento Global lo podemos encontrar en la *Tabla 1*; finalmente una vez obtengamos el cálculo unitario de cada fuente de emisión, se sumarán todas las emisiones de la misma categoría (emisiones directas, emisiones indirectas y otras emisiones indirectas)

Con relación a la explicación anterior, fue necesario crear una herramienta de cálculo en Excel que permitiera procesar, distinguir y calcular la información ver *Tabla 7*.

Tabla 7

Herramienta de Calculo

FUENTES DE EMISION	DESCRIPCION	CONSUMO/PRODUCCION		FACTOR DE EMISION PCG		HUELLA DE CARBONO (p)
		CANT.	UN.	CANT.	UN.	(TON CO2e)
Alcance 1						
Alcance 2						
Consumo de energía						
Total, emisiones de GEI						0,000

Fuente: Autores

Esta herramienta de cálculo está dividida en cinco (5) grupos. El primero (Columna 1) corresponde a las fuentes de emisiones identificadas, separado por categorías: Alcance 1 y Alcance 2. Dentro de estas categorías se podrá anexar todas las fuentes de emisión pertinentes.

En el segundo (columna 2) llamado descripción, se anexará la actividad específica de la organización que este en categoría de alcance 1 o alcance 2. En el tercero (columna 3 y 4) llamado consumo/producción se anexará información cuantitativa de la cantidad que consume o produce la organización, junto con información cualitativa donde identificaremos la unidad de esta medida ejemplo: kg, m3, mWH. En el cuarto cuadro (columna 5 y 6) corresponde al factor de emisión o potencial de Calentamiento Global (PCG) de la fuente de emisión. Por último, el quinto cuadro (columna 7) donde se llevará a cabo la multiplicación del consumo o producción por el factor de emisión o potencial de calentamiento global, verificando las unidades correspondientes.

Quinta etapa: Así pues, en esta última fase obtenemos el resultado de la cuantificación de gases de efecto invernadero y se realizara un informe escrito.

Fase C: Calculo de la remoción: En relación con la investigación de (Diaz & Ramos, 2017) y (Alvarez, y otros, 2012) se construyó una metodología para poder calcular la remoción de gases de efecto de invernadero generado por la planta de tratamiento de agua residual del Parque Industrial de Malambo.

Para empezar, se llevó a cabo un trabajo de campo con el objetivo de determinar la biomasa aérea. Fue necesario delimitar el área de muestreo, a cada árbol se le dio una numeración y un marcado. Para luego determinar la biomasa aérea teniendo en cuenta los siguientes datos:

Diámetro a la altura de pecho (DAP): Se midió con una cinta métrica a una altura de 1,30 m con respecto al suelo.

Altura del árbol (h): Se midió con un clinómetro a una distancia de 10 m con respecto al árbol. Peso específico de la madera de cada especie de árboles que se identificaron en el Parque Industrial. La información recolectada en campo se anexo a una hoja de cálculo en Excel para entrar en la consecutiva fase.

Se identifico cada especie encontrada en el área de muestreo; al mismo tiempo, con relación a la investigación de Álvarez et al. (2012) se implementó la siguiente ecuación alométrica, ver

Ecuación 3

Ecuación 3

Ecuación alométrica para estimar la remoción

$$\log N (BA) = a + B1 * \log N ((DAP)^2 * h * \rho)$$

Donde Log N es Logaritmo natural, BA = Biomasa aérea; a y b1 son coeficientes de modelo:

a=4,0396, b1= 1,283; DAP= Diámetro de Altura de pecho; h= altura; p= Densidad de madera en g/cm³

Por consiguiente, el resultado que obtengamos de la *Ecuación 3* se utilizara como variable en la *Ecuación 4*, con el fin de hallar las toneladas/hectáreas de carbono almacenado.

Ecuación 4

Ton/ha de C almacenado

$$tn/ha C = BA * 0,50/1000$$

Donde BA es biomasa aérea.

Luego, para calcular las toneladas de dióxido de carbono absorbido, se utilizará la *Ecuación 3*, donde multiplicaremos el resultado de la *Ecuación 4* por 3,67 Ton de CO₂ que es la equivalencia de carbono almacenado, permitiéndonos obtener las Ton de CO₂ removida por los árboles.

Ecuación 5

Ton CO₂ removido

$$Tn de CO2 removido = tn/ha C * 3,67$$

A fin de que obtengamos la remoción, se debe seguir esta secuencia de cálculos. Las variables tomadas en campo nos determinaran la remoción de gases de efecto invernadero capturada por los árboles que se encuentran en el área de influencia de la planta de tratamiento de agua residual de PIMSA.

Por consiguiente, una vez se obtenga el resultado de la *Ecuación 5* para cada especie de árbol identificado, se analizó la captura de CO₂, con el objetivo de conocer que arboles tienen mayor y

menor capacidad de captura de CO₂. Asimismo, se construyó una gráfica representativa de biomasa aérea vs DAP de la especie dominante para analizar la dispersión de los valores medidos y la línea de regresión generada en el modelo lineal. Igualmente, se realizó un análisis estadístico para conocer el número de árboles según su clase diamétrica.

Fase D: Formulación de Estrategias de Mejora: Siempre y cuando tengamos resultados de Huella de Carbono y Remoción, se realizó un balance de las emisiones generadas por la planta de tratamiento de aguas residuales de PIMSA y la compensación provocada por los árboles presentes, se utilizara la *Ecuación 6*

Ecuación 6

$$\text{Balance} = \text{Emisiones totales} - \text{remociones}$$

De acuerdo con el resultado de la *Ecuación 6*, se proyectó la formulación de estrategias de mejorar a fin de reducir su huella de carbono y contribuir con la lucha del cambio climático a nivel nacional e internacional,

6. Resultados

6.1 Fase A

6.1.1 Ubicación del Parque Industrial de Malambo S.A

Parque Industrial Malambo S.A (PIMSA) está ubicado en Colombia, departamento del Atlántico, municipio de Malambo, en la vía de Malambo-Sabanagrande km 3, bajo las coordenadas N: 10°50`07,0" O: 74°45`44,3"; cuenta con un total de 25 empresas vinculadas, las cuales 10 son del sector metalúrgico, 5 del sector comercio, 2 de transporte, bebidas, comunicaciones, mobiliario, manufacturero, agropecuario, económico, agroindustrial y manipulación de cargas tienen una sola empresa. La entrada del sistema de tratamiento de agua residual de PIMSA se encuentra en las coordenadas N: 1689876,125 y E: 925478,992; mientras que la salida se encuentra en las coordenadas: N1689759,197 y E925551,638(Ver *Figura 2*).



Figura 2 Localización general e imagen satelital del Parque Industrial Malambo S.A y sistema de Tratamiento

Fuente: Caracterización Físicoquímicas de aguas residuales domésticas y no domésticas 2019 de PIMSA.

PIMSA en el marco de su actividad económica administra y presta servicio de acueducto y alcantarillado a las empresas que desarrollan sus procesos productivos en el parque industrial, así mismo cuenta con una red de alcantarillado que traslada las aguas residuales a un tanque homogeneizador para después ingresar al sistema de laguna de oxidación, estas aguas poseen características alcalinas o acidas dados esto se debe a que la mayoría de empresas vinculadas son del sector industrial, estos utilizan elementos químicos de sus procesos productivos, lo cual genera un caudal poco constante dado que su suministro es por baches hacia la red de alcantarillado la cual es mezclada y neutralizada entre los vertimientos que generan las aguas residuales de las empresas.

6.1.2 Descripción del Sistema de Tratamiento

El sistema de tratamiento de las aguas residuales en PIMSA es biológico mediante tres (3) lagunas de oxidación (anaerobia, facultativa y maduración) de igual forma un sistema de trampa de grasa para separar los líquidos no solubles en agua como aceites e hidrocarburos (Ver *Figura 3*) y (Ver *Figura 4*)

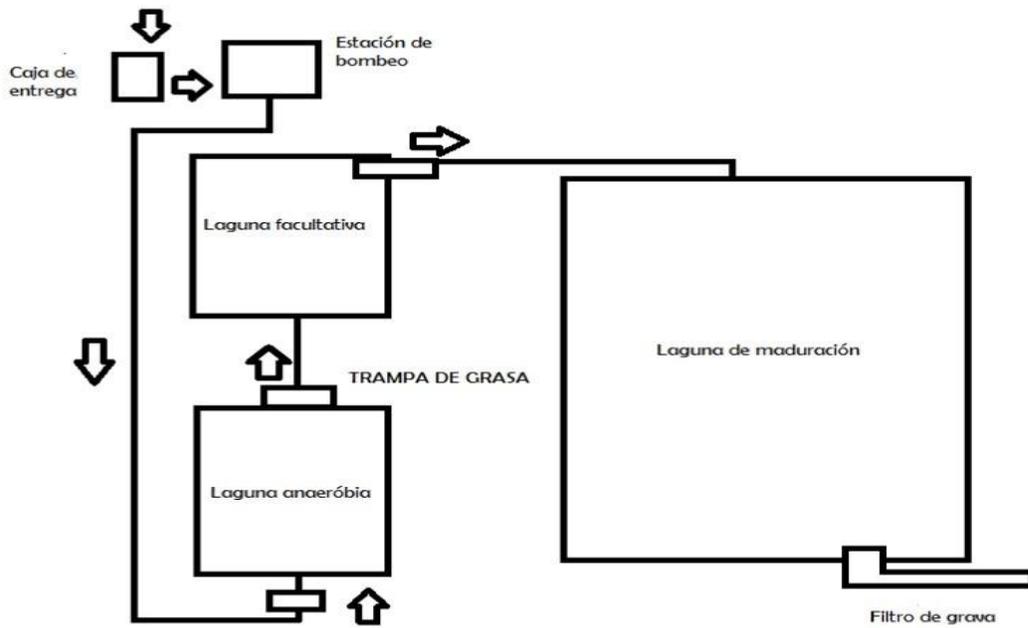


Figura 3 Esquema Básico del Sistema de Tratamiento – Lagunas de oxidación Fuente: Plan de gestión de riesgo para el manejo de vertimiento. PIMSA, 2018. Modificado: Autores



Figura 4 Lagunas de PIMS Fuente A: PIMSA

6.1.2.1 Estación de Bombeo

En la estación de bombeo se encuentra una motobomba centrífuga de 10HP (ver *Figura 5*), la cual tiene una capacidad de bombeo de 4.7 L/s, el agua es transportada por medio de una tubería de 4 pulgadas.



Figura 5 Motobomba Centrifuga de 10HP Fuente: Autores

6.1.2.2 Laguna Anaeróbica

En las lagunas anaeróbicas se lleva un tratamiento por la acción de bacterias anaerobia como consecuencia de las elevadas cargas orgánicas y el corto periodo de retención del agua residual, el contenido de oxígeno disueltos se mantiene muy bajos o nulo durante todo el año el principal objetivo es retener la mayor parte posible de los sólidos en suspensión que pasaran a incorporarse a la capa de fango acumulado en el fondo y eliminar gran parte de la carga orgánica.

La laguna anaeróbica en PIMSA tiene una dimensión de 33 m x 19 m, con una profundidad de 2 m, donde se efectúa el proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay una presencia de oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido,

para garantizar estas condiciones se deja la capa de grasas y aceites en la superficie. Esta laguna no cumple con las características de profundidad según la Resolución N° 0330 del 2017.

6.1.2.3 Trampas de Grasas

PIMSA cuenta con una trampa de grasas la cual está ubicada entre la laguna de anaeróbica y facultativa, la cual retiene en un 99% el líquido insoluble en el agua como lo es las grasas e hidrocarburos, lo que facilita el tratamiento de la biomasa que se desarrolla en la laguna facultativa.

6.1.2.4 Laguna Facultativa

Las lagunas facultativas son las que poseen una zona aerobia en la superficie y una anaerobia en el fondo, la finalidad de esta laguna es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado por la presencia de algas que son los principales suministradores de oxígeno disuelto, es importante la profundidad de la laguna facultativa puede comprenderse entre 1 y 2 metros, para facilitar un ambiente oxigenado en la mayor parte del perfil vertical, ya que en la zona aerobia en la que se descomponen activamente sólidos acumulados por acción de bacterias anaerobias en la zona intermedia de la laguna es parcialmente aerobia y anaerobia en la que la descomposición de residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas, los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de fango anaerobio, los materiales orgánicos sólidos y colietales se oxidan por la acción de bacterias aerobias y facultativas, el oxígeno que se produce en los procesos de oxidación orgánica sirve como fuente de carbono por las algas la descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de fango implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como dióxido de carbono, ácido sulfúrico y metano se oxidan por las bacterias aerobias y se liberan al ambiente

En la laguna facultativa de PIMSA se realiza la actividad metabólica de bacterias heterótrofas facultativas, que se pueden desarrollar en presencia como en ausencia de oxígeno disuelto, en condiciones aerobias es mayor la velocidad de crecimiento y la velocidad de depuración, la laguna facultativa tiene 36m x 14m y profundidad de 1,7m. Las características de esta laguna si cumplen con la Resolución N° 0330 del 2017.

6.1.2.5 Laguna de Maduración

Este tipo de laguna tiene como objetivo la eliminación de bacterias patógenas, la electrificación de nitrógeno amoniacal, eliminación de nutrientes la clarificación del efluente y consecución de un efluente bien oxigenado, las lagunas de maduración se constituyen generalmente con tiempos de retención de 3 a 10 días cada un mínimo 5 días cuando se utiliza una sola y profundidades de 1.5.

En PIMSA la etapa de maduración se realiza la remoción de patógenos y de coliformes fecales en particular, dependen de la actividad de algas en sinergia con la foto oxidación. Por otro lado, se contribuye a la remoción de nitrógeno y fosforo significativamente, la mayor parte del nitrógeno amoniacal se remueve en esta etapa, para el desarrollo de los metabolismos, la laguna de maduración tiene 68m x 54m de 1.5m. Las características de esta laguna si cumplen con la Resolución N° 0330 del 2017.

6.1.3 Recopilación de Datos

6.1.3.1 Caracterización fisicoquímica en las Aguas Residuales

En diciembre del año 2019, nuestro año base para nuestro proyecto, se realizó un estudio al sistema de tratamiento de las aguas residuales domésticas y no domesticas del Parque Industrial Malambo S.A; la caracterización de agua residual fue realizada para establecer un control de la calidad de agua por medio de análisis fisicoquímicos, muestreo compuesto constituido por cinco (5) alícuotas que se toman con intervalos de una (1) hora, durante una

campana de cinco (5) días consecutivos, en la caracterización del sistema de tratamiento de aguas residuales se midieron los parámetros in situ tales como pH, temperatura, caudal y aspecto del agua. Los resultados obtenidos de los muestreos se determina el cumplimiento con las disposiciones de las normas legales ambientales vigentes Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015.

El plan de muestreo interno utilizado fue el 1658 y los procedimientos internos de muestreos usados fueron el “PR-MT-001, Procedimiento para el muestreo” y “IN-MT-010, Instructivo para el muestreo de aguas residuales”.

Los valores de los parámetros analizados son comparados con la normativa ambiental vigente para la entrada y salida del sistema de tratamiento de agua residuales en las tablas 8 y 9.

Tabla 8:

Resultados de la entrada del sistema de tratamiento de aguas residuales en PIMSA

ENSAYO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA	Resultados Entrada del sistema				
			PARQUE INDUSTRIAL MALAMBO S.A				
			2019-12-13 4004-1	2019-12-14 4004-3	2019-12-15 4004-5	2019-12-16 4004-7	2019-12-17 4004-9
pH	U de pH	6,00 a 9,00	6.42 - 6.88	6.99 - 7.17	6.99 - 7.63	6.53 - 7.09	4.50 - 6.75
Temperatura	°C	40.00	28.4 - 29.4	27.8 - 28.9	28.0 - 30.6	28.3 - 30.1	29.5 - 31.5
Caudal	L/S	-	NC	NC	NC	NC	NC
DBO5	mg O2/L	90.00	96.9	67.0	88.9	108	69.4
DQO	mg O2/L	180.00	140	88.9	94.9	152	127
Solidos sedimentales	ml/L	5.00	4.0	0.8	1.0	1.1	5.5
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	90.00	112	22.7	42.0	162	166

CALCULO DE HUELLA DE CARBONO DE UNA PLANTA

Grasas y Aceites	mg/L	20.00	<10.0	<10.0	18.5	32.6	17.7
Hidrocarburos	mg/L	Análisis y Reporte	<10.0	<10.0	<10.0	10.6	<10.0
Surfactante Aniónicos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	0.636	0.113	<0.1	0.584	0.225
Ortofosfato	mg P-PO4/L	Análisis y Reporte	<0.025	0.574	0.675	0.0452	0.164
Fosforo total	mg P/L	Análisis y Reporte	1.56	1.48	1.44	1.82	1.30
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	Análisis y Reporte	28.3	15.1	16.4	20.1	22.5
Nitratos	mg N-NO3/L	Análisis y Reporte	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50
Nitritos	mg N-NO2/L	Análisis y Reporte	<0.01	0.0361	0.0922	0.0556	0.0761
Nitrógeno total	mg N/L	Análisis y Reporte	35.5	20.1	21.3	26.7	31.1
Aluminio total	mg Metal/L	-	<0.090				
Cadmio Total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Cobre Total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Cromo Total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Hierro total	mg Metal/L	-	74.770				
Mercurio total	mg Metal/L	-	<0.0004				
Níquel total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Plata total	mg Metal/L	-	<0.003				
Plomo total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Zinc total	mg Metal/L	-	0.2030				

Fuente: PIMSA.

Tabla 9

Resultados de salida del sistema de tratamiento de aguas residuales en PIMSA

ENSAYO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA	Resultado Salida del sistema PARQUE INDUSTRIAL MALAMBO S. A				
			2019-12-13 4004-2	2019-12-14 4004-4	2019-12-15 4004-6	2019-12-16 4004-8	2019-12-17 4004-10
pH	U de pH	6,00 a 9,00	7.52 - 8.57	7.58 - 8.17	7.60 - 8.23	7.75 - 8.35	7.63 - 8.57
temperatura	°C	40.00	22.7 - 29.9	27.8 - 28.9	28.3 - 29.4	28.5 - 31.1	28.8 - 32.1
DBO5	mg O2/L	90.00	19.0	26.6	18.1	19.3	13.7
DQO	mg O2/L	180.00	53.7	51.9	65.1	74.1	65.9
Solidos sedimentales	ml/L	5.00	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	90.00	10.0	13.2	16.7	14.5	8.70
Grasas y Aceites	mg/L	20.00	<10.0	<10.0	10.6	<10.0	<10.0
Hidrocarburos	mg/L	Análisis y Reporte	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0
Surfactante Aniónicos	mg SAAM/L	Análisis y Reporte	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ortofosfato	mg P-PO4/L	Análisis y Reporte	0.152	0.248	0.215	0.181	0.147
Fosforo total	mg P/L	Análisis y Reporte	0.332	0.390	0.415	0.283	0.355
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	Análisis y Reporte	16.5	15.1	15.0	14.0	12.7
Nitratos	mg N-NO3/L	Análisis y Reporte	0.580	0.540	<0.50	<0.50	0.530
Nitritos	mg N-NO2/L	Análisis y Reporte	2.76	1.36	1.18	1.36	1.75
Nitrógeno total	mg N/L	Análisis y Reporte	22.6	18.6	19.3	26.0	20.1
Aluminio total	mg Metal/L	-	<0.090				
Cadmio Total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Cobre Total	mg Metal/L	-	<0.0030				

Cromo Total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Hierro total	mg Metal/L	-	2.897				
Mercurio total	mg Metal/L	-	<0.0004				
Níquel total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Plata total	mg Metal/L	-	<0.003				
Plomo total	mg Metal/L	-	<0.0030				
Zinc total	mg Metal/L	-	<0.0900				

Fuente: PIMSA.

Los estudios realizados mostraron que los parámetros fisicoquímicos analizados en la salida del sistema de tratamiento cumplen con los límites máximos permisibles de la Resolución 0631 de 2015 durante la caracterización.

6.1.3.2 Vertimiento industrial tratado

Para poder calcular el vertimiento tratado en el año 2019 por la planta de agua residual, se tomó información de la motobomba centrífuga, ya que al no tener información del caudal o el consumo de agua de PIMSA se procedió a hacer este cálculo con la información que tenemos. Entonces, si la estación de bombeo tiene una capacidad de 4.7 L/s cuanto sería la capacidad en un año. Para esto, se realizó la siguiente conversión:

Ecuación 7

Conversión de L/ s a L/año

$$4,7 \frac{L}{sg} * \frac{60 sg}{1 min} * \frac{60 min}{1 h} * \frac{24 h}{1 dia} * \frac{365 dia}{1 año}$$

Dándonos como resultado 148219200 L/año.

Ahora bien, utilizando el dato de concentración mayor de DQO de salida de las aguas residuales de PIMSA obtenido en la campaña de muestreo (ver *Tabla 9*), cuya cifra es de 74,1 mg O2/L.

Para garantizar el cálculo de la huella de carbono. Entonces, calculamos ahora, la concentración de DQO por la capacidad de bombeo de la estación.

Ecuación 8

Concentración DQO * capacidad de bombeo

$$148219200 \frac{L}{año} * 74,1 \text{ mg} \frac{O_2}{L}$$

Obteniendo así, un resultado de 109830427 mg O₂.

Como necesitamos esta cifra expresada en kg, se realizó la siguiente conversión ver

Ecuación 9

Ecuación 9

$$109830427 \text{ mg } O_2 / \text{año} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000000 \text{ mg}}$$

Obteniendo 10983,043 kg O₂/año.

6.1.3.3 Materia Orgánica Degradable en aguas Residuales Domesticas

Para poder realizar este cálculo se emplea la siguiente ecuación (Cristancho, Gamez, Guerra, & Dueñas, 2018):

Ecuación 10

Total, de Materia Orgánica en aguas residuales

$$TOW = P * DBO * 0,001 * I * 365$$

Donde TOW: total de materia orgánica en las aguas residuales del inventario kg de DBO/año; P: población del país o lugar del año inventario; 0,001: conversión de gramos de DBO a kilogramos de DBO; I: Factor de corrección de DBO; 365: el número de días de un año.

Para estimar la cantidad total de materia orgánica degradable en las aguas servidas (población e índice de generación de DBO por persona), se incluyó el número de empleados que laboran en el Parque Industrial: son 1442 empleados, el DBO per cápita según (Cristancho, Gamez, Guerra, & Dueñas, 2018) es de 50 g/persona/día, este valor también fue comprobado por (Hidalgo & Mejia, 2010). Y el factor de corrección para el DBO industrial adicional al que ingresan a la PTAR por intermedio de los alcantarillados (1,25).

Como resultado obtenemos 32895,63 Kg de materia orgánica degradable en aguas residuales domesticas durante el año 2019.

6.1.3.4 Consumo de Energía eléctrica

Para poder calcular el consumo de energía eléctrica por parte del sistema de tratamiento de agua residual, fue utilizada información como la capacidad de la motobomba centrifuga correspondiente a 10 HP. Luego de esto, se realizó la siguiente conversión para pasar HP a MW.

Ecuación 11

Conversión de HP a MW

$$10HP * \frac{1 MW}{1341,02 HP}$$

Dónde: 1341,02 HP equivale a 1 MW.

Dándonos como resultado: 0,007457 MW.

Asumiendo que la planta de agua residual funciona 24h al día, se calculó el número de horas que operaria la planta en el año 2019.

Ecuación 12

Número de horas en un año

$$365 \text{ dias} * 24 \text{ horas}$$

Obteniendo un resultado de 8,760 horas.

Ahora bien, necesitaríamos nuestra cifra expresada en MW/h. Entonces utilizamos el resultado de la ecuación 11 y 12.

Ecuación 13

Consumo de energía

$$0,007454 \text{ MW} * 8,760 \text{ h}$$

Siendo esto, como resultado se obtuvo 65,3233 MW/h. Concluyendo que esta cifra es responsable del consumo de energía eléctrica del funcionamiento de la planta de agua residual en PIMSA.

6.2 Fase B

Para el presente estudio la identificación de las fuentes de emisión permite construir un inventario general de emisiones, el cual este compuesto por actividades o procesos, estos, son considerados por su alto consumo, por la alta frecuencia de la actividad o por la intensidad de emisiones de GEI. Los gases de efecto invernadero que se van a cuantificar son: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂).

Realizada la revisión bibliográfica y las comparaciones de las metodologías para la medición de a huella de carbono (HdC), el presente estudio se sustentará mediante la metodología de “Greenhouse Gas Protocol (GHG)”, puesto que provee guías para identificar fuentes de emisión a partir de actividades antropogénicas o procesos que se consideren fuente de emisión de GEI y además es una metodología de trayectoria donde se tiene que es una de las más usadas (AEC, 2019). A continuación, se explica la metodología:

La organización está compuesta por una o más instalaciones. Se seleccionó el enfoque operacional, ya que se ajusta mejor a las actividades que maneja la organización, y el que permite mayor actuación de reducir los GEI.

Para esto, se definieron las fuentes de emisión/sumideros de GEI que se incluyen en el inventario.

En la *Tabla 10* observaremos las fuentes de emisión según su alcance identificadas en la Planta de agua residual del Parque Industrial:

Tabla 10

Fuentes de emisión según su alcance y datos de actividad.

TIPO DE EMISION	DATO DE ACTIVIDAD
Alcance 1	Vertimiento Industrial tratado (Laguna anaeróbica > 2 mts)
	Materia Orgánica degradable en Aguas Residuales
Alcance 2	Consumo de Energía

Fuente: Autores

Alcance 1: Aquellas emisiones directas controladas por la entidad, en este caso el resultante de la manufactura o del procedimiento de tratamiento de aguas residuales como: procesamiento de residuos líquidos.

Alcance 2: Generadas por el uso de la electricidad consumida por la motobomba con la que funciona la planta de agua residual; la energía consumida por las oficinas, lámparas, aparatos electrónicos fueron excluidas, ya que la investigación solo se centró en el tratamiento de aguas residuales.

Una comparación significativa y consistente de las emisiones a través del tiempo requiere fijar una base de desempeño para comparar las emisiones actuales; esto se denomina emisiones del

año base. Se debe elegir y reportar un año base para el cual exista información confiable de emisiones; además de especificar las razones que condujeron a la elección de ese año en particular.

El año base de esta investigación es 2019; ya que la investigación comenzó en el año 2019.

En la *Tabla 11* observaremos los factores de emisión pertinentes a esta investigación:

Tabla 11

Factores de Emisión para Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

Factor de Emisión de T.A.R. I		
Capacidad Max Producción	CMP	0,25
Factor Corrección	FC	0,8
Potencial Cal. Global	PCG	28
		5,6
		kgCH4//kgDQO

Fuente: Autores

Tenemos la capacidad máxima de producción de metano en los residuos líquidos industriales (valor por defecto es 0,25 kgCH4/kgDQO, según directrices del IPCC de 2006 para inventarios nacionales de GEI). El factor de corrección para el CH4, según directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI su valor por defecto en aguas residuales industriales es 0,8.

Como valor para el Potencial de Calentamiento Global utilizamos la cifra de CH4 más reciente que fue al año 2013 en la *Tabla 1*, el valor es de 28.

Luego se lleva a cabo la siguiente ecuación, ver *ecuación 14*:

Ecuación 14

Factor de emisión

$$F.E = 0,25 * 0,8 * 28$$

Como resultado, obtenemos un valor de 5,6 kgCH4 e/kgDQO.

El factor de emisión energético, en el caso de Colombia el factor de emisión es 0.13 tCo2/mWh, este factor de emisión será utilizado para proyectos y mediciones específicas de emisiones de GEI y/o estimar los GEI generados por el consumo de energía eléctrica (UPME, 2019).

6.2.1 Vertimiento Industrial Tratado

Para calcular la HdC por el vertimiento industrial tratado, realizamos la siguiente ecuación (ver *ecuación 15*):

Ecuación 15

$$TOW T.S = V.I.T * F.E * PCC$$

Donde: TOW T.S es el total de emisión según su tipo de sistema de tratamiento de residuos líquidos industriales; V.I.T es vertimiento industrial tratado, en el caso de PIMSA corresponde a una laguna anaeróbica con una profundidad mayor a 2 metros; F.E es el factor de emisión; PCC es el potencial de calentamiento global.

Para este proceso se obtiene 1731366,85 KgCO₂ e. Luego realizamos el factor de conversión de unidades para pasar Kg a Ton. Luego se lleva a cabo la siguiente ecuación, ver *ecuación 16*:

Ecuación 16

Conversión de Kg a Ton.

$$1731366,85 \text{ Kg}/1000$$

Como resultado obtenemos 1731,37 TonCO₂e

6.2.2 Materia Orgánica Degradable en las Aguas

Para realizar este cálculo, utilizamos la siguiente ecuación (ver *ecuación 17*):

Ecuación 17

$$TOW M.O. = M.O.D * F.E * PCC$$

Donde: TOW P.I es el total de emisión de materia orgánica degradable en las aguas domesticas; M.O.D es materia orgánica degradable en aguas residuales domesticas; F.E es el factor de emisión; PCC es el potencial de calentamiento global

Para este proceso se obtiene 5185666 KgCO₂e. Luego realizamos el factor de conversión de unidades para pasar Kg a Ton, el valor obtenido de la *ecuación 14* será dividido entre mil. Siendo así, obtenemos 5186,666 TonCO₂e.

6.2.3 Consumo de Energía

Para realizar el cálculo de la HdC en el consumo de energía, es necesario realizar la siguiente ecuación (ver *Ecuación 18*):

Ecuación 18

$$TOW = C.E * F.E$$

Donde: TOW es el total de emisión por consumo de energía; C.E es el consumo de energía y F.E el factor de emisión.

Finalmente, las emisiones por consumo de energía equivalen a: 8,492 TonCo₂e.

Después de haber culminado con los cálculos de la fase B4, se procede a realizar la siguiente ecuación (ver *ecuación 19*):

Ecuación 19

$$Emisiones\ GEI\ consolidadas = Alcance\ 1 + Alcance\ 2$$

Donde se sumarán las emisiones de alcance 1: vertimiento industrial tratado y materia orgánica degradable de aguas residuales domésticas y su resultado, se sumará con las emisiones de

alcance 2: consumo de energía. El funcionamiento de la Planta de Agua Residual en el año 2019 está generando aproximadamente 6925,53 Ton CO₂e.

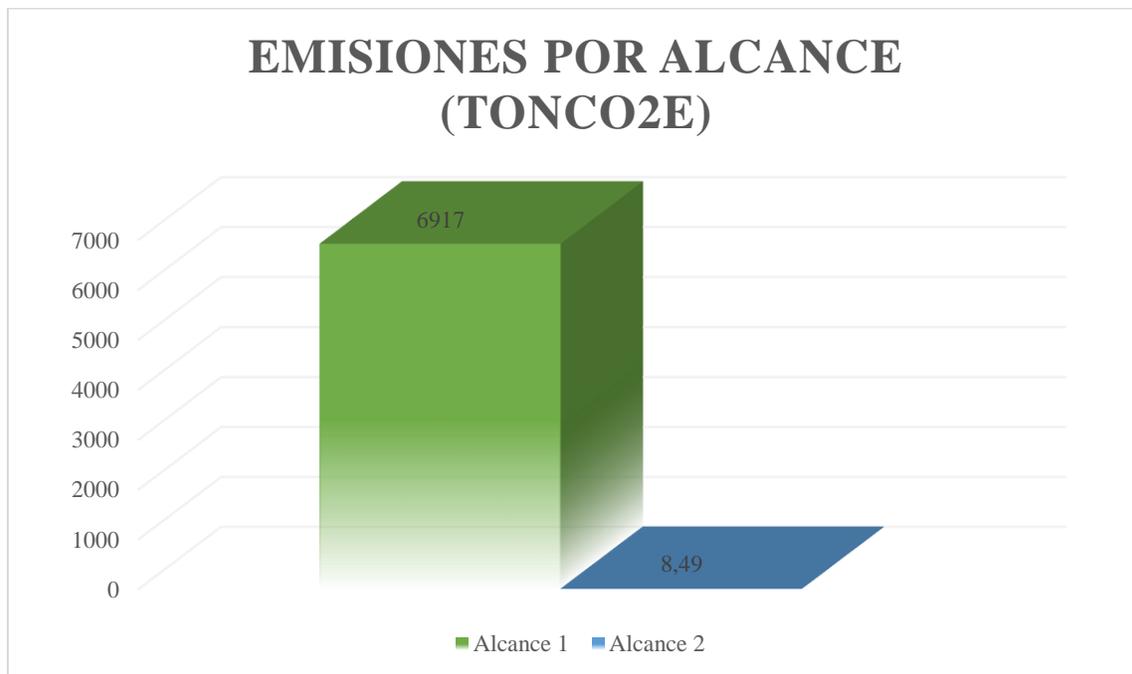


Figura 6 Huella de Carbono en porcentajes según su alcance. Fuente: Autores

Como podemos observar en la *Figura 6*, se puede inferir que casi el 100% de emisiones de GEI están involucradas con las emisiones de alcance 1, siendo el mayor responsable la materia orgánica degradable en las aguas residuales. El 0,1% es responsable las emisiones de alcance 2 correspondiente al consumo de energía que genera la motobomba para el funcionamiento de la PTAR.

Cabe resaltar que, por cada m³ tratado en el sistema de tratamiento de agua residual se emiten 35,39 KgCO₂e/año para emisiones de Alcance 1, para emisiones de Alcance 2 se producen 0,5729 KgCO₂e/año.

6.3 Fase C

Se realizó la estimación de la captación de GEI a partir de las barreras vivas que se encuentran presentes alrededor del Sistema de Agua Residual, donde se cuantificó la biomasa aérea y se analizó la dominancia de las especies para conocer la representatividad de la absorción de emisiones GEI, esta cuantificación se realizó en dos fases: fase de campo y la fase de análisis de datos.

En la fase de campo, se realizó una visita a las instalaciones del Parque Industrial para medir la biomasa aérea, la biomasa es toda materia orgánica viva, se estudió la biomasa aérea incluyendo variables como DAP, densidad de madera y altura del árbol (Alvarez, Benitez, Velasquez, & Cogollo, 2013).

En la *Figura 7* podremos ver el área de influencia del sistema de tratamiento de aguas residuales donde encontramos barreras vivas.

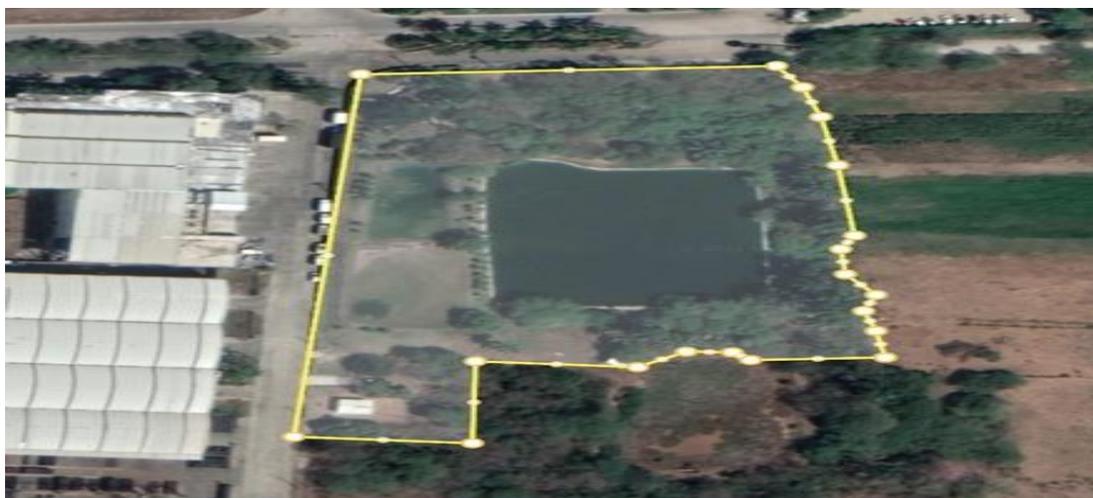


Figura 7 Zona de Muestreo Fuente: Google Earth. Modificado: Autores

Se designó este polígono como la zona de muestreo (ver *Figura 7*), con una medida de 1,4 hectáreas, porque es una zona de fácil acceso para estimar la biomasa aérea. Donde se

identificarán el número de árboles que se encuentran en la zona, su especie, DAP, altura para poder calcular la biomasa aérea.

Fueron encontrados 338 árboles de 14 especies distintas, siendo la *Roystonea Regia* comúnmente conocida como Palmera, la mayor abundante en el polígono estudiado. Seguido de la *Capparis Adoratissima* también conocido como Olivo la especie más dominante, consecutivamente de la *Vachellia Farnesiana*. En la *Tabla 12* podemos observar al detalle de las demás especies encontradas.

Tabla 12

Variables para el cálculo de la remoción de biomasa aérea

ESPECIE	NOMBRE COMUN	NO. DE ARBOLES	PROMEDIO DE DAP	PROMEDIO DE ALTURA	DENSIDAD DEL TRONCO (g/cm3)
<i>Vachellia Farnesiana</i>	Acacia Farnesiana	42	38,078	10,580	0,8
<i>Prosopis Alba</i>	Algarrobo Blanco	3	29,399	7,967	0,785
<i>Guazuma Ulmifolia</i>	Guacimo	24	30,004	7,400	0,51
<i>Psidium Guajava</i>	Guayaba	23	30,350	5,810	0,65
<i>Mangifera Indica</i>	Mango	5	30,534	5,778	0,55
<i>Capparis Adoratissima</i>	Olivo	56	28,721	7,140	0,95
<i>Roystonea Regia</i>	Palmera	115	29,987	8,458	0,76
<i>Quercus humboldtii Sp</i>	Roble	2	29,866	9,350	0,72
<i>Crescentia Cujete</i>	Totumo	1	30,400	6,200	0,63
<i>Prosopis Juliflora</i>	Trupillo	4	28,297	6,700	0,8
<i>Cordia Alba</i>	Uvito	10	28,880	9,583	0,5
<i>Quadrella Odoratissima</i>	Quadrella	9	29,444	5,944	0,061
<i>Machareium Sp</i>	Siete Cueros	22	26,412	4,200	0,774
<i>Spondias Mombin</i>	Hobo	16	29,599	3,000	0,329

Fuente: Autores

Como podemos observar en la *Tabla 12* también se anexo el promedio de la DAP, altura. Fue necesario investigar la densidad del tronco de cada árbol encontrado: *Vachellia Farnesiana* con $0,8 \text{ g/cm}^3$ (Parrotta, 2015); para la *Prosopis Alba* (Catologo Virtual Flora del Valle de Aburra, 2021); *Guazuma Ulmifolia* (Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra, 2021); *Psidium Guajava* (Catalogo Virtual de Flora del Valle de Aburra, 2021); *Mangifera Indica* (Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra, 2021); para el caso de *Capparis Adoratissima* (Noticias Habitat, 2011) fue necesario realizar una conversión de kg/m^3 a g/cm^3 ; *Roystonea Regia* (Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra , 2021); *Quercus Humboldtii Sp* (Builes, Morales, & Wilmar Perez, 2004); *Crescentia Cujete* (Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra , 2021); *Prosopis Juliflora* (El Semillero, 2021); *Quadrella Odoratissima*, *Machareium* y *Spondias Mombin* (Alvarez, Benitez, Velasquez, & Cogollo, 2013).

Se procedió a utilizar la *ecuación 3*, cabe destacar que se determinó el promedio de DAP y altura de todos los árboles encontrados según su especie. El resultado de la *ecuación 3* para cada especie estudiada, se le aplico la *ecuación 4*, resultado que podremos ver en la *Tabla 13* columna 2, luego, se le aplico un factor de conversión, dividiendo el resultado en 1000, con el fin de convertir Kg de Carbono a Tn de Carbono.

Por consiguiente, el resultado de la conversión de cada especie estudiada se le aplico la *ecuación 5*, con el fin de estimar el CO₂ capturado (Ton/Ha) por los árboles estudiados. El resultado lo podremos observar en la columna 3 de la *Tabla 13*.

Tabla 13

Dióxido de Carbono capturado por las especies

ESPECIES	C(Kg)	C(Tn)	CO2 (Tn/Ha)
<i>Vachellia Farnesiana</i>	23641,142	23,641142	82,743997
<i>Prosopis Alba</i>	11138,563	11,138563	38,9849705
<i>Guazuma Ulmifolia</i>	7224,731	7,224731	25,2865585
<i>Psidium Guajava</i>	7396,5101	7,3965101	25,8877854
<i>Mangifera Indica</i>	6359,1679	6,3591679	22,2570877
<i>Capparis Adoratissima</i>	11517,986	11,517986	40,312951
<i>Roystonea Regia</i>	11857,647	11,857647	41,5017645
<i>Quercus humboldtii Sp</i>	12297,968	12,297968	43,042888
<i>Crescentia Cujete</i>	7656,0797	7,6560797	26,796279
<i>Prosopis Juliflora</i>	8992,0982	8,9920982	31,4723437
<i>Cordia Alba</i>	8409,7124	8,4097124	29,4339934
<i>Quadrella Odoratissima</i>	786,3793	0,7863793	2,75232755
<i>Machareium Sp</i>	4963,487	4,963487	17,3722045
<i>Spondias Mombin</i>	2020,01	2,02001	7,070035
TOTAL	124261,482	124,261482	434,915186

Fuente: Autores

Ahora bien, haciendo la sumatoria de todos los resultados de la ecuación 5 de cada especie estudiada, la remoción del aérea de influencia de PIMSA es de 434,9 CO₂(Ton/Ha). En el siguiente grafico podremos observar los porcentajes de captura de CO₂ (Ton/Ha) de cada especie estudiada, (ver Figura 8). Cabe resaltar, que este resultado de captura de CO₂ reportados en este estudio no representan la remoción anual dado que la biomasa aérea puede variar en función de las épocas del año: lluvia y seca. Por lo que la captura de CO₂ está relacionado con factores climáticos.

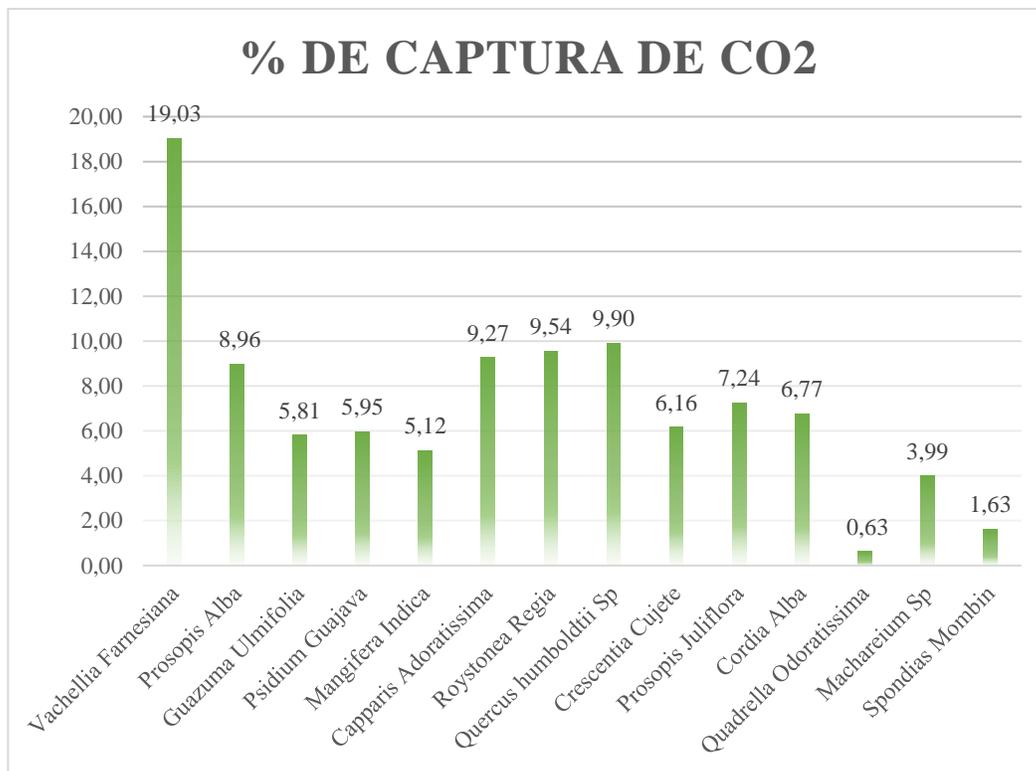


Figura 8 Porcentaje de CO2 captado de cada árbol Fuente: Autores

Los resultados obtenidos por la *Figura 8*, establecen los porcentajes de todas las especies estudiadas, la cual Vachellia Farnesiana con 42 árboles capturó un 19% del total de todas las especies (82,743997 Ton/ha), así mismo, la especie la Quercus humboldtii Sp tuvo un 10% pero solo se encontraron dos árboles de esta especie la cual captó 43,042888 de Ton/ha de CO2, evidenciando la gran capacidad de la biomasa que tiene esta especie para absorber el CO2, además, esta especie se proyecta como la especie que mayor carbono captura a largo plazo, por su condición de vida (Melo, Rodriguez, & Rojas, 2011).

Por otro lado, la especie Quadrella Odoratissima mostro un porcentaje de 1%, con 2,75232755 de Ton/ha de CO2, en el cual se encontraron nueve árboles de esta especie en el área ambiental de PIMSA.

Las especies dominantes *Roystonea Regia* y *Capparis Adoratissima* fueron las especies que tuvieron un alto porcentaje de captación con relación a otras especies, *Vachellia Farnesiana* captó el 19% del total, en cambio la *Roystonea Regia* con 121 árboles absorbió 41,5017645 ton/ha de CO₂ y *Capparis Adoratissima* con 56 árboles capturo 40,312951 ton/ha de CO₂ tuvieron un 9% en la fijación de CO₂. Por otro lado, *Prosopis Albas* que no era considerada una especie dominante con solo tres árboles capturo 31,4723437 ton de CO₂ para un 9% general de las especies, demostrando que la cantidad de árboles no necesariamente es proporcional a la captación de CO₂ sino por las características de la biomasa de la especie dado que cada taxa tiene una capacidad de captura diferente a las demás.

6.3.1 Captura de CO₂ vs Biomasa Aérea

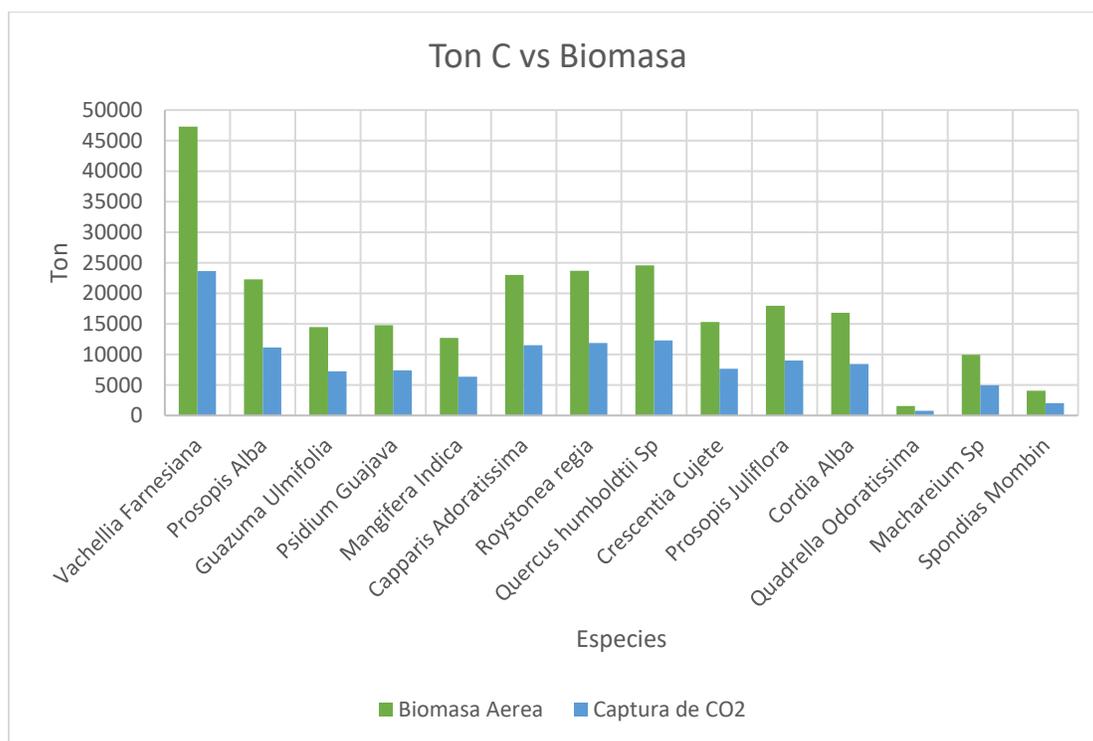


Figura 9 Captura de CO₂ vs Biomasa aérea Fuente: Autores

En la figura 9, se ilustra la capacidad de fijación de carbono con relación a la biomasa aérea de las especies presentes en el área de estudio, siendo directamente proporcional las variables ya

que entre más biomasa aérea tenga una especie, más alta será su capacidad de captar CO₂. Según Brown (2002) los árboles al tener un gran volumen, su biomasa será mayor y por ende su coeficiente de captura de CO₂ será mayor.

6.3.2 DAP vs Biomasa Aérea

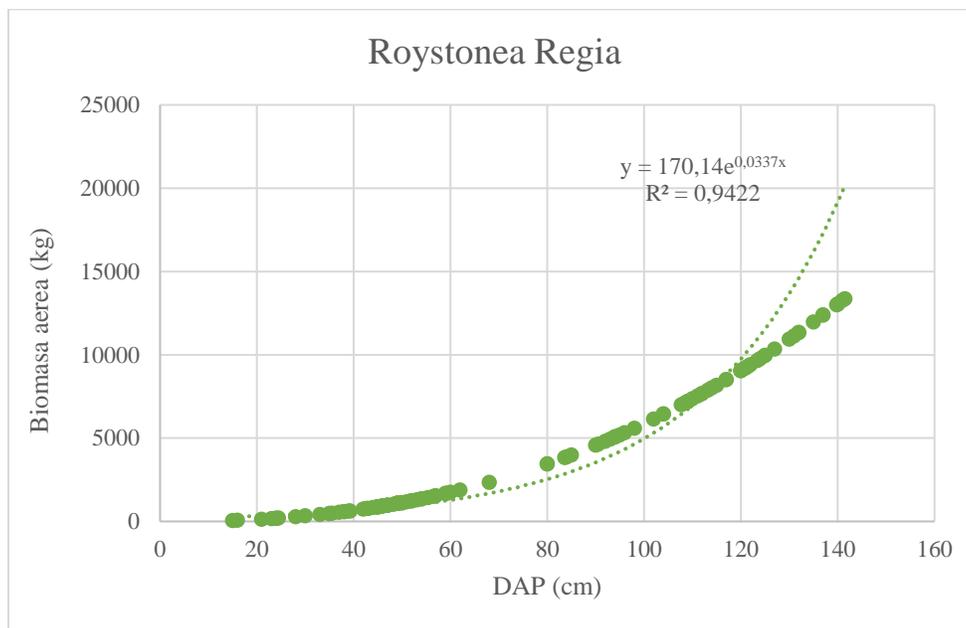


Figura 10 DAP vs Biomasa aérea de la especie *Roystonea Regia* Fuente: Autores

Para estimar la biomasa aérea se manejó una ecuación alométrica utilizada por Álvarez et al., (2012), esta ecuación tiene un carácter exponencial. Observando la *Figura 10*, vemos la especie más abundante del aérea de influencia de PIMSA *Roystonea Regia* comúnmente conocida como Palmera, con respecto a la DAP frente a la biomasa aérea el modelo empleado presento un coeficiente de determinación (r^2) de 0,9422, lo cual indica que el modelo ajustado explica una buena proporción (94%) de la variabilidad de datos de DAP frente a la biomasa aérea. Para López et al. (2017) la variable que mejor predice la biomasa aérea es la DAP. Gomez et al. (2011) concluyo que su modelo alométrico propuesto para predecir la biomasa de *Quercus Magnolia* se ajustó con uno coeficiente de determinación $R^2=0,98$, utilizando la variable DAP.

6.3.3 Abundancia según su Clase Diamétrica

Se realizó una tabla de frecuencia con todos los valores DAP para analizar el número de árboles con dominancia según su DAP, ver *Tabla 14*.

Tabla 14

Tabla de Frecuencia

Intervalos (DAP) en cm	Ci	fi	Fi	ni	Ni	%
(0-17]	8,5	54	54	0,15976331	0,15976331	15,9763314
(17-34]	25,5	77	131	0,22781065	0,38757396	22,7810651
(34-51]	42,5	93	224	0,27514793	0,66272189	27,5147929
(51-68]	59,5	37	261	0,10946746	0,77218935	10,9467456
(68-85]	76,5	14	275	0,04142012	0,81360947	4,14201183
(85-102]	93,5	16	291	0,04733728	0,86094675	4,73372781
(102-119]	110,5	20	311	0,0591716	0,92011834	5,91715976
(119-136]	127,5	19	330	0,05621302	0,97633136	5,62130178
(136-153]	144,5	7	337	0,02071006	0,99704142	2,07100592
(153-170]	161,5	1	338	0,00295858	1	0,29585799
		338		1		

Fuente: Autores

Donde Ci es: amplitud de la clase fi: Frecuencia absoluta, Fi: frecuencia absoluta acumulada, ni: frecuencia relativa, Ni: frecuencia relativa acumulada, %: Porcentaje.

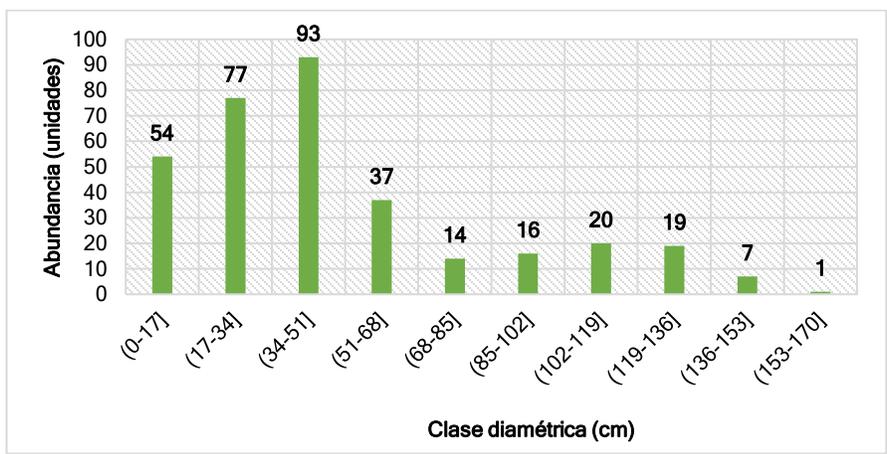


Figura 11 Abundancia de Arboles según su DAP Fuente: Autores

Los resultados obtenidos en la *Figura 11*, evidenciaron que se presenta una mayor cantidad de árboles en los intervalos de tallos 34 – 51 cm con 93 árboles; por otro lado, la clase diamétrica (153-170) es menos abundante ya que cuenta con un árbol, demostrando que en el área ambiental de PIMSA se encuentran gran variabilidad de árboles de pie mediano.

Ahora bien, con relación a los apartados 6.3.3.1 y 6.3.3.2 se concluyó que mayor sea el volumen del árbol, mayor será su capacidad de captura de CO₂ y solo estudiando la variable DAP tenemos un 98% de confianza para determinar la biomasa aérea.

6.4 Fase D

Posteriormente se realizó el balance de las emisiones generadas por la PTAR y la compensación provocada por los árboles presentes.

Ecuación 20

Balance de Emisiones

$$\text{Balance} = \text{Emisiones Totales} - \text{Remocion}$$

$$\text{Balance} = 6925 \text{ TonCO}_2\text{e} - 434 \text{ Ton/hectarea}$$

6.4.1 Análisis de emisión-compensación

El resultado final es de 6490 TonCO₂e de GEI generados por la PTAR. Como observamos en la *Figura 12* el porcentaje de las emisiones generadas es de 94% siendo superior al porcentaje de compensación gracias a la captura de CO₂ por parte de las barreras vivas estudiadas, podemos concluir que las emisiones de GEI generadas por el funcionamiento de la planta de agua residual de PIMSA contribuyen al cambio climático, por lo que es necesario implementar estrategias de mejora para mitigar y/o compensar estas emisiones.

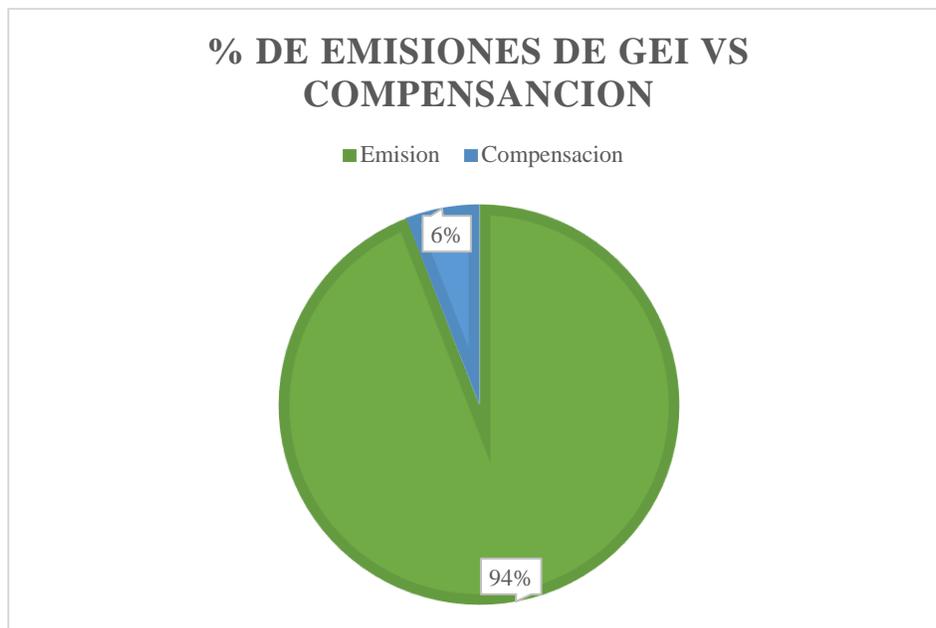


Figura 12 Porcentaje de emisiones de GEI vs Compensación Fuente: Autores

6.4.2 Estrategias de Mejora

Teniendo en cuenta las emisiones generadas por funcionamiento de la PTAR y la compensación producida por los árboles se puede deducir que PIMSA debe implementar medidas enfocadas en la reducción y mantenimiento de su huella de carbono.

Se establecieron las medidas de mejora para la bomba centrífuga de acuerdo con (ONUUDI, 2018) para optimizar el desempeño de los sistemas de bombeo.

Estudios realizados por la Comisión Europea justificaron que los sistemas de bombeo representan aproximadamente el 22% de la demanda de energía de los motores eléctricos de todo el mundo, el cual el 75% es para las bombas centrífugas y el 25% son bombas de desplazamiento positivo.

Por tal motivo se establecerán las siguientes estrategias de mejora en programas de saneamiento y control con el objetivo de obtener ahorros económicos y bajos costos en la estación de bombeo de la PTAR de PIMSA.

- Reducir la cantidad de horas que opera la bomba donde el sistema no lo necesite, para ahorro de energía.
- Realizar mantenimientos al motor, bomba y el sistema de fluidos para un óptimo desempeño.
- Regulación de la válvula de descarga de la bomba.
- Recirculación del flujo.
- Uso de un variador de velocidad.
- Implementar un indicador de presión para saber cuándo apagar la bomba.

Evaluar la posibilidad de utilizar fuentes de energía alternativa, en específico paneles solares para la alimentación del sistema de bombeo de la planta de tratamiento, dado que esto reduciría las emisiones de alcance e incrementaría los índices de compensación. Adicionalmente dado el consumo continuo (24 horas continuas), para cubrir la demanda de cogeneración anual, se requiere la instalación de 2 kit de paneles solares, la cual podría llegar a tener un costo estimado de 12 millones de pesos incluyendo transporte e instalación de paneles solares, la cual tendrá un retorno de inversión del 26%, esto significa que recuperara la inversión y generara un 26% de ganancias del valor invertido y una relación costo-beneficio de que a 24 años PIMSA ahorrara un estimado de \$156.775.920 por solo invertir de 12 millones.

Teniendo en cuenta los resultados de las remociones se propone realizar programas de reforestación para reincorporar vegetación en zonas áridas del polígono estudiado del sistema de tratamiento de aguas residuales de PIMSA, las especies recomendada son: *Vachellia Farnesiana*

ya que es la especie con más capacidad de capturar CO₂; otra especie sería *Prosopis Alba* que con tan solo 3 árboles tiene una capacidad de absorber hasta 39,98 TonCO₂ (ver capítulo 6.3.2 del documento) y/o también *Capparis Adoratissima* que fue la segunda especie con mayor capacidad de captura de CO₂ en la zona de muestreo.

El mercado de los bonos de carbono en Colombia alrededor de los últimos 5 años ha generado más de 800.000 bonos de carbono con el Estándar Verificado de Carbono y más de 200.000 bonos con Gold Estándar y de bonos de carbono voluntarios unos 500.000 fueron comprados por empresas y personas naturales. El parque industrial compenso 403 TonCO₂e de GEI generados por la PTAR, lo cual podría ser beneficiario de 403 bonos de carbono.

Un bono de carbono equivale a una tonelada de CO₂, los bonos de carbono deberán ser certificados por un auditor acreditado, según las metodologías establecidas y los requerimiento por las entidades gubernamentales o por agremiaciones como fundación natura en conjunto del Banco Interamericano, los precios de los carbonos dependerá de la demanda de la empresa de igual manera por la regulación del gobiernos de políticas públicas con las empresas con el objetivo de disminuir las emisiones de GEI (South Pole, 2020).

7. Conclusiones

Se concluye que en la Planta de Agua Residual del Parque Industrial de Malambo en el año 2019 se emitieron 6925 Ton CO₂e, es decir 35,3998 KgCO₂e/año por m³ de agua tratada mayor de los cuales el 99% de emisiones de GEI son de Alcance 1 con un valor de 6917 TonCO₂e o 6917033,18 Kg de CO₂e/año. Las cuales se atribuyen a la degradación de los aportes de la materia orgánica degradable en las lagunas facultativa, anaeróbica y maduración del sistema. Por otro lado, el 1% restante está asociado el consumo de energía en planta (emisiones de Alcance 2) en el cual se emitió 8,492 TonCo₂e/año o 0,5729 Kg de CO₂e/m³ de agua residual tratado.

No obstante, los estudios realizados por (Cristancho, Gamez, Guerra, & Dueñas, 2018) en las plantas de tratamiento de aguas residuales de los municipios aledaños al río de Bogotá en el año 2017, cada PTAR cuentan con una sola laguna, mientras que la PTAR de PIMSA cuenta con tres lagunas de estabilización. En el municipio de Facatativá la PTAR cuenta con una laguna aeróbica la cual emitió 265,328329 Ton CO₂ y en el municipio de Madrid I la PTAR es anaeróbica emitieron 2019,22361 Ton CO₂, siendo PIMSA la que mayor emitió, sin embargo, no se conoce información sobre las empresas que descargan sus aguas al sistema de tratamiento de los municipios cercanos al río de Bogotá, mientras que en PIMSA la mayoría de las cargas proviene del sector metalúrgico.

En cuanto a la remoción, se pudo evidenciar que en un perímetro de 300 a la redonda de la instalación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Parque Industrial, las 14 especies de árboles inventariadas con cerca de 338 individuos en su mayoría perteneciente a la familia *Roystonea Regia* pueden llegar a fijar hasta 434,915 TonCO₂/hectárea.

En tal sentido, dado estos resultados, es posible inferir que alrededor del 94% de las emisiones emitidas anualmente por la emisión de GEI provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales del parque industrial de Malambo es compensada por 1 hectárea de *Vachellia Farnesiana*, finalmente estos resultados sugieren que es probable que dadas las extensiones en hectáreas del complejo industrial y partiendo de su diversidad biológica podría existir una emisión neutral siempre. No obstante, se deben realizar estudio de detalle para corroborar esta hipótesis.

8. Recomendaciones

- ✓ Ampliar el alcance de la presente investigación a otras áreas/dimensiones u organizaciones presentes en el complejo industrial para si poder integrar los resultados de la presente evaluación en el informe de Sostenibilidad Organizacional del año base, dado caso aplique. Además de poder tomarlos como referencia para el diseño de indicadores de gestión relacionados con el impacto de la organización frente al Cambio Climático.
- ✓ Uso de paneles solares para la alimentación de la bomba del sistema de tratamiento de aguas residuales.
- ✓ Tomar los resultados citados en el presente informe como la línea base que será objeto de comparación para evaluar la eficiencia en la consecución de los objetivos y metas definidas para reducir y/o compensar la huella de carbono de la planta de tratamiento de agua residual de PIMSA.
- ✓ Realizar muestreos semestrales para el análisis del comportamiento a través del tiempo, identificando las variabilidades para sacar un promedio anual de compensación.
- ✓ Implementación de pagos de bono de carbono
- ✓ Realizar caracterización fisicoquímica a los lodos industriales, para ampliar el alcance del presente estudio de emisiones de gases de efecto invernadero
- ✓ Ampliar la profundidad de la laguna anaeróbica en base a la Resolución N° 0330 del 2017, la cual establece que la medida de la laguna anaeróbica debe estar entre 2,5 y 5m.

Bibliografía

- Adenex. (21 de 05 de 2020). Obtenido de <https://www.adenex.org/index.php/proyectos/sumideros-de-carbono-el-campo-contr-el-cambio-climatico>
- AEC. (2019). *GHG PROTOCOL*. Obtenido de <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/ghg-protocol>
- Alvarez, E., Benitez, D., Velasquez, C., & Cogollo, A. (2013). *DENSIDAD BÁSICA DEL FUSTE DE ÁRBOLES DEL BOSQUE SECO EN LA COSTA CARIBE DE COLOMBIA*.
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., Salas, G., Valle, I., . . . Rodríguez, L. (2012). *Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia*. *Forest Ecology and Management*. 267, 297-308.
- Anthesis Lavola. (2018). *CleanCO2*. Obtenido de <https://clean-co2.com/es/compensacion-de-carbono/>
- Barrientos, A., Mendez, M., & Welsh, C. (2019). *Analisis inter-temporal de la contaminacion por gases de efecto invernadero: Avances teoricos y perspectivas para Mexico*. Mexico: Digital Ciencia.
- Beatriz, D. r. (2018). *MITIGACION DEL CAMBIO CLIMATICO EN EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA APLICACION AL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. España.
- Bonilla, D. (2016). *ASISTENCIA AL PROCESO DE IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA SEGÚN ISO 50001 Y CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DEL AÑO 2014, SEGÚN ISO 14064 EN AGUAS DE VALLADOLID*. España.
- Brown, S. (2002). *Measuring Carbon in forest: Current status and future challenges*. *Enviromental*.
- Builes, H., Morales, J., & Wilmar Perez, J. D. (2004). *SELECCIÓN DE UN MÉTODO PARA PRODUCIR CARBÓN ACTIVADO UTILIZANDO CUATRO ESPECIES FORESTALES*.
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2017). Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climatico: Una perspectiva desde las Ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*.
- Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra* . (2021). Obtenido de <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/191>
- Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra* . (2021). Obtenido de <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/9>
- Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra*. (2021). Obtenido de <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/143>
- Catalogo virtual de Flora del Valle de Aburra*. (2021). Obtenido de <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/2>
- Catalogo Virtual de Flora del Valle de Aburra*. (2021). Obtenido de <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/77>
- Catalogo Virtual Flora del Valle de Aburra*. (2021). Obtenido de <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/39>
- Ccacoalition. (2020). *Potencial del Calentamiento Global*. Obtenido de https://www.ccacoalition.org/hfcville/es/global-warming-potentials_es
- CEPAL. (2011). *Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina*.

- Chai, C., Zhang, D., Yu, Y., Feng, Y., & Wong, S. (2015). *Analysis of the carbon footprint of the main water treatment technologies. China.*
- CNN. (8 de 06 de 2017). Obtenido de <https://cnnespanol.cnn.com/2017/06/08/estos-son-los-paises-de-america-latina-que-mas-co2-emiten/>
- Comunicarse. (19 de 06 de 2017). Obtenido de <https://www.comunicarseweb.com/noticia/el-sector-energetico-es-el-responsable-del-53-de-las-emisiones-de-gei>
- CORDIS. (2019). *Comisión Europea.* Obtenido de <https://cordis.europa.eu/article/id/386922-efficient-wastewater-treatment-plants-will-push-out-fewer-greenhouse-gases-save-europe-energy/es>
- Cristancho, D., Gamez, W., Guerra, J., & Dueñas, M. (2018). *Estimacion de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del rio Bogota.* Bogota.
- Crites, R., Tchobanoglous, G., Camargo, M., Pardo, L., & Mejía, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones.* McGraw-Hill.
- Diaz, L., & Ramos, N. (2017). *ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA SOCIEDAD PORTUARIA RÍO GRANDE UTILIZANDO LA NORMA ISO 14064.*
- Doorn, R., Irving, W., & Palmer, C. (2006). *TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.*
- Duarte, F. (2014). *Efectos del cambio climático en la economía, el comercio internacional y la estrategia empresarial.*
- DW. (2020). Obtenido de <https://www.dw.com/es/calentamiento-global/t-36884048>
- El Semillero. (2021). Obtenido de <http://elsemillero.net/nuevo/semillas/cuji.html#:~:text=Densidad%200.7%20%E2%80%93%200.8%20g%2Fcm3,gruesa%20y%20grano%20ligeramente%20entrecruzado.>
- EL TIEMPO. (23 de 04 de 1999). *PIMSA: CON VISIÓN DE FUTURO. EL TIEMPO.*
- Estévez, R. (2017). *Eco Inteligencia.* Obtenido de <https://www.ecointeligencia.com/2017/07/huella-carbono/>
- EUROPAL. (7 de 03 de 2018). *Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector.* Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>
- Expok. (2019). *Países más contaminados en América Latina.* Obtenido de <https://www.expoknews.com/paises-mas-contaminados-en-america-latina/>
- FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE MUNICIPIOS Y PROVINCIAS. (2012). *LOS SUMIDEROS DE CARBONO A NIVEL LOCAL.*
- Ferreira, B., & Tarazona, E. (2017). *ESTIMACION DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL BARRANQUILLA UTILIZANDO LA NTC-ISO 14064:2006.* BARRANQUILLA.
- Galarza, C. (2016). *“ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO SEGÚN LA ISO 14064-1 ALCANCE 1 Y 2 DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE CONCRETO PREMEZCLADO Y PRFABRICADO”.*
- García, Á. (23 de 01 de 2019). *iAgua, ¿Cómo puede contribuir el tratamiento de aguas residuales a la lucha contra el cambio climático?* Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/como-puede-contribuir-tratamiento-aguas-lucha-cambio-climatico>

- García, D., Abanto, C., & Castillo, D. D. (2015). *DETERMINACIÓN DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA DE Guadua sarcocarpa Londoño & P. M. Peterson DE LA COMUNIDAD NATIVA BUFEO POZO, UCAYALI, PERÚ.*
- GeoInnova. (21 de 02 de 2019). *Sumideros de carbono, imprescindibles para luchar contra el cambio climático.* Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/sumideros-de-carbono-imprescindibles-para-luchar-contra-el-cambio-climatico/>
- GHG. (2015). *Estandar Corporativo de Contabilidad y Reporte.* Mexico.
- GHG Protocol. (2011). *Quantifying the greenhouse gas emissions of products, PAS 2050 & the GHG Protocol Product Standard.* GHG Protocol Product Standard.
- Gillis, J. (28 de Noviembre de 2015). Short Answers to Hard Questions About Climate Change. *The New York Times.*
- Godoy, M., & Espinoza, B. (2018). *INCIDENCIA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN LA FLORA Y FAUNA DEL ECUADOR.* Servicios Académicos Intercontinentales SL, issue 31, February.
- Gomez, J., Etchevers, J., Monterroso, A., Campos, J., & Tinoco, J. (2011). *Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en Quercus magnoliaefolia.*
- Gonzalez, A., & Annika, C. (2007). *EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CON ALTO POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL: EL SECTOR AGROPECUARIO.* Rio Negro: Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES).
- GREENHOUSE GAS PROTOCOL. (2011). *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard.*
- Grupo Bancolombia. (2020). Obtenido de <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/acerca-de/informacion-corporativa/sostenibilidad/actualidad-sostenible/disminuir-huella-de-carbono-agregar-valor-y-beneficios-a-negocios>
- Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P., & Tiessen, H. (2011). *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales.*
- Hidalgo, M., & Mejía, E. (2010). *DIAGNÓSTICO DE LA CONTAMINACIÓN POR AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, CUENCA BAJA DE LA QUEBRADA LA MACANA, SAN ANTONIO DE PRADO. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.* Medellín.
- IDEAM. (2016). *INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO - COLOMBIA.* Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>
- IDEAM. (2017). *POLÍTICA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO.* Obtenido de <http://www.cambioclimatico.gov.co/directorio-del-cambio-climatico>
- IPCC. (1996). *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.*
- IPCC. (1996). *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996. Vol 2.*
- IPCC. (2001). *IPCC Third Assessment Report.*
- IPCC. (2007). *Cambio climático y biodiversidad.*
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 The Physical Science Basis.*
- Jurado, C., & Lizcano, Y. (2015). *DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO A LA LUZ DEL PROTOCOLO*

- GREENHOUSE GAS (GHG)*. Bogota. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/consecuencias-efecto-invernadero#:~:text=El%20efecto%20invernadero%20es%20un,el%20desarrollo%20de%20la%20vida>.
- López, H., Vaides, E. E., & Alvarado, A. (2017). *EVALUACIÓN DE CARBONO FIJADO EN LA BIOMASA AÉREA DE PLANTACIONES DE TECA EN CHAHAL, ALTA VERAPAZ, GUATEMALA*. ALTA VERAPAZ.
- Mancini, M., Galli, A., Niccolucci, V., Lin, D., Bastianoni, S., Wackernagel, M., & Marchettini, N. (2016). *Ecological Footprint: Refining the carbon Footprint calculation*.
- Manso, D., Parrad, C., & Aristizabal, A. (2017). *Inventario de gases efecto invernadero en la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (Utadeo)*. Bogota.
- Marin, D. (30 de 01 de 2019). *Uexternado*. Obtenido de <https://medioambiente.uexternado.edu.co/abc-de-la-ley-de-cambio-climatico/>
- Melo, O., Rodriguez, N., & Rojas, F. (2011). *CARBONO CAPTURADO Y ACUMULACIÓN DE BIOMASA EN CINCO ESPECIES LEÑOSAS NATIVAS DE LA CORDILLERA ORIENTAL, UTILIZADAS EN PROGRAMAS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN LA SABANA DE BOGOTÁ*. Bogota.
- MinAgricultura. (2015). *Plan de Accion Sectorial (PAS) de mitigacion de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Sector Agropecuario*. Recuperado el 18 de Junio de 2019, de http://capacitacion.siac.ideam.gov.co/SIAC/PAS_Agropecuario_-_Final.pdf
- MinAmbiente. (2021). Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/herramientas-de-educacion-innovacion-y-planificacion-territorial>
- MinCIT. (2014). *PLAN DE ACCION SECTORIAL DE MITIGACION (PAS) SECTOR INDUSTRIA*. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/planes_sectoriales_de_mitigaci%C3%B3n/PAS_Industria_-_Final.pdf
- MinSalud. (2012). *ABECÉ del agua y saneamiento básico*. Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abc-agua.pdf>
- MinTransporte. (2015). *PLAN DE ACCIÓN SECTORIAL DE MITIGACIÓN (PAS) SECTOR TRANSPORTE*. Obtenido de http://capacitacion.siac.ideam.gov.co/SIAC/PAS_Tranporte_-_Final.pdf
- Mondragón, J., Sandoval, A., & Breña, F. (2019). *Calentamiento global: una secuencia didáctica*.
- Nicholls, R., & Tol, R. (2006). *Impacts and Responses to Sea-Level Rise: A Global Analysis of the SRES Scenarios over the Twenty-first Century*. Philosophical Transactions of the Royal Society A.
- Noticias Habitat*. (8 de 07 de 2011). Obtenido de <http://www.noticiashabitat.com/2011/caracteristicas-de-la-madera-de-olivo/#:~:text=Entre%20las%20caracter%C3%ADsticas%20de%20la,irregulares%20y%20de%20superficie%20fina>.
- OECC. (2019). *Guia para la estimacion de Absorciones de Dioxido de Carbono*.
- OMM. (20 de Noviembre de 2018). *Los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanzan un nuevo récord*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2018/11/1446191>
- OMS. (25 de Mayo de 2018). *Lanzamiento de una coalicion sobre la salud, el medioambiente y el cambio climatico*. Obtenido de <https://public.wmo.int/es/media/noticias/lanzamiento->

- de-una-coalici%C3%B3n-sobre-la-salud-el-medioambiente-y-el-cambio-clim%C3%A1tico
- ONU. (1 de 07 de 2019). Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2019/07/1458652>
- ONU. (23 de 11 de 2020). Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484462>
- ONU. (22 de 03 de 2020). *El agua, parte del problema, pero también de la solución ante el cambio climático*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2020/03/1471492>
- ONU. (9 de 09 de 2020). *El cambio climático avanza implacablemente a pesar de la pandemia COVID-19, advierten los científicos*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2020/09/1480142>
- ONUDI. (2018). *MANUAL DE OPTIMIZACION DE SISTEMAS DE BOMBEO*.
- Opcionis. (2017). *¿Que es el Desarrollo Sostenible?* Obtenido de <https://opcionis.com/blog/ques-desarrollo-sostenible/>
- Pardo, M. (2007). *El impacto social del Cambio Climático*. Fundación de las Cajas de Ahorros (FUNCAS).
- Parra, R., Apaza, G., & Agramont, A. (2010). *Estimacion de factores de emision de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales*. La Paz, Bolivia: Revista Boliviana de Química, vol. 27, núm. 2, julio-diciembre, 2010, pp. 81-88.
- Parrotta, J. (2015). *Acacia farnesiana (L.) Willd. Aroma, Huisache*.
- Perez, M. (2020). *DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE AHORRO Y USO EFICIENTE DEL AGUA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES*.
- Perilla, S. (30 de 09 de 2020). *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/bonos-verdes-ya-han-movilizado-1-5-billon-de-pesos-en-el-pais-540835>
- PROCLIM; INRENA. (2005). *INVENTARIO DE NECESIDADES Y PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE INVENTARIOS SOSTENIBLE EN EL SECTOR AGRICULTURA Y CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y SILVICULTURA*.
- Riffo, J. (2017). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. Santiago de Chile.
- Rivas, J. P. (2017). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. SANTIAGO DE CHILE.
- Rojas, R. (2002). *GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*.
- Roldan, P. (31 de 07 de 2017). *Economiapedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/calentamiento-global.html>
- Salmeron, Y., Cabrera, R., Juarez, A., Sampetro, M., Rosas, J., & Rolon, J. (2017). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. Huella de Carbono en Acapulco, México*. Acapulco.
- Semana. (12 de 9 de 2016). Obtenido de <https://www.semana.com/economia/articulo/cuanto-le-cuesta-la-contaminacion-atmosferica-al-mundo/231775/>
- Semana. (18 de 12 de 2018). Obtenido de <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/en-24-anos-aumento-en-un-10-la-emision-de-gases-efecto-invernadero-en-colombia/42410>
- Semana. (26 de 06 de 2019). Obtenido de <https://www.dinero.com/internacional/articulo/como-afecta-el-cambio-climatico-en-la-economia/273678>
- Sepulveda, M. (23 de 09 de 2011). *Efecto Invernadero*. Obtenido de <http://efectoinvernaderotierra.blogspot.com/>

- SIAC. (2015). *Gases de Efecto Invernadero, GEI*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/climaticogei>
- SIAC. (2017). *Impactos Económicos del Cambio Climático*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/web/siac/climaticovulnerabilidad>
- Sigala, J., Gonzalez, M., Prieto, J., Basave, E., & Jimenez, J. (2016). *Relaciones alométricas para predecir biomasa en plantas de Pinus pseudostrobus cultivadas en plantas de Pinus pseudostrobus cultivadas en diferentes sistemas de producción en vivero*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- South Pole. (2020). *El Mercado de Carbono en Colombia: elementos de diseño para lograr su eficiencia*.
- Stern, N. (2008). *The economics of climate change*. American Economic Review, vol. 98, N° 2.
- Taylor, M., & Watts, J. (10 de 10 de 2019). *ElDiario.es*. Obtenido de https://www.eldiario.es/internacional/theguardian/solo-empresas-emisiones-dioxido-carbono_1_1323782.html
- Toro, J. (19 de 02 de 2021). *La Republica*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/globoeconomia/seis-claves-para-reducir-huella-de-carbono-industrial-en-el-mundo-segun-estudio-del-fem-3127738>
- Torres, A., Lara, L., & Marcela, L. (2016). *PROPUESTA PARA LA REDUCCION DE LA HUELLA DE CARBONO EN LAS INSTALACIONES DE LA DIRECCION REGIONAL DEL MAGDALENA CENTRO-CAR. BOGOTA*.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Arias, C., & Garcia, H. B. (2012). *Carbon footprint of sludge treatment reed beds*.
- UNEP. (2017). *RESUMEN DE LAS EVALUACIONES REGIONALES DEL SEXTO INFORME SOBRE LAS PERSPECTIVAS DEL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL: RESULTADOS PRINCIPALES Y MENSAJES POLÍTICOS*.
- UPME. (2019). *Documento de cálculo del FE del SIN 2018 Dic 2019*.
- Uribe, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. CEPAL.
- Vargas, F. (2018). *ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE DE LOS GASES EFECTO INVERNADERO GENERADOS POR EL SECTOR TRANSPORTE*. Santiago de Chile.
- Velasquez, M. (2018). *ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE FUENTES FIJAS INDUSTRIALES DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA*. Barranquilla.
- Vergara, W., Rios, A., Galindo, L., Gutman, P., Isbell, P., Suding, P., & Samaniego, J. (2013). *El Desafío Climático y de Desarrollo en América Latina y el Caribe Opciones para un desarrollo resiliente al clima y bajo en carbono*.
- WaCClim. (2018). *Hacia una Empresa de Agua y Saneamiento Urbano con Bajas Emisiones de Carbono*. Obtenido de https://iwa-network.org/wp-content/uploads/2019/01/2018_WaCCliM_Roadmap_SP_screen.pdf
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). *A definition of "Carbon Footprint"*.
- World Business Council for Sustainable Development. (2005). *Protocolo de Gases de Efecto Invernadero, estandar corporativo de contabilidad y reporte*.

