



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Uso potencial de energía fotovoltaica y el secuestro de CO₂ en biomasa para la neutralización de la Huella de Carbono por el consumo de energía eléctrica en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

Tesis

que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Presenta

Alejandro Corona Mariscal

Zapopan, Jalisco

Diciembre de 2018



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Uso potencial de energía fotovoltaica y el secuestro de CO₂ en biomasa para la neutralización de la Huella de Carbono por el consumo de energía eléctrica en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

Por

Biol. Alejandro Corona Mariscal

Maestría en Ciencias en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Aprobado por:

Dra. Blanca Catalina Ramírez Hernández
Director de tesis e integrante del jurado

Fecha

M.C. Javier Eugenio García de Alba Verduzco
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

Fecha

Dr. Ramón Rodríguez Macías
Asesor del Comité Particular e integrante del jurado

Fecha

M.C. Missael Robles Robles
Sinodal e integrante del jurado

Fecha

Dr. José Luis Navarrete Heredia
Sinodal e integrante del jurado

Fecha

DEDICATORIA

Con especial dedicatoria a mi familia, a mis padres Alejandro Corona y Silvia Mariscal, a mis hermanos, Silvia, Andrea y Miguel y a Santiago mi sobrino, que siempre han sido apoyo y alegría en todos los proyectos que tengo a bien desarrollar.

A mis abuelos, tíos y primos, que siempre están presentes en todos los momentos de mi vida y a mis amigos, que están presentes en mis alegrías y dificultades.

A todas las personas que trabajan y luchan por dejar este mundo en mejores condiciones de como lo hemos encontrado.

“Amarás a la naturaleza de la que formas parte”.

-Eduardo Galeano

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la asignación de la beca.

En especial a la Doctora Blanca Catalina Ramírez Hernández, que ha sido un apoyo incondicional en todo el tiempo desde que nos conocimos, una recta guía y una amiga para todo momento.

A mis asesores de tesis el M.C. Javier Eugenio García de Alba Verduzco y al Dr. Ramón Rodríguez Macías, que tuvieron disponibilidad para ayudar en cada uno de los momentos de mis estudios de la maestría.

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Ecología y Sustentabilidad Aplicada, del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. En especial al Biol. Luis Enrique Lomelí Rodríguez.

A la coordinadora de la maestría, la Doctora Patricia Zarazúa Villaseñor, por todas las atenciones y formalidades brindadas en estos dos años.

Al M.C. Missael Robles Robles, al Dr. al Dr. Viacheslav Shalisko y al Dr. Cristian Galván Villa, por su ayuda en la escritura de tesis y el manejo de los datos.

Y a mi familia por siempre estar al pendiente de mí y de mis necesidades como persona.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS	v
ABREVIATURAS.....	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. HIPÓTESIS	30
4. JUSTIFICACIÓN.....	31
5. OBJETIVOS	32
6. MATERIALES Y METODOS.....	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
8. CONCLUSIONES	71
9. RECOMENDACIONES	72
10. LITERATURA CITADA.....	73

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadros

Cuadro 1.	Población del año 2012 a 2017 en CUCBA	33
Cuadro 2.	Factores de Emisión por Consumo de Energía Eléctrica CFE, en toneladas de CO ₂ /MWh.	34
Cuadro 3.	Huella de carbono por semestre de 2013 a 2017, a partir del consumo Mwh y el Factor de emisión de la CFE.	45
Cuadro 4.	Huella de carbono per cápita según el número de habitantes por semestre y la huella de carbono del CUCBA	45
Cuadro 5.	Proyección de Huella de Carbono Calculado y Proyectado Para el CUCBA	47
Cuadro 6.	Proyección de Huella de carbono calculada y proyectad, la zona sombreada es la protección	49
Cuadro 7.	Comparación entre la HC perC por consumo de energía eléctrica de diferentes universidades	54
Cuadro 8.	Captura de carbono total en toneladas de CO ₂ y el incremento por año calculado.	57
Cuadro 9.	Sistema fotovoltaico necesario para cubrir la demanda energética del CUCBA	50
Cuadro 10.	Área y costo total por módulo fotovoltaico	61
Cuadro 11.	Comparación de la huella de carbono per cápita con otras universidades	66
Cuadro 12.	Árboles necesarios para compensar la huella de carbono en CUCBA por consumo de energía eléctrica en escenarios con y sin implementación del Sistema Fotovoltaico	69

Figuras

Figura 1.	Edificio A - 1, Edificio Ñ - 2, Edificio B y C - 3, Jardín Botánico - 4, Edificio C - 5, Edificio C y D - 6, Edificio D y E - 7, Pasillo Canchas - 8, Biblioteca - 9, Carretera - 10, Estacionamiento - 11, Canchas - 12.	36
Figura 2.	Huella de Carbono en toneladas de CO ₂ eq del CUCBA	46
Figura 3.	Huella de Carbono en toneladas de CO ₂ eq perC del CUCBA	46
Figura 4.	Huella de carbono calculado contra huella de carbono proyectada de 2013 a 2021	48
Figura 5.	Huella de Carbono perC calculada contra proyectada	50
Figura 6.	Proyección de habitantes de CUCBA por Suavización de exponencial doble.	50
Figura 7.	Proyección de Consumo en Mega watt hora de CUCBA por Suavización de exponencial doble	51
Figura 8.	Proyección de toneladas de CO ₂ eq por suavización de método exponencial doble.	52
Figura 9.	Proyección de la huella de carbono en toneladas de CO ₂ eq, calculado.	53
Figura 10.	Proyección en Calculado de toneladas de CO ₂ eq per cápita del CUCBA.	54
Figura 11.	Resultados de la muestra del arbolado en CUCBA	56
Figura 12.	Promedios de los valores de Biomasa, Carbono capturado y CO ₂ capturado.	56
Figura 13.	Crecimiento lineal de la Captura de CO ₂ total en el CUCBA	58
Figura 14.	Sistema fotovoltaico al 80% en kWh de los años 2013 al 2021	60
Figura 15.	Escenarios a mitigar con y sin la instalación del sistema fotovoltaico	64
Figura 16.	Dióxido de carbono en toneladas en un escenario sin Sistema Fotovoltaico	64
Figura 17.	Dióxido de carbono en toneladas en un escenario con Sistema Fotovoltaico	65
Figura 18.	Huella de carbono per cápita con y sin la instalación del Sistema fotovoltaico	65
Figura 19.	Costo en pesos de la compensación de la huella de carbono con y sin la instalación del Sistema Fotovoltaico.	68
Figura 20.	Número de árboles necesarios para la carbono neutralidad, en escenarios con y sin sistema fotovoltaico, con el cuidado de los árboles a 1 y 5 años.	70

ABREVIATURAS

AMG	Área Metropolitana de Guadalajara
CAC	Captación de Carbono
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
CFC	Cloro Fluoro Carbonados
CGUN	Red Universitaria Verde de China
CN	Carbono Neutral
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
COP	Conferencia de las Partes
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CUCBA	Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho
FAO	Food and Agriculture Organization / Organización de Comida y Agricultura
FCCC	Convenio Marco de las Naciones Unidas por el Cambio Climático
FE	Factor de Emisión
FR	Forzamiento radiativo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GTI	Grupo de trabajo I
GTII	Grupo de trabajo II
GTIII	Grupo de trabajo III
GW	Giga watts
GWP	Poder de Calentamiento Global
HC	Huella de Carbono
IEA	Agencia Internacional de Energía
INC	Comité Intergubernamental de Negociaciones

IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
kWh	Kilo watt hora
LGCC	Ley General del Cambio Climático
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental
LTE	Ley de Transición Energética
MA	Modelos Alométricos
MW	Mega watts
NIR	Infrarrojo cercano
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible
PEMEX	Petróleos Mexicanos
perC	per Cápita
PIB	Producto Interno Bruto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente
SEMADET	Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Estado de Jalisco
SF	Sistema Fotovoltaico
TWh	Tera Watts Hora
UdeG	Universidad de Guadalajara
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UV	Ultra Violeta
WBCSD	Concilio Mundial de Negocios del Desarrollo Sostenible
Wm ²	Watts sobre metros cuadrados
WMO	Organización Meteorológica Mundial
WRI	Instituto de Recursos Mundiales

RESUMEN

La huella de carbono es uno de los indicadores del impacto ambiental de los humanos sobre los ecosistemas más utilizada en la actualidad, para esta investigación se calculó por primera vez la HdeC, en base a la metodología del IPCC, del CUCBA por el consumo de energía eléctrica; los resultados indican que se emitieron 1043.533 toneladas de CO₂ en 2017, mientras que en el centro se capturaron en el 2017, 42.9 toneladas de CO₂ con los árboles; si se instala un Sistema fotovoltaico al 80% del consumo de energía eléctrica, el CUCBA solo debería compensar 165.8 toneladas de CO₂, ya descontando el CO₂ de la captura de los árboles existentes en el centro universitario; estas toneladas restantes se pueden mitigar con 3,943 árboles de *Pinus douglasiana* mantenidos durante 5 años en las condiciones óptimas de riego y suelos, llegando así a la neutralidad de carbono en el centro universitario por consumo de energía eléctrica.

ABSTRACT

The carbon footprint is one of the indicators of pollution most used today, for this research the carbon footprint of CUCBA was calculated for the consumption of electric power and the results, 1043,533 tons of CO₂ equivalent were emitted in 2017, while that the center captured only 42.9 tons of CO₂ with the trees this year, if a photovoltaic system is installed at 80% of the electric power consumption, the CUCBA should only compensate 165.8 tons of CO₂, already discounting the CO₂ from the capture of the trees in the center; these remaining tons can be mitigated with 3943 *Pinus douglasiana* trees maintained for 5 years in the optimal conditions of irrigation and soils, thus reaching carbon neutrality in the university center.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio climático y el calentamiento global son dos de los problemas ambientales más importantes (Jack and Kelly 2012), esto representa una grave amenaza para el sistema ecológico mundial y la estabilidad de la sociedad humana (IPCC 2007a; Jacobson 2009) y es muy probable que se origine por el aumento de las emisiones de carbono y deforestación (IPCC 2007a). La preocupación sobre la degradación ambiental surge cuando los recursos naturales son utilizados a un ritmo mayor a las capacidades de los ecosistemas por producirlos; o cuando los desechos se generan a una velocidad mayor a la capacidad de absorción del planeta (Foladori et al. 2005), siendo así que varios países y organizaciones internacionales están tratando de resolver los problemas ambientales, específicamente el cambio climático (IPCC 2008).

En el año de 1997, una vez comprendidas, la ciencia y las consecuencias del calentamiento global, y ante la preocupación por prevenir el cambio climático se desarrolló el Protocolo de Kioto, que requiere a las economías desarrolladas y en transición para reducir las emisiones de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) (United-Nations 1998).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha recomendado limitar el incremento de la temperatura global por debajo de los 2°C comparado con la época preindustrial, (1750), para evitar las amenazas ecológicas y económicas. Hasta ahora se ha registrado un aumento de temperatura de 0.74°C con respecto a la fecha inicial (IPCC 2007b).

No actuar de inmediato en contra del calentamiento global costará al menos el 5% de la pérdida anual del producto interno bruto mundial (PIB), mientras que la inversión anual equivalente al 1% del PIB mundial podría ayudar a limitar el aumento de la temperatura mundial por debajo de 2°C (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011).

En 1896, Svante Arrhenius señaló que el CO₂ atmosférico permitía el paso de la energía de onda corta a la superficie de la Tierra, mientras que reflejaba el calor de la radiación de onda larga (Arrhenius 1896). En 1937, Trewartha uso por primera vez el

término de “Efecto invernadero” para describir como los gases atmosféricos estabilizan la temperatura de la tierra permitiendo pasar la luz visible y la radiación UV del sol, para calentar la superficie de la tierra, y al mismo tiempo bloquear el escape de la radiación infra roja (Trewartha 1937).

En la actualidad sabemos que el efecto invernadero es un proceso natural, mediante el cual una parte de la radiación de onda larga que capta la superficie de la Tierra es absorbida por los GEI y se vuelve a emitir dentro del planeta en todas direcciones, provocando calor, esta ha existido desde que el planeta tiene atmósfera (4,000 millones de años) (Lagzi et al. 2013; Caballero, Lozano, and Ortega 2007). La atmósfera, está compuesta de 78.084% nitrógeno, 20.946% oxígeno, y .934% argón; 0.0394% CO₂ y el resto corresponde a otros gases (Lagzi et al. 2013).

El 30% de luz que recibe el planeta es reflejado como espejo hacia el espacio, a esto se le denomina albedo, la atmósfera retiene el 20% de la energía solar y el 50% restante llega hasta la superficie terrestre, calentándola (Caballero, Lozano, and Ortega 2007). Sin el efecto invernadero estaríamos perpetuamente congelados, con una temperatura media global de cerca de -15°C, en comparación con los 15 °C que es la temperatura media del planeta. Por tanto, la composición de la atmósfera afecta de manera directa la temperatura de la Tierra; mientras más gases de invernadero como el CO₂ se encuentren en la atmósfera, mayor será la temperatura global del planeta, y mientras menos haya, la temperatura disminuirá (Caballero, Lozano, and Ortega 2007).

El rápido aumento de la temperatura global se debe al llamado efecto invernadero mejorado, es decir, el efecto invernadero adicional al natural, debido a la liberación de GEI inducida por los humanos a la atmósfera (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011).

La concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) ha aumentado de 279 a 397 ppm desde la época preindustrial, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles (Güereca, Torres, and Noyola 2013). Las emisiones mundiales han crecido un 39% entre 1990 y 2008 (Peters 2008), lo que ha provocado un calentamiento en el planeta sin precedentes.

A este aumento en la temperatura mundial le llamamos calentamiento global, y se refiere a la tendencia a incrementar, que durante los últimos 150 años, ha mostrado la temperatura global, fenómeno que se atribuye al efecto de la contaminación humana (Caballero, Lozano, and Ortega 2007). El calentamiento global aumenta el estrés térmico, las enfermedades, la fuerza de las tormentas tropicales, la acidez del océano, los niveles del mar y el derretimiento de los glaciares, la capa de nieve y el hielo marino (IPCC 2007a).

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede identificarse por cambios en la media y / o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un período prolongado, típicamente de décadas o más (IPCC 2007b). Así mismo, el cambio climático, es la suma del calentamiento global y todas las variaciones del clima que ha ocurrido durante la historia del planeta Tierra, (4,000 millones de años) que puede deberse a procesos internos naturales, como cambios en la actividad solar, en la circulación oceánica, en la actividad volcánica o geológica y en la composición de la atmósfera, o forzamientos externos, es decir cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra (Caballero, Lozano, and Ortega 2007; IPCC 2007b).

Por tanto, una vez conscientes de las implicaciones del cambio climático, la demanda de productos y servicios ecológicos, aumentará, sumado a la presión para reducir las emisiones y divulgar datos sobre el impacto ambiental (Wang and Chiu 2014). Una de estas iniciativas ambientales es la huella de carbono, un indicador para la medición de la generación de emisiones debido a las actividades antrópicas (Schneider and Samaniego 2010), esta suele cuantificarse como el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), que representa las cantidades de GEI que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático (Huang et al. 2016).

No todos los GEI tienen la misma capacidad de provocar el calentamiento en el planeta, sus fuerzas dependen del forzamiento radiactivo que causa y del tiempo promedio durante el cual esa molécula de gas permanece en la atmósfera, a este fenómeno se le denomina GWP, y se expresa en relación con el potencial de calentamiento global del CO₂. Por lo tanto, la unidad de GWP es equivalente de dióxido de carbono (CO₂-e) (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011).

Dicho lo anterior, es de vital importancia replantear el aprovechamiento de los recursos naturales para la generación de bienes y servicios, poniendo especial atención en la generación de energía eléctrica, rediseñando las políticas de desarrollo, con la búsqueda de una estrategia sustentable para el abastecimiento energético a partir del aprovechamiento de recursos naturales renovables, ya que durante mucho tiempo se ha producido la energía mediante fuentes fósiles y estas han traído consigo contaminación fuera del control humano (Peláez 2016).

2. ANTECEDENTES

2.1. La crisis ambiental y el cambio climático

Los problemas ecológicos y sociales no se pueden separar y se pueden clasificar en una categoría común de problemas eco-sociales o problemas ambientales. Mismos que provienen de la relación rota entre la sociedad y el ecosistema (Kocmanová and Dočekalová 2012). La relación del sistema social con el sistema ecológico implica una interacción recíproca entre ambas entidades, esta interacción es el medio ambiente (Maya 2013). Donde el ecosistema sufre siempre la acción transformadora del humano, y el ecosistema afecta y determina, a la vez, al sistema social en un proceso de acciones e interacciones (Bifani 1999).

El humano transforma los ecosistemas usando instrumentos o tecnologías que, a diferencia con los usados por otras especies, son acumulados a lo largo del tiempo (Foladori et al. 2005). Estas tecnologías se han ido convirtiendo en un elemento fundamental para satisfacer las necesidades sociales básicas, las cuales han ido cambiando dependiendo de las pautas culturales y los modelos de desarrollo, produciéndose así una diversificación progresiva y una complejidad creciente de necesidades, cuya satisfacción requiere de un proceso productivo cada vez más sofisticado (Agoglia 2011).

Sin embargo, la preocupación por los problemas medio ambientales no debe basarse estrictamente ni en la utilización de recursos naturales ni en la generación de residuos, ya que es algo natural, inevitable, y común a cualquier especie de ser vivo.

Uno de estos problemas ambientales en la actualidad es el cambio climático, que expone a las personas, las sociedades, los sectores económicos y los ecosistemas a riesgos. El riesgo se refiere a posibles consecuencias en situaciones en que algo de valor está en peligro y el desenlace es incierto (IPCC 2014a). Por cambio climático se entiende una serie de transformaciones en el clima de la Tierra que impactan significativamente los ecosistemas, la vida en general y la vida humana en particular (Foladori et al. 2005).

El aumento de la temperatura es provocado por el humano y a este se le atribuyen a las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, mismas que se ha considerado como uno de los principales desafíos en el siglo XXI (Zhou and Wang 2016). Los GEI se generan mediante el consumo de combustibles fósiles, la quema de biomasa, la cría de ganado y otras actividades (Foladori et al. 2005).

Los riesgos de los impactos del cambio climático surgen de la interacción entre un peligro (provocado por un fenómeno o tendencia relacionados con el cambio climático), la vulnerabilidad (susceptibilidad a sufrir daños) y la exposición (personas, activos o ecosistemas en riesgo). Los peligros abarcan procesos que van de fenómenos breves, como tormentas violentas, a tendencias lentas, como sequías a lo largo de varias décadas o el aumento del nivel del mar a lo largo de varios siglos. La vulnerabilidad y la exposición se ven influidas por diversos procesos sociales y económicos, con posibles aumentos o disminuciones en función de las trayectorias de desarrollo. Los riesgos y los co-beneficios también provienen de políticas que tienen por objeto mitigar el cambio climático o adaptarse a este (IPCC 2014a).

La degradación de los ecosistemas, provoca estos riesgos para el sistema social, dando como resultado, desastres naturales, que amenazan la seguridad y la salud de los humanos (Walther et al. 2002). Por ejemplo, en la actualidad, la temperatura media mundial es de 0.85°C, sobre la temperatura preindustrial (IPCC 2013).

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) las políticas actuales con respecto al cambio climático y el aprovechamiento de Recursos Naturales pueden resultar insuficientes para frenar el calentamiento global (Hernández 2015). Tenemos que centrar nuestras acciones en cómo enfriar el planeta y las alternativas nos remiten a la descarbonización del sistema eléctrico y a la captura de carbono (González Couret 2015).

2.2. Historia de la lucha contra el Calentamiento Global

El cambio climático debido al efecto invernadero mejorado ha surgido como un gran desafío ambiental, que la humanidad debe afrontar hoy (Jain 1993). Aunque el tema del calentamiento global por los gases de efecto invernadero surgió hace más de un siglo (Arrhenius 1896), el cambio climático no tomó importancia política hasta los años noventa del siglo XIX (Bodansky 2001). Debido a que la naturaleza de la ciencia de la Tierra: para ser genuinamente científica, necesita una declaración susceptible a las pruebas que potencialmente podrían mostrar que es falsa (Popper 1959). Y esto es un gran problema dado que una característica de las ciencias de la Tierra es que los científicos no pueden realizar experimentos controlados en el planeta como un todo y luego observar los resultados (Joachim et al. 2005).

Para conocer la concentración históricas de CO₂ y comprar la magnitud del aumento antropogénico con los ciclos naturales del pasado, se analizó el aire contenido en las burbujas de los núcleos de hielo de Groenlandia y la Antártida (Treut et al. 2007). Las mediciones precisas de la concentración de CO₂ atmosférico, de Charles David Keeling en 1958, constituyen la serie cronológica maestra que documenta la composición cambiante de la atmósfera. Estos datos son icónicos como evidencia del efecto de las actividades humanas en la composición química de la atmósfera (Keeling 1998; Keeling 1960).

En el año de 1960, se estableció que el CO₂, el principal gas de efecto invernadero, estaba aumentando sus concentraciones en la atmósfera, la actualidad a esto le conocemos como la curva de Keeling (Keeling 1960), misma que muestra este aumento, hecho que condujo al crecimiento inicial de la preocupación científica sobre el calentamiento global, a finales de los sesenta y principio de los setenta. De 1970 a 1980, las mejoras en tecnologías permitieron a los científicos desarrollar modelos informáticos más sofisticados, dando más confianza a las predicciones del calentamiento global. Además de esto, a mediados de la década de los ochenta, los científicos reconocieron que las emisiones antropogénicas de otros gases como el metano y los óxidos nitrosos también contribuyen al efecto invernadero, haciendo que el problema sea aún más serio de lo que se creía anteriormente (Bodansky 2001).

El establecimiento del “Grupo sobre gases de efecto invernadero” bajo los auspicios conjuntos de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en ingles) y el Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente, PNUMA, ayudaron a familiarizar a los políticos y tomadores de decisiones con el problema del cambio climático, incluidos también otros problemas ambientales como el agotamiento de la capa de ozono estratosférico, la deforestación, la pérdida de diversidad y la contaminación de los océanos (Bodansky 2001).

En junio de 1988 en una conferencia organizada por Canadá, se propuso reducir el CO₂ en 20% para el año de 2005, así mismo se desarrolló el convenio marco para proteger la atmósfera y el establecimiento de un fondo mundial financiado por los impuestos a los combustibles fósiles (Bodansky 2001). La WMO y el PNUMA establecieron en ese mismo año el IPCC, con la función de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica relevante para la comprensión del riesgo del cambio climático inducido por el humano. Con esta información se crean informes basados en la mejor ciencia disponible. Sin embargo, debe reconocerse que el IPCC también contribuye a la ciencia identificando las incertidumbres clave y estimulando y coordinando investigaciones específicas para responder preguntas importantes sobre el cambio climático (Treut et al. 2007).

El IPCC funciona en base a tres grupos de trabajo distintos, el primero es el Grupo de Trabajo I (GTI) mismo que evalúa los aspectos científicos del sistema climático y el calentamiento global, el Grupo de Trabajo II (GTII) evalúa la vulnerabilidad y adaptación de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático y el Grupo de Trabajo III (GTIII) evalúa las opciones de mitigación para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (Treut et al. 2007). Hasta 1988, el problema del cambio climático había sido dominado esencialmente por actores no gubernamentales, principalmente científicos orientados al medio ambiente, sin embargo, desde la creación del IPCC, el cambio climático surgió como un tema intergubernamental (Bodansky 2001).

En el año de 1990, la Asamblea General de las Naciones Unidas, posterior al primer informe del IPCC (Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C 2001), estableció el Comité Intergubernamental de Negociación (INC, por sus siglas en ingles) para la Convención

Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (FCCC, por sus siglas en ingles), (INC/FCCC), para que las resoluciones sean adecuadas a todos las partes (Bodansky 2001).

En el año de 1992, el FCCC se abre firmas en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo celebrada en Río de Janeiro (Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C 2001), surgiendo así la Declaración de Rio sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. En 1994 FCCC entró en vigor, proporciona el marco político general y la base legal para abordar el problema del cambio climático (Treat et al. 2007).

Para el año de 1995, se realiza la Primera Conferencia de las Partes (COP1) en Berlín, misma que desde entonces se ha reunido anualmente, la COP es la responsable de mantener el proceso de lucha contra el Cambio Climático en marcha (Vengoechea 2012). En este mismo año el IPCC publica su Segundo Informe de Evaluación, de los tres grupos de trabajo, y un informe de síntesis (Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C 2001).

El protocolo de Kioto, mismo en el que los países industrializados toman compromisos concretos y acciones específicas fue creado en 1997, este fue un gran avance pues logró vincular a todos los países firmantes para reducir las emisiones de GEI 5.2%, para el periodo de 2008-2013, con respecto a 1990 (Vengoechea 2012).

En el año de 1998, el IPCC crea el equipo de inventarios nacionales de GEI, mismo que supervisa los Inventarios Nacionales de GEI, de los países (Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C 2001). En el 2001 el IPCC publica su Tercer Informe de Evaluación con los tres grupos de trabajo y un informe de síntesis (Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C 2001).

A pesar de que el protocolo de Kioto como fue planeado para el año de 1997 no se logró, por lo tanto en el año de 2007 se comenzó un proceso de negociación para el cumplimiento del mismo en un segundo periodo, con una vigencia renovada de los años 2012 a 2020. La hoja de ruta, que se creó en Bali, se centró en torno a lograr una visión común, mitigación, adaptación, tecnología y financiamiento (Vengoechea 2012). En este mismo año 2007 el IPCC publica su Cuarto Informe de Evaluación, con los tres grupos de trabajo y el informe de síntesis (Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C 2001).

La Conferencia de Copenhague, en 2009, fue una de las que más interés atrajo ya que más de 40 mil personas aplicaron para una acreditación en la misma. En esta conferencia se firmó el acuerdo de Copenhague, en el cual se logró fijar la meta de que el límite máximo para el incremento de la temperatura media global sea 2°C (Vengoechea 2012).

La conferencia de Cancún en 2010 fue importante para asegurar que en las COPs se llegue a compromisos políticos para enfrentar el cambio climático. Aquí se crea el Fondo Verde para el Clima, para el financiamiento de proyectos y actividades en países en vías de desarrollo (Vengoechea 2012). Posterior al conferencia de Cancún, en 2012 fue la conferencia de Rio +20, denominada el futuro que queremos, a 20 años de la primera conferencia en Rio en 1992, reafirmando el compromiso para enfrentar el cambio climático (Naciones Unidas 2012).

En diciembre del año 2015, se llevó a cabo la COP 21 en París, en donde se esclarece seguir trabajando en medidas de mitigación y adaptación, así como la financiación de proyectos referentes al cambio climático (Naciones Unidas 2015).

Y lo más reciente es la Conferencia de las Partes en Marrakech, que se llevó a cabo en noviembre del 2016, donde 111 países ratificaron el acuerdo de París, lo cual suma el 80% de las emisiones mundiales, continuando así la lucha en contra del cambio climático (Naciones Unidas 2017).

2.3. Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático

La atmósfera es una capa de gases que cubre la Tierra y se creó como resultado del escape de los gases que quedaron atrapados dentro del planeta durante su formación inicial, a través de volcanismo (Jain 1993). La atmósfera actual de la Tierra es una mezcla de gases que consiste de aproximadamente 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón. Estos tres gases son radiactivamente inactivos y no juegan un papel apreciable en asuntos climáticos. El entorno que crea la atmósfera es único y ha logrado que la vida prevalezca en la Tierra durante los últimos 4 mil millones de años (Jain 1993).

A partir de la época industrial, como parte del desarrollo de la civilización, la humanidad ha consumido hidrocarburos, como lo son el petróleo, el carbón y el gas natural, mismos que la Tierra ha acumulado durante los últimos 500 millones de años (Cossio et al. 2012), liberando así el CO₂ y otros Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los principales gases de efecto invernadero antropogénico son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (NO₂) y los clorofluorocarbonos (CFC) (Jain 1993) así mismo el ozono estratosférico (O₃), es otro GEI importante, que se forma a partir del oxígeno bajo la influencia de los rayos ultravioleta. El vapor de agua es un GEI natural y es el más importante. La concentración de vapor de agua varía ampliamente según la ubicación, la estación y el tiempo (Jain 1993). Así mismo el dióxido de carbono, CO₂, es el GEI antropogénico más importante debido a su contribución dominante al calentamiento global (Jain 1993).

Los CFC, mismos que han sido utilizados por la humanidad para los aerosoles, los refrigerantes, los aires acondicionados o como solventes, son muy peligrosos, y han sido responsables del agotamiento del ozono troposférico el cual es otro GEI. Este gas en la estratosfera, absorbe los letales rayos ultravioleta del sol, mientras que en la troposfera es un peligro para la salud (Jain 1993).

Se sabe que la influencia humana incide en el calentamiento de la atmósfera y el océano, por los cambios en el ciclo global del agua, las reducciones de nieve y hielo, el aumento del nivel medio global del mar y por los cambios extremos climáticos (IPCC

2013). Así mismo, existe también el efecto invernadero mejorado, mismo que es causado por las emisiones de GEI de origen antropogénico, y tiene el potencial de causar un calentamiento global sin precedentes y un cambio climático en la Tierra que conducen a una destrucción generalizada, catástrofes y cambios en nuestro sistema planetario (Jain 1993).

La temperatura promedio del planeta es el resultado del equilibrio entre la energía solar absorbida por la Tierra y la radiación infrarroja emitida por la Tierra hacia el espacio exterior (Jain 1993). Para equilibrar la absorción de 240 Wm^2 del Sol, la Tierra debe emitir la misma cantidad de energía hacia el espacio; lo cual hace como radiación infrarroja. El planeta emite mucho más de 240 Wm^2 , pero el efecto de la absorción y emisión de radiación infrarroja por los GEI, es reducir la cantidad que alcanza el espacio hasta que equilibra aproximadamente la energía entrante del Sol. De este modo, la superficie se mantiene más caliente, porque, además de la energía que recibe del Sol, también recibe energía infrarroja emitida por la atmósfera. El calentamiento que resulta de esta energía infrarroja, se conoce como efecto invernadero (The Royal Society 2010).

Es notable que desde hace 10,000 años atrás hasta el año de 1750, las concentraciones de dióxido de carbono se mantuvieron dentro de un rango de 280 ± 20 ppm. Durante la era industrial y hasta 1999, las concentraciones aumentaron a 367 ppm (Etheridge et al. 1996) hasta llegar a 379 ppm en 2005, debido al efecto invernadero mejorado.

Es así como este cambio en la concentración de los GEI, producido por el humano, puede tener un efecto significativo en la estructura térmica de la atmósfera (W. C. WANG, Y. L. YUNG, A. A. LACIS, T. MO 1976). Un cambio en la concentración atmosférica de GEI, ya sean naturales o inducidos por el humano traerá cambios en el efecto invernadero (Cossio et al. 2012). El cambio climático a escala global, ya sea natural o debido a la actividad humana, puede iniciarse mediante procesos que modifican la cantidad de energía absorbida por el Sol o la cantidad de energía infrarroja emitida al espacio.

El desequilibrio entre la radiación absorbida y emitida que resulta de estos cambios se denominará "forzamiento radiativo" y se expresará en unidades de Wm^2 . Un forzamiento

radiativo positivo tenderá a causar un calentamiento y un negativo forzará un enfriamiento (The Royal Society 2010).

Cada vez hay más pruebas que sugieren que los cambios en la radiación solar podrían causar cambios en la temperatura de la superficie del orden de unas pocas décimas de grado centígrado (Treat et al. 2007). El Sol es la principal fuente de energía para el clima de la Tierra, en longitudes de onda ultravioleta (UV), de luz visible e infrarroja cercana (NIR) (Isaksen et al. 2012). La Tierra recibe 5.45×10^{24} J de energía solar anualmente por transferencia radiativa. Esta energía es una fracción diminuta, apenas un 4.55×10^{-8} % de la energía total emitida por el Sol (Jain 1993). Alrededor del 30% de la energía del Sol que llega a la Tierra se refleja hacia el espacio por nubes, gases, pequeñas partículas en la atmósfera y por la superficie de la Tierra, a este efecto se le llama albedo (The Royal Society 2010; Treat et al. 2007). El resto, alrededor de 240 vatios por metro cuadrado (Wm^2) es absorbido por la atmósfera y la superficie terrestre (The Royal Society 2010).

Los datos combinados de la temperatura de la superficie terrestre y oceánica promediados globalmente, muestran un calentamiento de 0.85°C , durante el período de 1880 a 2012 (IPCC 2013). Las observaciones del sistema climático se basan en mediciones directas y teledetección desde satélites y otras plataformas. Las observaciones a escala global comenzaron a mediados del siglo XIX, midiendo la temperatura y otras variables, con el tiempo estas observaciones se han ido mejorando y diversificando (IPCC 2013).

2.4. La huella de carbono

El IPCC ha recomendado limitar el incremento de temperatura global por debajo de los 2°C comparado con 1750, para evitar las amenazas ecológicas y económicas, que se desatarían con un incremento mayor en la temperatura. Ya se ha registrado un aumento de 0.74 ° C, por lo tanto es inminente que la comunidad científica y política centre sus acciones para frenar el calentamiento global (IPCC 2007b). Las emisiones antropogénicas de GEI son la principal razón de este calentamiento (IPCC, 2006).

En continuidad con esto, el IPCC ha creado la figura de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: en donde se miden todas las fuentes antropogénicas de emisiones de GEI. Estas fuentes se clasifican en cuatro sectores: a) energía, b) procesos industriales y uso de productos, c) agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra y d) desechos (IPCC 2008).

La huella de carbono se define como la cantidad de GEI expresada en términos de CO₂-e, emitidos a la atmósfera por un individuo, organización, proceso, producto o evento desde dentro de un límite especificado (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011). La HdeC se ha convertido, en este sentido, en uno de los indicadores más importantes de la protección del medio ambiente, dado que representa las emisiones de GEI (Wiedmann and Minx 2007; Galli et al. 2012).

La huella de carbono puede ser vista como un híbrido, derivando de la "huella ecológica", y conceptualmente ser un indicador del GWP. Existen pocos estudios que informen de la huella de carbono en términos de hectáreas globales, a pesar del nexo existente entre la huella ecológica y la huella de carbono (Browne, O'Regan, and Moles 2009). Aun con las diferencias predominantes entre los cálculos, se ha aceptado el CO₂ equivalente (CO₂-e) basado en el GWP de 100 años como unidad informadora de la huella de carbono (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011). El GWP se expresa como un factor de CO₂ (cuyo GWP está estandarizado a 1) (Zhao, Zeng, and Yuan 2015).

Para los inventarios los datos de GEI se traducen en CO₂-e utilizando factores de conversión proporcionados por IPCC (The British Standards Institution 2011). A pesar de

su nombre, la huella de carbono no se expresa en términos de área, se mide simplemente en unidades de masa (kg, t, etc.) y no se produce conversión a una unidad de área (ha, m², km², etc.). Cualquier conversión en un área de la Tierra tendría que estar basada en una variedad de suposiciones que aumentarían las incertidumbres y errores asociados con una estimación específica de Huella de Carbono. Cuando sólo se incluye CO₂, la unidad es kg de CO₂; Si se incluyen otros GEI, la unidad es kg CO₂-e, expresando la masa de equivalentes de CO₂. Éstos se calculan multiplicando la masa real de un gas por el factor de calentamiento global para este gas en particular, haciendo que los efectos del calentamiento global de diferentes GEI sean comparables y aditivos (Galli et al. 2012).

La mayoría de las organizaciones y casi todos los intentos personales de huella de carbono han sido observados para dirigirse hacia la reducción de las emisiones o la compensación de las huellas mediante la compra de créditos de carbono u otras medidas de control. Además de las cuestiones de política, la huella de carbono tiene una enorme importancia para los negocios (Kleiner 2007). Sin embargo casi todos los estudios de huella de carbono se centran en las emisiones; la cantidad de eliminación de GEI y el secuestro de carbono parecen descuidados (Peters 2010). También se observa que la literatura científica sobre el tema es escasa y la mayoría de los estudios han sido realizados por organizaciones privadas y empresas principalmente debido a su sentido de negocio más que a su responsabilidad medioambiental (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011).

En términos de huella de carbono el Estándar Corporativo del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (WBCSD and WRI 2005) clasifica las fuentes de emisión en tres alcances: Alcance 1 son las emisiones directas que provienen de fuentes que son propiedad o están bajo el control de la organización. Alcance 2 representa las emisiones indirectas de la generación como electricidad, calor o vapor consumido por la organización: El alcance 3 son todas las demás emisiones indirectas que son consecuencia de las actividades de la empresa, pero que ocurren a partir de fuentes que no son propiedad o están bajo el control de la organización. Por ejemplo las emisiones directas son aquellas que se hacen durante el progreso de un proceso, por ejemplo la combustión de una caldera que utiliza gasolina es una emisión directa. Sin embargo si la caldera fuera eléctrica, la emisión sería indirecta,

pero al mismo tiempo en el sitio donde se produce la energía eléctrica sería directa (Wiedmann and Minx 2007; Matthews, Hendrickson, and Weber 2008).

Además de su importancia comercial, la huella de carbono se ha utilizado como un indicador del impacto del estilo de vida de un ciudadano de un país en las emisiones de carbono (Pandey, Agrawal, and Pandey 2011).

2.5. El secuestro de carbono en el arbolado

La utilización de combustibles fósiles es la causante de la mayor parte de las emisiones de CO₂ en el mundo y de alrededor del 20% de las emisiones de metano y óxido nitroso. El aumento en la agricultura, la deforestación, los tiraderos a cielo abierto, la producción industrial y minería, contribuyen también de manera significativa con la emisión de GEI (Yañez 2004). En el pasado, la agricultura fue la principal causa del incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, en la actualidad los mayores contribuyentes son la combustión de hidrocarburos por parte de la industria y el transporte (Robert 2002).

El CO₂ es el GEI más importante, y el equilibrio de la temperatura global depende de él. No se pueden simplemente reducir las emisiones dado que esto depende de múltiples factores naturales, socioeconómicos, tecnológicos y políticos (Yañez 2004). A su vez, se tienen que hacer esfuerzos por capturar el carbono y reparar el daño causado al ambiente (Yañez 2004). Por tanto debemos desarrollar nuevas estrategias y políticas apropiadas para el manejo de la agricultura y los bosques. Una opción se basa en la captura de carbono en los suelos o en las biomásas terrestres, (Robert 2002) como en los árboles y otra vegetación.

Los bosques cubren una superficie de 41.70×10^6 km², equivalente al 27 % de la superficie terrestre, con proporciones de 25% para bosques templados, 33% para bosques boreales y 42% para bosques tropicales, y contienen el 77% de la biomasa viva. Juegan un papel importante en el balance de carbono, contribuyendo a reducir el contenido en la atmósfera del CO₂ procedente de las emisiones antropogénicas (Pardos 2010). En ellos está secuestrado el 60% del carbono de la vegetación terrestre. El carbono que está almacenado en los bosques representa el 36% del total del carbono superficial, esto quiere decir a un metro de profundidad (Robert 2002).

En la biosfera es necesario distinguir entre el carbono almacenado en el ecosistema expresado en toneladas/hectárea y el flujo de carbono, que es la corriente de carbono entre el ecosistema y la atmósfera (Pardos 2010). Así mismo el 80% del carbono en las plantas se

encuentra en los árboles (Jandl 1998). Los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra (Robert 2002).

El flujo entre el carbono orgánico del suelo y la atmósfera puede ser positivos cuando se hace una captura de CO₂, o negativos, cuando se libera CO₂ (Robert 2002). Cuando se libera, los bosques son fuentes de carbono, por ejemplo al sufrir perturbaciones, como la muerte y la corta de árboles, daños por agentes bióticos o abióticos, tales como plagas y enfermedades, incendios y tormentas (Pregitzer and Euskirchen 2004).

La expresión “sumidero de carbono” se refiere a la existencia de un flujo neto de carbono desde la atmósfera al sistema, mientras que la expresión “fuente de carbono” significa un flujo en sentido inverso, desde el sistema a la atmósfera. Su diferencia algebraica se refleja en el balance de carbono (Pardos 2010).

Ahí donde la deforestación no puede ser detenida, es necesario un manejo correcto del arbolado y el bosque para minimizar las pérdidas de carbono. La reforestación, sobre todo en los suelos degradados con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de secuestro de carbono a largo plazo, tanto en la biomasa como en el suelo (Robert 2002).

Las empresas u organizaciones emisoras de CO₂ pueden “compensar” el efecto negativo de las emisiones de sus actividades económicas mediante la inversión o compra de “créditos” en proyectos cuyo resultado sea la captura del carbono que se halla en la atmósfera (Yañez 2004) o al mismo tiempo pueden aplicar programas de reforestación para el secuestro de carbono en biomasa arbórea.

La toma de acción para la captura de carbono bajo el Protocolo de Kyoto u otro tratado post-Kyoto no solo estimulará cambios importantes en el manejo del suelo sino que también, por medio de un incremento en el contenido de materia orgánica tendrá efectos significativos directos en sus propiedades y un impacto positivo sobre las cualidades ambientales o agrícolas y sobre la biodiversidad, y con todo esto una captura de CO₂, mucho mayor a lo largo de los años (Robert 2002).

Es importante mencionar que hay diferencias entre la captación y el almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) y el secuestro de carbono, el primero

constituye un proceso consistente en la separación del CO₂ emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a el lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo, mientras que el segundo es la fijación de carbono de manera biológicas en las plantas, sumideros naturales de los ecosistemas (Bert M., Ogunlade D., Coninck H., Loos M. 2005).

2.6. Las energías renovables como opción para la mitigación de GEI y la energía fotovoltaica

Desde que la humanidad tuvo acceso a fuentes altamente condensadas de energía (como el petróleo y el carbón) su expansión y complejidad fue como nunca antes. La escala global de tal fenómeno incluyó lo espacial, lo poblacional y desde luego, lo energético (Delgado 2011). Históricamente, el desarrollo económico ha estado estrechamente correlacionado con un mayor consumo de energía y un aumento de las emisiones de GEI (IPCC 2011). En la actualidad la energía es un elemento vital de la vida moderna. Sin embargo es esencial que se opte por adoptar esquemas energéticos más sustentables para contribuir a un mejor bienestar para un mayor número de personas, y al mismo tiempo, se conserven las condiciones necesarias para preservar la vida (Ramírez 2012).

La sociedad requiere de energía para cubrir las necesidades humanas básicas, como lo son el alumbrado, la cocina, la movilidad o la comunicación, y así mismo, necesitan la energía para los procesos productivos (IPCC 2011). Esta energía requerida por la humanidad proviene de los recursos naturales. Es imposible separar el crecimiento económico de los ecosistemas, así como el hecho de que muchas formas de desarrollo deterioran los recursos naturales de los cuales dependen y al mismo tiempo, este deterioro puede afectar el desarrollo económico (Ramírez 2012).

Aproximadamente 6,6 mil millones de toneladas métricas de GEI se arrojan a la atmósfera para poder abastecer la demanda de energía (Al Wazny 2013) que requiere la humanidad en la actualidad. La mayoría de la electricidad se emplea en usos industriales (54%) y en menor cantidad en usos doméstico o comerciales (46%) (Delgado 2011). Sin ningún cambio en nuestra práctica actual en el uso de la energía, la demanda mundial en 2020 será de 50 a 80% más alta que los niveles de 1990 (Al Wazny 2013).

La demanda en constante aumento, de energía, podría generar una tensión significativa en la infraestructura energética actual y dañar potencialmente la salud ambiental mundial por las emisiones de CO, CO₂, SO₂, gases efluentes de NO_x y el calentamiento global (Al Wazny 2013).

Evitar la interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático es el objetivo final de las negociaciones internacionales sobre el clima (Rogelj et al. 2015). La reducción de las emisiones de GEI con el objetivo de mitigar el cambio climático es una de las fuerzas impulsoras clave detrás de una creciente demanda de tecnologías de las energías renovables (Al Wazny 2013).

El racional uso de la energía es una forma importante de convertir el mundo actual de los combustibles fósiles en un mundo de combustibles limpios y seguros (Al Wazny 2013). Es así que la utilización de la energía renovable ha aumentado rápidamente en los últimos años. Diversos tipos de políticas gubernamentales, el abaratamiento de numerosas tecnologías de la energía renovable, las variaciones en el precio de los combustibles de origen fósil, el aumento de la demanda de energía y otros factores han fomentado y popularizado la utilización creciente de las energías renovables (IPCC 2011).

De los aproximadamente 300 GW de capacidad nueva de producción de electricidad creada en todo el mundo entre 2008 y 2009, 140 GW correspondían a energías renovables (IPCC 2011).

A nivel mundial, se estima que, en 2008, las energías renovables representaron un 12.9% de los 492 EJ totales del suministro de energía primaria. La energía renovable más utilizada fue la biomasa (10.2%), con un 60% en el uso de biomasa tradicional para cocinar y para la calefacción en los países en desarrollo. La energía hidroeléctrica representó un 2.3%, mientras que otras fuentes de energía renovables representaron un 0.4% (IPCC 2011).

El costo promedio de la energía renovable es actualmente superior a los precios de la energía tradicional, aunque en algunas situaciones la energía renovable es ya económicamente competitiva (IPCC 2011). En la mayoría de los casos, el costo de las tecnologías de la energía renovable ha disminuido, y los adelantos técnicos esperados podrían permitir reducir aún más el costo (IPCC 2011).

Las tecnologías de la energía renovable y, en particular, las opciones que no se basan en la combustión, pueden reportar beneficios desde el punto de vista de la

disminución de la contaminación atmosférica y de los consecuentes problemas de salud (IPCC 2011).

La energía solar ayuda a reducir la pobreza; el camino de la energía fotovoltaica es la única vía democrática y solidaria hacia el futuro (Turrini 1997). Las tecnologías de la energía solar utilizan la energía irradiada por el sol para producir electricidad mediante procesos fotovoltaicos o mediante la energía por concentración solar, generando energía térmica, con fines de calefacción o refrigeración, para usos de iluminación directa y, posiblemente, para producir combustibles para el transporte o de otra índole (IPCC 2011).

La demanda futura de energía es un determinante importante de las futuras emisiones de CO₂. Las políticas dedicadas a la eficiencia energética podrían dar como resultado una aceleración de las reducciones de la intensidad energética, en relación con las tasas observadas históricamente, incluso en ausencia de políticas climáticas (Rogelj et al. 2015).

La seguridad energética, el crecimiento económico y la defensa del medio ambiente son los impulsores de la política internacional. A medida que la población mundial crece la necesidad de energía es cada vez más importante. El estilo de vida y la demanda de energía crecen juntos y la economía industrializada próspera, el 25% de la población mundial, consume aproximadamente el 75% del suministro de energía del mundo (Al Wazny 2013).

México depende en gran parte de la energía del petróleo, este sector contribuye con el 3% del PIB, así mismo, PEMEX (Petróleos Mexicanos), contribuye con el 37% del presupuesto federal (Eugenia, Viniegra, and Zurita 2009), por tanto no solo dependemos del petróleo para la generación de energía, sino también, de manera económica.

El país cuenta con una de las más amplias coberturas de electricidad en Latinoamérica, con un 97.3% del territorio para 2008 (Eugenia, Viniegra, and Zurita 2009), con una capacidad instalada de 55,564 MW y con una generación de 254.35 TWh para el año de 2016 (Comision Federal de Electricidad 2016), sin embargo la producción de esta energía eléctrica no es sustentable, el 72.4% se genera a partir de fuentes de combustible fósil, el 24.7% de recursos renovables, como la energía hidroeléctrica, geotérmica,

eoeléctrica y fotovoltaica y 2.9% de origen nuclear (Comision Federal de Electricidad 2016).

2.7. Programa de carbono neutral

Después de la Conferencia de las Naciones Unidas en 1972 en Estocolmo, la idea de desarrollo sostenible como un objetivo internacional tomó forma (Newbery 2016). En un principio con ideas básicas de lo que es el clima y su modelación, pero con el tiempo tomando forma y objetivo. Sentando como base que se debe poner fin a la descarga de sustancias tóxicas o de otras materias, en cantidades o concentraciones tales que el medio ambiente no puede neutralizarlas, para que no se causen daños graves o irreparables a los ecosistemas (ONU 1972). Siendo el CO₂ una de estas materias, con los años se ha buscado una descarbonización del sistema, tomando como principio la transición a un sistema eléctrico bajo en carbono, como un componente clave de cualquier transición para la economía verde (Newbery 2016).

La descarbonización del sistema solo se puede lograr sabiendo cuanto carbono está siendo emitido, con la Huella de Carbono, después vienen acciones para reducir las emisiones, a continuación compensar las emisiones restantes (Granados 2013). De esta manera se logra un Carbono Neutral: medición de las emisiones (e), el resultado del cálculo neto de las emisiones menos las reducciones y/o remociones internas (r), menos la compensación (c) es igual a cero (Hidalgo 2013).

La industria de suministro de electricidad es un buen inicio para comenzar a descarbonizar el sistema, ya que puede hacerse a un menor costo y con menos cambios de comportamiento y estructurales que en otros sectores. Descarbonizar la electricidad tiene la considerable ventaja de que puede realizarse sin cambiar el producto final, la electricidad ni las inversiones masivas en la infraestructura de entrega, como lo son transmisión, distribución, medición y sistemas operación (Newbery 2016).

Si el carbono neutral en el sistema eléctrico se entiende como que la matriz eléctrica no sea fósil, esto significa un esfuerzo muy grande y un costo económico significativo (Granados 2013). En estos términos, si la biomasa se cultiva de manera sostenible, la energía producida puede considerarse carbono neutral (Benson and Orr 2008), por tanto el biocombustibles como un medio para reducir los impactos del CO₂ representa una posibilidad futura (Fuglestvedt et al. 2010).

Pero las fuentes de energía renovable, no siempre son carbono neutral o quedan libres de huella de carbono, solo la energía solar directa podría manifestarse así (Premalatha et al. 2014), por tanto no solo, hay que buscar la instalación de energías renovables, sino que al mismo tiempo hay que buscar mitigación o compensación del carbono que estas generan o que no puede ser cubierto.

El Plan de gestión para la Neutralidad de Carbono , es un instrumento para alcanzar los objetivos y metas del carbono neutral (Hidalgo 2013). El plan debe incluir las emisiones actuales y la proyección futura, las reducciones, la mitigación o el secuestro de carbono y los cálculos de la neutralidad que deben ser igual a cero.

La neutralidad de carbono está en una etapa incipiente, sin embargo países como Costa Rica o Canadá, están haciendo fuertes apuestas para la acción y aplicación de estos planes. Donde una vez compensadas las emisiones generadas se pueda emitir un certificado de actividad carbono neutral (Hidalgo 2013). Mismo que puede servir como publicidad para las industrias o para cumplir los objetivos climáticos de todo el país.

2.8. La importancia de las universidades frente al cambio climático

En todo el mundo, distintas universidades han sido líderes en la promoción de la sostenibilidad, incluida la evaluación de las emisiones de GEI, por medio del indicador llamado Huella de Carbono. La estimación de las emisiones y con otros problemas prepara a los estudiantes para los desafíos relacionados con el cambio climático. Los GEI se ha convertido en la piedra angular de los esfuerzos de sostenibilidad de las universidades en Estados Unidos y Canadá, así como en muchos otros países (Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014).

En este sentido el análisis de los GEI de todas las universidades también encaja dentro de una tendencia más amplia de diseño, operación y, en algunos casos, regulación de organizaciones y comunidades bajas en carbono, donde a diferencia de la mayoría de los estudios de huella de carbono existentes, que dividen simplemente las emisiones brutas, en la huella de carbono de las universidades es importante adjudicar la responsabilidad de las emisiones (Weidema et al. 2008).

Por otro lado a nivel mundial, diferentes universidades se han organizado para establecer programas conjuntos en cuanto a temas ambientales y de reducción de emisiones. Un ejemplo de esto es el Compromiso Climático de los Presidentes de los Colegios y Universidades de los Estados Unidos, los cuales han publicado cerca de 900 inventarios de GEI desde 2006 (Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014). Así mismo existe también, desde 1993, la Carta Universitaria para el Desarrollo Sostenible, donde más de 200 universidades europeas de la Conferencia de Rectores Europeos (CRE) firmaron el acuerdo en Barcelona (UNECE 1994); por su parte en China existe la Red Universitaria Verde de China (CGUN) establecida en 2011 para reforzar la cooperación entre diferentes campus, promover la innovación y popularizar las ideas de ahorro de energía (Saadatian, Sopian, and Salleh 2013).

Uno de los principales beneficios, que genera a las universidades el estimar la huella de carbono integral basada en el consumo es que brinda una base analítica más detallada para los planes de administración de carbono de las universidades para incluir acciones en

los puntos críticos de carbono en toda la gama de fuentes de emisiones (Ozawa-Meida et al. 2013), así como una línea de base para medir el impacto de las políticas futuras y las medidas técnicas para reducir el consumo y sus emisiones de GEI asociadas (Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014).

Ejemplos específicos de universidades que buscan el recuento y reducción de sus emisiones de GEI son: en la Universidad de Castilla-La Mancha (Gómez, Cadarso, and Monsalve 2016), la Escuela de Ingeniería Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid (Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014), en la Universidad de Yale en los Estados Unidos (Thurston and Eckelman 2011), la Universidad de Malasia, en Asia (Saadatian, Sopian, and Salleh 2013), De Montfort University (DMU), en Leicester, Inglaterra (Ozawa-Meida et al. 2013), la Universidad Nacional Autónoma de México (Escobedo et al. 2014) y la Universidad de Tongji en China (Li, Tan, and Rackes 2015).

2.9. Panorama político y legislativo frente a cambio climático a nivel internacional, nacional y estatal

A nivel internacional las políticas ambientales y climáticas son manejadas por la Organización de las Naciones Unidas y sus distintos programas, uno de estos programas es el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), donde se encuentran los objetivos del desarrollo sostenible, como lo son el objetivo de energía asequible y sostenible, el cual busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos (FAO 2015), así como el objetivo de ciudades y comunidades sostenibles, que busca conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, y el objetivo de acción por el clima, que busca adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

También el IPCC con el grupo de expertos en cambio climático y los tomadores de decisiones en la COP, son generadores información y acuerdos relacionados con el cambio climático, mismos que normal la ciencia y la política para tratar el tema (IPCC 2014b).

En México el marco legal dicta la Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética, cuyo objeto es regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética. Sin embargo también existen otras leyes y reglamentos que atañen al tema, como lo son: la Ley General Para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General de Cambio Climático.

La Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética, es el mecanismo mediante el cual el Estado Mexicano impulsará las políticas, programas, acciones y proyectos encaminados a conseguir una mayor utilización y aprovechamiento de las fuentes de energía renovables y tecnologías limpias; además de promover la eficiencia y sustentabilidad energética; así como la reducción de la

dependencia de México de los hidrocarburos como fuente primaria de energía y al mismo tiempo reducirá las emisiones de los GEI.

En Jalisco no se ha generado una Ley de Energías Renovables, específica, sin embargo existe la Ley de Acción ante el Cambio Climático, que obliga a los municipios y dependencias estatales a desarrollar y usar energía eléctrica proveniente de tecnologías bajas en carbono, asimismo promueve la generación de energías renovables incentivando a los productores y los consumidores de estas energías. El organismo encargado de aplicar y reglamentar esta ley es la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Estado de Jalisco (SEMADET).

En la Universidad de Guadalajara se ha creado el Programa Universitario Integral de Transición Energética (PUITE), el cual pretende migrar hacia las tecnologías de energía renovables, para el consumo eléctrico de la universidad, como una medida de mitigación frente al cambio climático. Este programa implementa proyectos, especialistas técnicos y financiamiento para que los objetivos de transición energética se logren.

3. HIPÓTESIS

El uso potencial de energía fotovoltaica y el secuestro de CO₂ en biomasa arbórea son suficientes para alcanzar la neutralización de la Huella de Carbono por el consumo de energía eléctrica en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

4. JUSTIFICACIÓN

México dispone de un gran potencial de generación eléctrica con recursos renovables como lo son el viento, el sol, la geotermia, la biomasa y el flujo hídrico, por lo cual es necesario fomentar acciones para lograr la sustentabilidad energética y la innovación tecnológica. Sin embargo, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), reporta que en 2016 la generación eléctrica fue de 72.4% para energías con fuentes de combustible fósil, 24.7% para energías con fuente de recursos naturales renovables y 2.9% de energía de origen nuclear.

En Jalisco, se genera menos del 5% de la energía que se consume en todo el Estado, el resto proviene del Sistema Eléctrico Nacional. La única planta hidroeléctrica estatal que funciona es la Santa Rosa, ubicada en el municipio de Amatitán; sin embargo.

Según los Objetivos del Desarrollo Sostenible ODS, del Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente, en México, para el 2030 debemos aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable. Así mismo los acuerdos de París, dictan que el planeta no debe superar en 2°C la temperatura preindustrial (1750), por tanto todos los países tienen que hacer acciones para lograr el enfriamiento planetario.

En México se han realizado pocos estudios de Huella de Carbono en los Sistemas de Públicos de Educación Superior, por lo que es necesario que se generen datos respecto al Cambio Climático y programas para la reducción de CO₂, mismos que van acorde con la Directriz Estratégica de Universidad Sustentable y Socialmente Responsable del Plan de Desarrollo Institucional 2014-2030, de la Universidad de Guadalajara.

Con base en lo anterior y con el propósito de llegar a la meta de un Centro Universitario sustentable es necesario determinar la Huella de Carbono, para generar un mapa de la cantidad de contaminantes que está emitiendo el CUCBA por el uso de la energía eléctrica, con lo anterior se pueda trazar una propuesta de Carbono Neutral, por medio del uso de los recursos naturales, como pueden ser la generación de energía fotovoltaica y el secuestro de carbono en biomasa arbórea.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar el uso potencial de energía fotovoltaica y el secuestro de CO₂ en biomasa para la neutralización de la Huella de Carbono por el consumo de energía eléctrica en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, de la Universidad de Guadalajara.

5.2. Objetivos específicos

1. Calcular la huella de carbono en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias por el uso de energía eléctrica.
2. Determinar el secuestro actual de CO₂ en la masa arbórea del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.
3. Determinar el sistema fotovoltaico en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.
4. Proponer un plan de Neutralidad de Carbono por uso de energía eléctrica para el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

6. MATERIALES Y METODOS

6.1. Área de estudio

El Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) es un campus temático parte de la Universidad de Guadalajara y está ubicado en el municipio de Zapopan, en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), en Jalisco, México.

Se encuentra a una altura de 1662 msnm, con las coordenadas geográficas 20°44'40.13" N y 103°30'47.49" O. Al Sur del CUCBA se puede encontrar el Área Natural Protegida Bosque la Primavera, al noroeste se encuentra la comunidad de Nextipac y al este la Ciudad de Guadalajara.

Los datos indican que la población para el año 2017 es de 5,696, estudiantes, 575 profesores y 282 empleados administrativos (Universidad de Guadalajara 2017), que dan un total de 6,553 habitantes.

El CUCBA cuenta con una superficie construida a 2016 de 52,955.07 m² y con una superficie total de áreas verdes dentro de la superficie construida de 31,781.75 m² (Universidad de Guadalajara 2017).

Cuadro 1. Población del año 2012 a 2017 en CUCBA.

Año	Alumnos	Académicos	Administrativos	Total
2012	4,114	529	324	4,967
2013	4,246	547	320	5,113
2014	4,546	559	301	5,406
2015	5,075	575	305	5,955
2016	5,404	575	282	6,261
2017	5,696	575	282	6,553

6.2. Fase 1: Huella de Carbono

El manual del GhG Protocol (Protocolo de Gases de Efecto Invernadero), localiza a la energía eléctrica en el alcance 2 y es tomada como una fuente indirecta de emisiones de CO₂. El alcance 2 representa las emisiones de GEI de la generación de electricidad comprada, consumida por la organización (World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and World Resources Institute (WRI) 2004).

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) es la empresa que genera la electricidad para los Estados Unidos Mexicanos. Misma empresa que para el año de 2016 generó 254.35 TWh, con una capacidad instalada de 55,564 MW (Comisión Federal de Electricidad 2016). De los cuales la capacidad efectiva instalada es de 72.5% para la generación por consumo de combustible fósil, 21.8% por generación hidroeléctrica, 1.6% por energía geotérmica, 1.3% por energía eólica y fotovoltaica y 2.9% por generación nuclear.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) fue la encargada de reportar el Factor de Emisión para los usuarios de electricidad de la CFE hasta mayo del (SEMARNAT 2017), sin embargo con la nueva Ley de Transición Energética (LTE), ahora dependen de la Comisión Reguladora de Energía (CRE).

Cuadro 2. Factores de Emisión por Consumo de Energía Eléctrica CFE, en toneladas de CO₂/MWh.

Año	Factor de emisión	Referencia
2013	.499	(Programa GEI México 2014)
2014	.454	(SEMARNAT 2015)
2015	.458	(SEMARNAT 2016)
2016	.458	(SEMARNAT 2017)
2017	.582	(Comisión Reguladora de Energía 2018)

La huella de carbono por consumo de energía eléctrica para México, si se esta conectado al sistema eléctrico de la CFE, se calcula con la siguiente fórmula:

Huella de carbono = Consumo eléctrico X Factor Emisión

-Huella de Carbono unidad utilizada para exponer los resultados (t CO₂) representa la tonelada equivalente de CO₂, unidad universal de medida que indica el potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno de los GEI (SEMARNAT, 2015).

- Consumo eléctrico en MWh, dato proveniente de los recibos de luz.

- Factor de emisión, cantidad de CO₂ emitido por cada MWh de energía eléctrica generado por la CFE, calculado por la SEMARNAT o la CRE, según sea el caso.

Se realizó también la medición Per cápita de la huella de carbono, por cada uno de los habitantes del centro, obteniendo los datos poblacionales de la estadística institucional de cada año (Universidad de Guadalajara 2017).

Una vez medida la huella de carbono por uso de energía eléctrica del CUCBA, desde el 2013 hasta el 2017, se procedió a hacer una proyección del consumo de energía eléctrica para los próximos tres años, 2018, 2019 y 2020, utilizando el software de Minitab 17.

Las proyecciones en Minitab 2017 se realizaron con Estadísticas de tiempo, en Suavización por exponencial doble. Con una proyección de los años 2018, 2019 y 2020, para los datos de: consumo de energía, factor de emisión, población del CUCBA y huella de carbono y huella de carbono per cápita; sin embargo para las dos últimas secciones se hizo una comparativa individual entre la proyección y el cálculo. Es decir una vez calculado el consumo de energía, el factor de emisión y la población para los años 2018, 2019 y 2020, se calculó sin proyectar la huella de carbono y la huella de carbono per cápita, misma que se puede comprar con sus homónimos de proyección.

6.3. Fase 2: Secuestro de carbono

El CO₂ puede ser incorporado en los sistemas terrestres, principalmente por la fotosíntesis de las plantas (Var 2013). En la biosfera es necesario distinguir entre el carbono almacenado en el ecosistema, es decir en árboles, vegetación y suelo, y el flujo de carbono, que es la corriente de carbono entre las existencias de carbono en el ecosistema y la atmósfera (Pardos 2010).

Para la medición de carbono contenido biomasa se utilizó el método indirecto, dado que no es invasivo y puede hacerse el cálculo por árbol y especie.

Esta fase se centró en el secuestro de carbono del arbolado del campus, para lo cual es necesario aplicar los modelos alométricos (MA), mismos que son ecuaciones matemáticas que permiten estimar volumen, biomasa o carbono de un individuo, en función la dimensión de algunas de sus partes tales como el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) y/o la altura total, correlacionados con el tamaño total del individuo. (CONAFOR 2014).

En primera instancia se hizo la medición física de una muestra del arbolado del CUCBA. Existen en total de 1461 árboles, de los cuales se hizo un muestreo con un nivel de confianza de 95% y con un margen de error de 5%. Siendo así que se midieron 305 árboles en el campus.

Para la medición de la altura de los árboles se utilizó un hipsómetro vertex laser VL5, de la marca Haglöf. Para las mediciones del DAP se utilizó una cinta larga de fibra de vidrio de la marca Truper, de 30 m de largo graduada en pulgadas-pies y en centímetros-metros. Así mismo, para el registro de datos se utilizó una Samsung Galaxy Tab E, con la aplicación de Excel. Y para el registro fotográfico se utilizó una cámara Canon Rebel XSi con un lente de 18-55 mm.

La medición de los árboles se hizo con tres personas, una de las personas manejó el hipsómetro y la cámara fotográfica, otra de las personas hizo la medición del perímetro del árbol a la altura del pecho y la última de las personas hacía el registro de los datos. El CUCBA se dividió en 12 sectores, Edificio A, Edificio C, Edificios B-C, Biblioteca, Edificios C-D, Canchas, Carretera-Arco, Edificios D-E, Estacionamiento, Jardín botánico,

Edificio Ñ y Pasillo Canchas, como se muestra en la (Figura 1). Se recorrieron los sectores, midiendo árboles al azar. Solo se procesaron datos de árboles con un DAP mayor a 15cm.

Conforme se recorrieron los sectores se identificaron los árboles a género y cuando fue posible a especie, las que no fue posible de identificar o no tenían el nombre científico en una placa, como en el jardín botánico, se identificaron por medio de las fotografías tomadas a cada árbol. Para cada árbol se tomaron tres fotografías, tronco, hojas-flor y foto completa del árbol, haciendo posible la identificación.

Una vez identificadas las especies, se procedió a definir la fórmula alométrica adecuada para cada especie. La CONAFOR en conjunto con el programa de REDD+, trabajaron una base de datos de fórmulas alométricas para el conteo de biomasa y a su vez de carbono secuestrado. De este portal se tomaron las formulas alométricas para cada una de las especies, de las especies que no se encuentren en las bases de datos antes dichas, formulas alométricas específicas, se utilizará una fórmula de su género. Si no se encuentran fórmulas específicas a este género, se utilizará la fórmula general de (Rendón Carmona 2007).



Figura 1. Edificio A - 1, Edificio Ñ - 2, Edificio B y C - 3, Jardín Botánico - 4, Edificio C - 5, Edificio C y D - 6, Edificio D y E - 7, Pasillo Canchas - 8, Biblioteca - 9, Carretera - 10, Estacionamiento - 11, Canchas - 12.

Así mismo, para poder tener un punto comparativo, se hicieron tres mediciones distintas, la primera a las fórmulas de CONAFOR y la formula general, otra a todos los árboles con la fórmula general y la tercera a la fórmula propuesta para UdeG por (Shalisko 2015).

Las fórmulas son las siguientes:

$$\text{General: } B = \exp(-2.977 + \ln(p * \text{DAP}^2 * h))$$

$$\text{UdeG: } B = (2p / .54(.0292922))(((\text{DAP}^2 * h)^{.9392})$$

En donde:

B= Biomasa en kilogramos

p = densidad en g/cm³

DAP = Diámetro a la altura del pecho en centímetros

h= Altura del árbol en metros

Una vez obtenida la biomasa, el cálculo de carbono capturado se aplicó la siguiente fórmula: (IPCC 2008)

$$C = B (.5)$$

C = Carbono almacenado en kilogramos

B = Biomasa en kilogramos

6.4. Fase 3: Sistemas fotovoltaico

Para el cálculo del Sistema fotovoltaico se obtuvo en la primera fase de la investigación a partir de los recibos emitidos por la CFE en cada uno de los medidores.

La fórmula para el cálculo del Sistema fotovoltaico es la siguiente:

$$SF = CED * ISZ$$

Donde:

-SF = Sistema fotovoltaico en watts, es la necesidad de instalación del sistema para producir la energía que se consume a diario.

-CED = Consumo energético diario en kWh, es la cantidad de consumo de energía eléctrica, calculada a partir del consumo anual de energía, dividida entre número de días en el año.

-ISZ = Irradiación Solar en la zona en kWh/m² día, la radiación solar que incide sobre una superficie en un momento y lugar particulares. Para Guadalajara es de 5.57 kWh/m² día (Ulloa et al. 2011).

Una vez calculado el sistema fotovoltaico, se pasa al cálculo de los módulos fotovoltaicos el cual consiste en dividir los watts del sistema fotovoltaico entre los watts que tiene cada módulo; con esto se podrá saber cuántos módulos necesitamos.

$$NMF = SF / WMF$$

Donde:

NMF = Número de Módulos Fotovoltaicos, necesario para cubrir el sistema.

WMF = Watts del Módulo Fotovoltaico

Una vez hecho el cálculo de cuantos módulos se deben instalar para tener el sistema fotovoltaico se puede calcular el área necesaria para la instalación del sistema. Esto se calcula multiplicando el número de módulos fotovoltaicos por el área que abarca cada módulo.

$$ASF = NMF / AMF$$

Donde:

ASF = Área del Sistema Fotovoltaico, área necesaria para cubrir la necesidad de la instalación únicamente de los módulos fotovoltaicos necesarios para cubrir el sistema.

AMF = Área del Módulo Fotovoltaica, Área que ocupa cada módulo fotovoltaico, se calcula a partir del largo y el ancho del panel.

Para la proyección de los años 2018, 2019 y 2020, se utilizó el programa Minitab 17, estas proyecciones se hicieron con Estadísticas de tiempo, en Suavización por exponencial doble, para el consumo de energía eléctrica anual. Una vez calculada la proyección, se podrán hacer los cálculos anteriores para prever que sistema fotovoltaico se debe instalar.

Un Sistema Fotovoltaico SF, al 80% del total del Sistema Fotovoltaico es necesario para mantener el nivel de generación eléctrica en norma, el otro 20% deberá ser mitigado, esto para evitar incidentes de generación eléctrica con la CFE.

6.5. Fase 4: Huella de carbono neutral

La condición de carbono neutro se define como las emisiones netas de GEI asociadas con una entidad, producto o actividad son cero por una duración definida.

Hay estándares y normas para la neutralidad de carbono, que son dictadas por distintas instancias, el Protocolo de Carbón Neutral (The Carbon Neutral Protocol), permite separar las actividades de generación de uso de energía eléctrica y así mismo, permite la certificación por separado de cada una de estas (Natural Capital Partners 2016).

El Protocolo incorpora las mejores prácticas en las áreas de medición y monitoreo de emisiones de GEI y el diseño y certificación de proyectos de reducción de emisiones.

En el caso de este estudio, se eligió el certificado de actividad por uso de energía eléctrica, mismo que puede denominarse “uso de energía neutra de carbono”, en el cual los límites deben incluir las emisiones derivadas del uso de electricidad y gas natural, y todos los combustibles fósiles utilizados para la calefacción de espacios o la generación de electricidad en el sitio (Natural Capital Partners 2016).

Los pasos a seguir para la certificación en carbono neutralidad son los siguientes:

Paso 1: Definir el tema de certificación y delimitar al sujeto que genera las emisiones.

Paso 2: Medir las emisiones previamente definidas, con una cuenta completa y precisa de las emisiones del GEI.

Paso 3: Establecer un objetivo de acuerdo a las emisiones, en tiempo y tipo de tecnologías o sumideros de carbono.

Paso 4: Reducir las emisiones, aplicar el protocolo de emisiones cero.

Paso 5: Comunicar los resultados del proyecto.

Por la naturaleza de esta investigación, solo se llegó hasta el paso número tres.

La fórmula para carbono neutralidad es la siguiente:

$$CN = ER - CCA - CCP = 0$$

Donde:

CN = Carbono Neutral

ER = Emisiones Restantes de la aplicación del Sistema Fotovoltaico, t CO₂ eq

CCA = Captura de CO₂ Anual por el arbolado del CUCBA, t CO₂

CCP = Captura de CO₂ Anual con el Programa para la Carbono Neutralidad, t CO₂

La Captura de Carbono debe de transformarse a CO₂ capturado, ya que el Carbono Capturado que presentan las fórmulas derivadas de la Biomasa solo toma en cuenta el Carbón, dejando de lado los oxígenos. El factor de transformación es de 3.67, para los valores obtenidos en términos equivalentes de CO₂, este dato resulta de la relación entre el peso atómico del C y el peso molecular (Barrionuevo and Pan 2009).

Para conocer el CCP se debe aplicar la siguiente fórmula.

$$\text{CCP} = \text{ER} - \text{CCA}$$

Siendo así el CCP será diferente cada año, dado que el consumo de energía eléctrica puede incrementar o disminuir, y también el Carbono Capturado en CUCBA aumentará si no se cortan árboles.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados están expresados en cuatro fases diferentes, Huella de Carbono, Captura de CO₂, Sistema Fotovoltaico y Carbono neutral.

7.1. Fase 1. Huella de Carbono

Para el cálculo de la huella de carbono, se integró el total de consumo eléctrico en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias en el Campus Las Agujas, estos son siete recibos diferentes con la Comisión Federal de Electricidad, lo cual quiere decir, que el campus cuenta con siete medidores de corriente.

Una vez hecha la suma semestral emitida por la CFE en Kilo Watts hora se transformó a Mega Watts Hora, para así poder aplicar las fórmulas de la Huella de Carbono. El factor de emisión se obtuvo directamente del reporte anual que da la CFE en conjunto con la SEMARNAT, para el conteo de gases de efecto invernadero (SEMARNAT 2017) y también la resultante de la Comisión Reguladora de Energía.

Los números poblacionales del CUCBA se obtuvieron de la estadística anual de la Universidad de Guadalajara, en el Informe Anual del Rector General (Universidad de Guadalajara 2017).

Una vez obtenidos los datos para conocer la huella de carbono, se procedió a seguir lo indicado por la SEMARNAT para el cálculo de las emisiones. Donde el consumo de electricidad se multiplica por el factor de emisión de cada año y tenemos Toneladas de CO₂ equivalente, emitidas a la atmosfera por el uso de la energía eléctrica.

Los resultados de esta fase se presentan en la Cuadro 3, tomando en cuenta el consumo de Mega Watts Hora por semestre, el factor de emisión por año y la huella de carbono por semestre:

Cuadro 3. Huella de carbono por semestre de 2013 a 2017, a partir del consumo Mwh y el Factor de emisión de la CFE.

Semestre	Consumo Mwh	Factor de emisión	Ton CO ₂ eq
2013A	815.006	0.499	406.687994
2013B	821.972	0.499	410.164028
2014A	896.871	0.454	407.179434
2014B	878.514	0.454	398.845356
2015A	900.745	0.458	412.54121
2015B	926.511	0.458	424.342038
2016A	919.153	0.458	420.972074
2016B	871.255	0.458	399.03479
2017A	892.763	0.582	519.588066
2017B	900.249	0.582	523.944918

A: Semestre de Enero a Julio

B: Semestre de Agosto a Enero

Para poder compararlo con otros estudios similares, la huella de carbono se convirtió a tCO₂ Per Cápita, lo que nos permite ver si el uso de energía eléctrica en el campus es mayor o menor a otras universidades en México y el mundo. Los valores de la huella de carbono en kg de CO₂ eq Per Cápita son los siguientes:

Cuadro 4. Huella de carbono per cápita según el número de habitantes por semestre y la huella de carbono del CUCBA

Semestre	Habitantes	Ton CO ₂ eq	Ton CO ₂ eq perC
2013A	3,992	406.687994	0.10187575
2013B	4,296	410.164028	0.095475798
2014A	4,445	407.179434	0.091603922
2014B	4,804	398.845356	0.083023596
2015A	4,672	412.54121	0.088300773
2015B	5,229	424.342038	0.081151662
2016A	5,874	420.972074	0.07166702
2016B	6,358	399.03479	0.062761055
2017A	6,572	519.588066	0.079060874
2017B	7,151	523.944918	0.073268762

A: Semestre de Enero a Julio

B: Semestre de Agosto a Enero

Se puede observar que las emisiones de CO₂ eq per cápita disminuyen con cada semestre del 2013 al 2016, sin embargo en el 2017 con el cambio de instancia que hace la medición del factor de emisión, la HC perC aumenta en comparación con el 2016, es difícil de observar el mismo patrón en las emisiones totales del campus. Esto quiere decir que aún que el consumo de electricidad disminuya lentamente o no disminuya, si el número poblacional del campus va en aumento el CO₂ eq per cápita, disminuirá, por tanto podemos decir que el campus podría ser más eficiente si el número de habitantes aumenta como se muestra en las figuras 2 y 3.

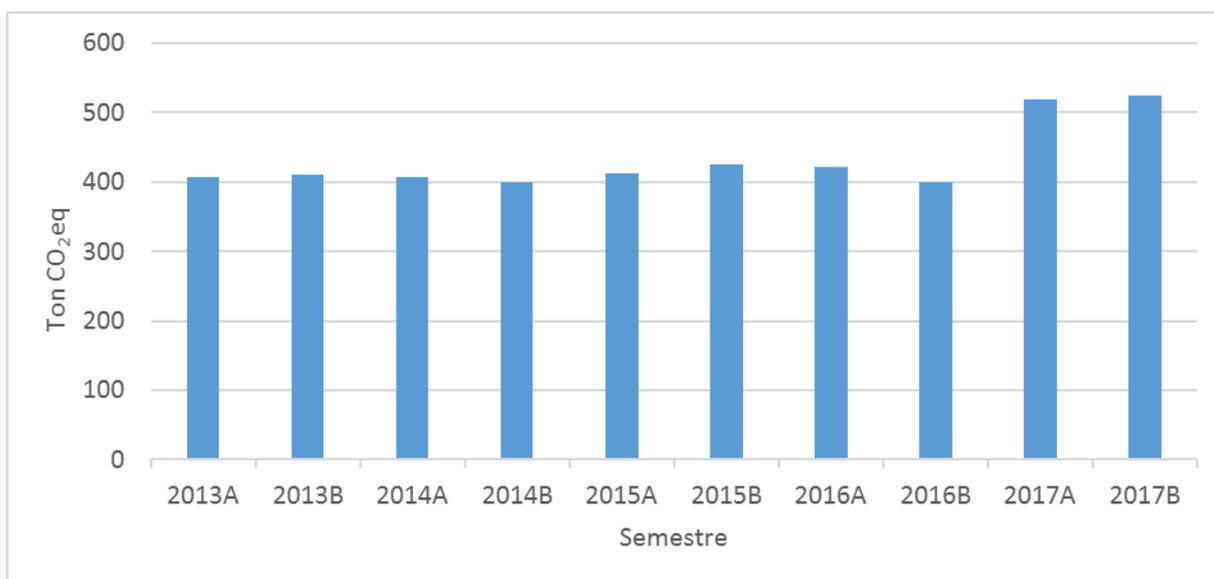


Figura 2. Huella de Carbono en toneladas de CO₂ eq del CUCBA.

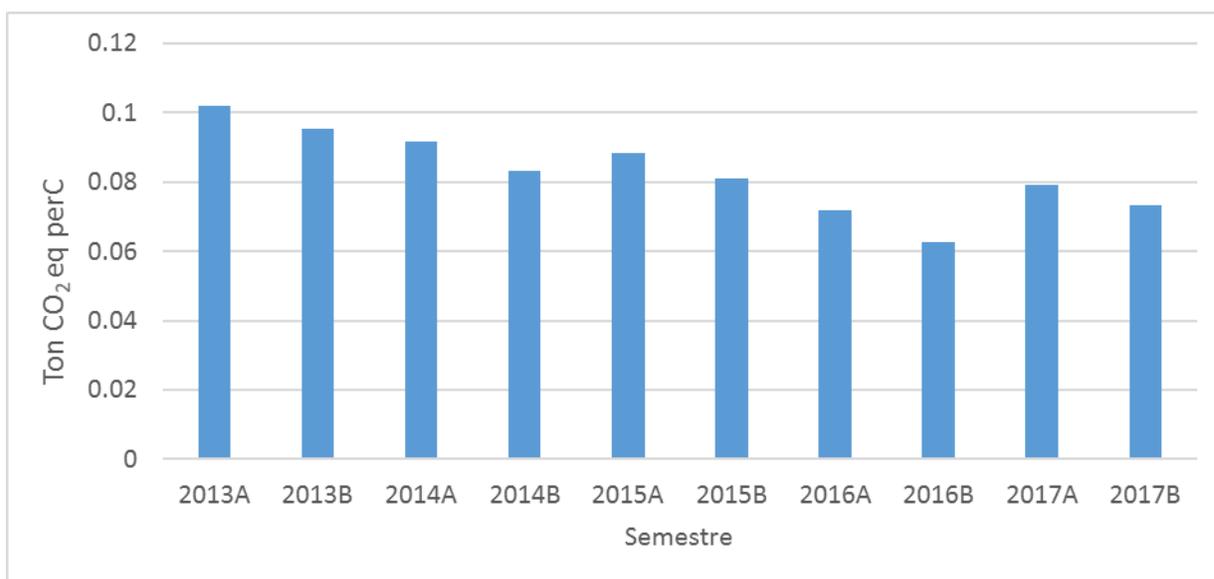


Figura 3. Huella de Carbono en toneladas de CO₂ eq perC del CUCBA.

Es importante aclarar que en 2016 el factor de emisión dictado por la SEMARNAT es el mismo que en el 2015, dado al cambio que se hizo en la instancia que calcularía las emisiones de generación de energía eléctrica. El factor de emisión de 2017 aumenta en comparación con la disminución constante que había tenido en 2013 hasta el 2016 debido a este mismo cambio de instancia calculadora de emisiones, la actual es la Comisión Reguladora de Energía.

A partir de las proyecciones realizadas con Minitab 17, se obtuvieron datos para calcular la huella de carbono para los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Estos cálculos se hicieron de dos maneras, la primera de ellas fue proyectar el consumo en Mwh, los habitantes y el factor de emisión, y con esto calcular la HdeC y la HdeC per cápita, esta se ha denominado calculada, y la segunda se ha denominado proyectado, en el cual se ha hecho la misma proyección por Suavización de exponencial doble por series de tiempo a cada semestre. Es importante mencionar que el factor de emisión también se proyectó de la misma manera, para todos los resultados se utilizó el pronóstico, excepto para factor de emisión, donde fue elegido la proyección inferior, dado que se ajusta mejor a los datos anteriores.

Cuadro 5. Proyección de Huella de Carbono Calculado y Proyectado Para el CUCBA

Semestre	Consumo Mwh	Factor de emisión	Calculado	Proyectado
			Ton CO ₂ eq	Ton CO ₂ eq
2013A	815.006	0.499	406.688	406.688
2013B	821.972	0.499	410.164	410.164
2014A	896.871	0.454	407.179	407.179
2014B	878.514	0.454	398.845	398.845
2015A	900.745	0.458	412.541	412.541
2015B	926.511	0.458	424.342	424.342
2016A	919.153	0.458	420.972	420.972
2016B	871.255	0.458	399.035	399.035
2017A	892.763	0.582	519.588	519.588
2017B	900.249	0.582	523.945	523.945
2018A	895.532	0.552	494.334	563.249
2018B	894.482	0.504	450.819	618.467
2019A	893.431	0.486	434.207	673.686

2019B	892.381	0.466	415.850	728.905
2020A	891.331	0.446	397.534	784.124
2020B	890.28	0.425	378.369	839.342
2021A	889.23	0.405	360.138	894.561
2021B	888.18	0.384	341.061	949.780

En el Cuadro 5 se puede ver claramente que la huella de carbono proyectada es mayor que la huella de carbono calculada para el Centro Universitario. Por tanto para los futuros cálculos se ha elegido la proyección calculada para referencias a Huella de Carbono.

Esta diferencia entre uno y otro es en definitiva dado por el aumento del Factor de emisión en el año 2017, dado que en los años anteriores desde el 2013, este factor de emisión iba en disminución año con año, al ser instaladas tecnologías de generación alternativa de energía. Por tanto, la Huella de Carbono Calculada es la que se tomará para futuros cálculos.

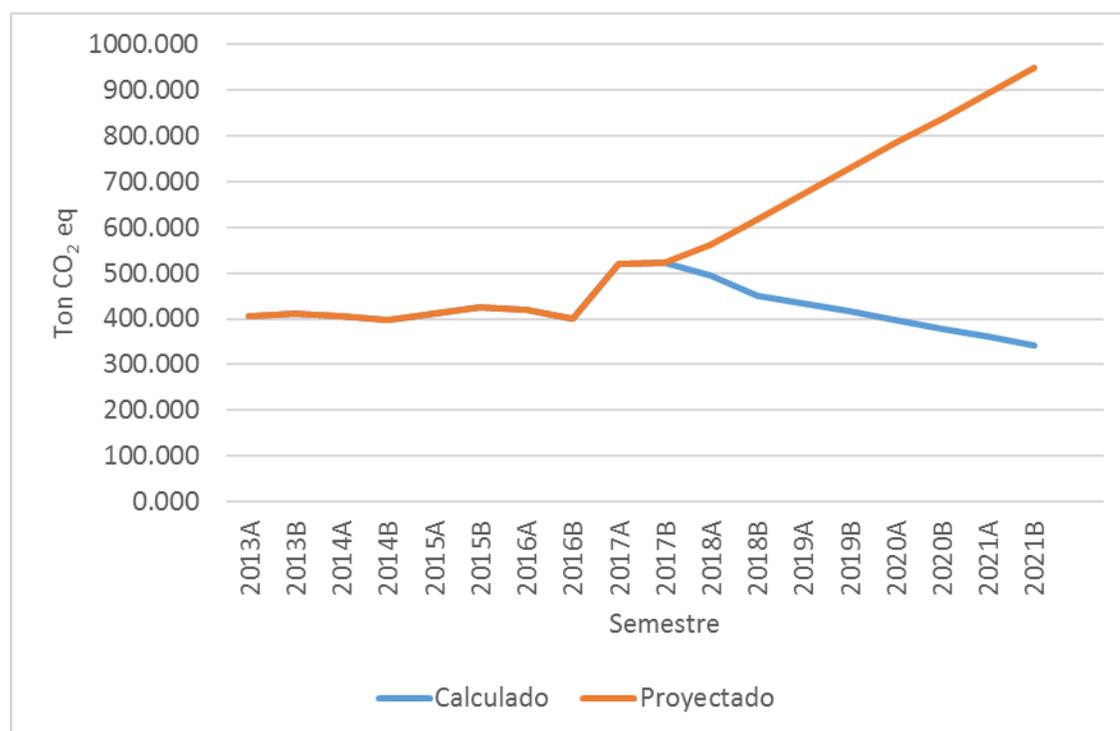


Figura 4. Huella de carbono calculado contra huella de carbono proyectada de 2013 a 2021

Para la proyección de la huella de carbono per cápita se hizo el mismo protocolo, y aún que de la misma manera la HdeC perC proyectada tuvo valores mayores a los de la HdeC perC Calculada, la diferencia fue mucho menor que en la Huella de Carbono de todo el centro universitario como se muestra en la Figura 5.

Esta diferencia es menor dado a la relación que tiene la huella de carbono per cápita con el número de habitantes, por tanto el aumento en los datos originales es menos perceptible y al hacer la proyección con Suavización de exponencial doble, la brecha entre una y otra proyección es menos perceptible.

Cuadro 6. Proyección de Huella de carbono calculada y proyectad, la zona sombreada es la protección.

Semestre	Habitantes	Calculado	Proyectado
		Ton CO ₂ eq perC	Ton CO ₂ eq perC
2013A	3992	0.102	0.102
2013B	4296	0.095	0.095
2014A	4445	0.092	0.092
2014B	4804	0.083	0.083
2015A	4672	0.088	0.088
2015B	5229	0.081	0.081
2016A	5874	0.072	0.072
2016B	6358	0.063	0.063
2017A	6572	0.079	0.079
2017B	7151	0.073	0.073
2018A	7514	0.066	0.067
2018B	7895	0.057	0.065
2019A	8277	0.052	0.064
2019B	8658	0.048	0.062
2020A	9039	0.044	0.060
2020B	9420	0.040	0.058
2021A	9801	0.037	0.057
2021B	10182	0.033	0.055

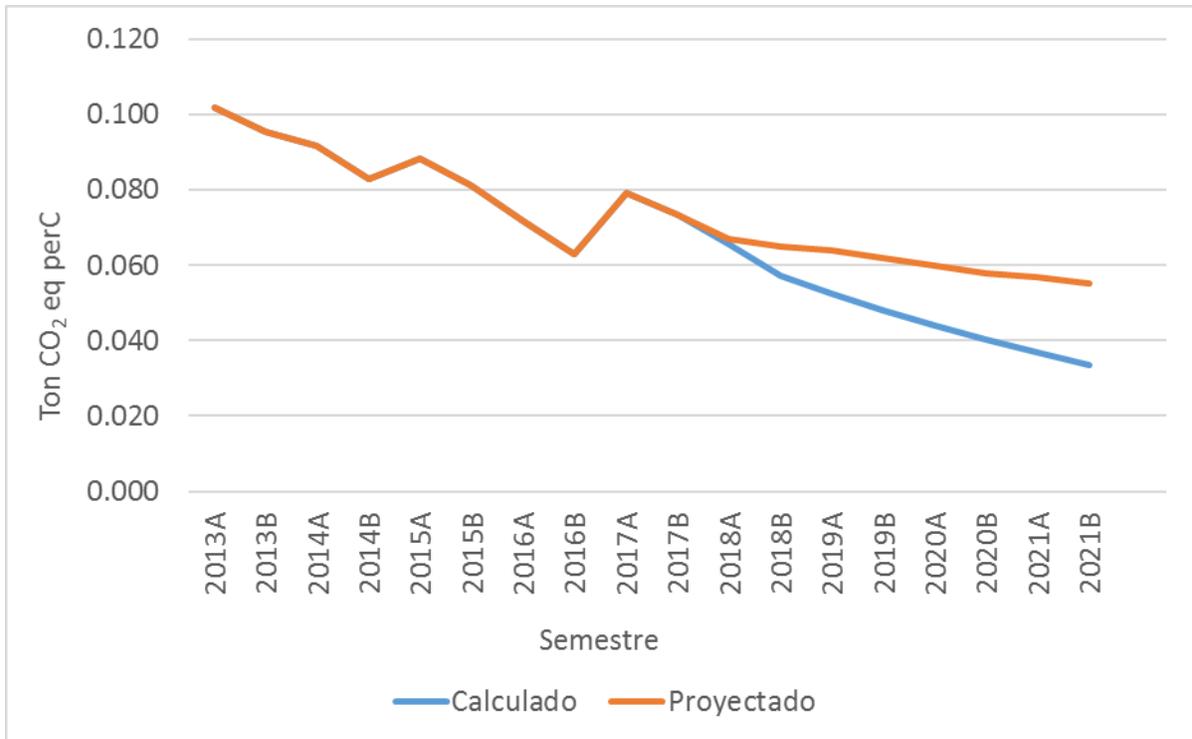


Figura 5. Huella de Carbono perC calculada contra proyectada.

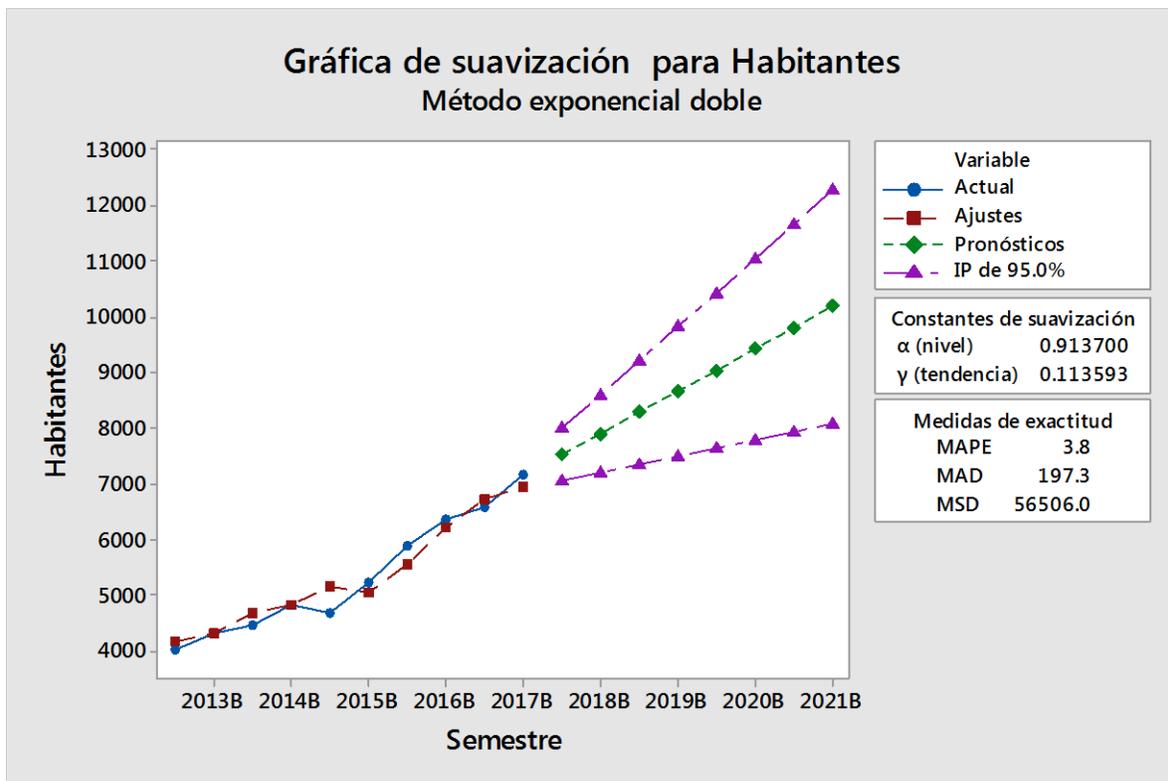


Figura 6. Proyección de habitantes de CUCBA por Suavización de exponencial doble.

En la Figura 6 se observa cómo se proyecta que la población tienda a aumentar en los próximos años, dando como resultado una mayor eficiencia de la energía utilizada por el CUCBA.

La grafica de suavización (Figura 7) para consumo de MWh por el campus, tiene también una tendencia hacia la disminución del uso de energía eléctrica, sin embargo con la construcción de nuevos edificios, esta tendencia se podría ver alterada.

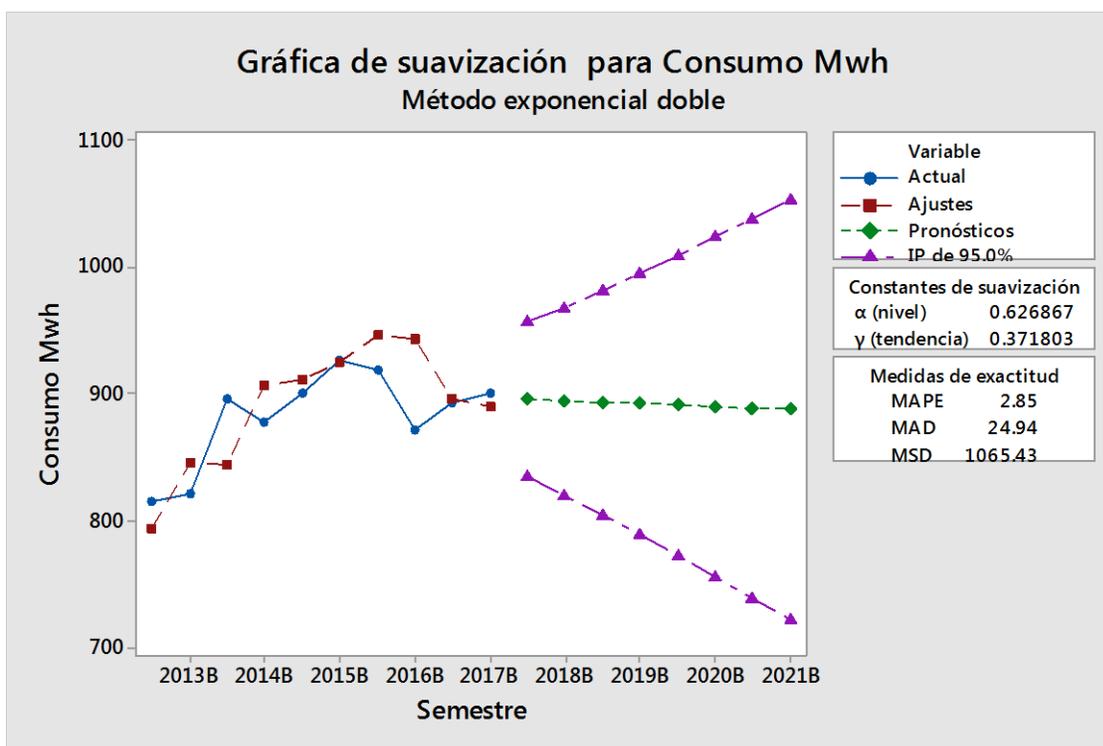


Figura 7. Proyección de Consumo en Mega watt hora de CUCBA por Suavización de exponencial doble.

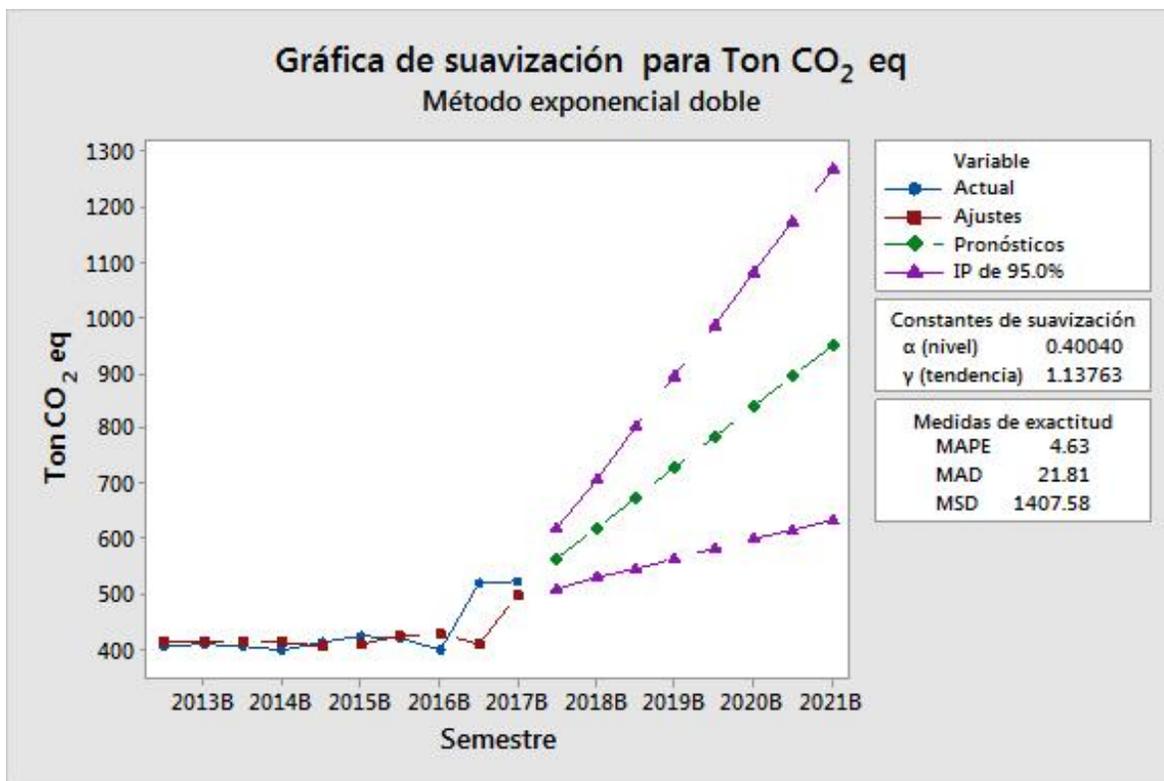


Figura 8. Proyección de toneladas de CO₂ eq por suavización de método exponencial doble.

La Figura 8 de suavización proyectada para las t de CO₂ eq totales, muestra un aumento ya antes mencionado por el factor de emisión 2017, por tanto estos datos no se tomarán en cuenta y se utilizaran solo los datos de toneladas de CO₂ eq totales calculados a partir de las proyecciones del factor de emisión y del consumo de energía, Figura 9.

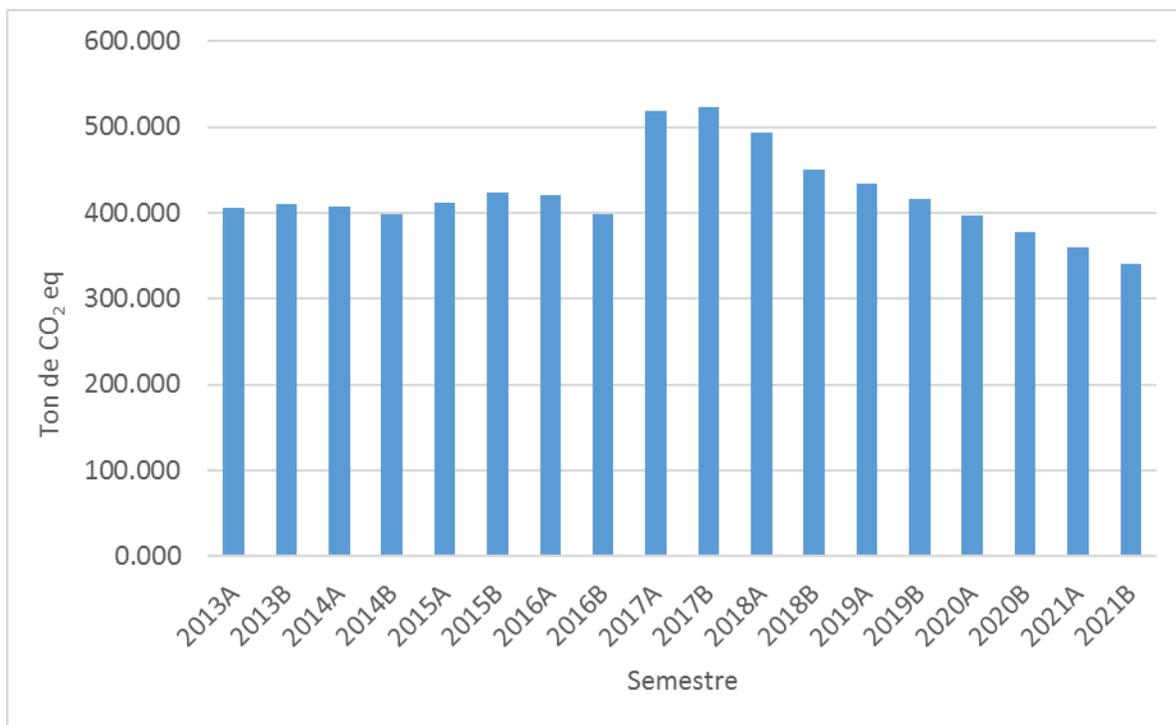


Figura 9. Proyección de la huella de carbono en toneladas de CO₂ eq, calculado.

La Figura 8, es una gráfica calculada de t de CO₂ eq donde se muestra una tendencia al decremento después del pico máximo del 2017 provocado por el factor de emisión, este decremento es esperado por dos razones, la primera es por la disminución en el consumo de energía eléctrica del CUCBA como se puede observar en la Figura 9, y la segunda de ellas por la disminución del factor de emisión que se puede ver en el Cuadro 5, lo cual significa que la HdeC va en disminución y las medidas de disminución de emisiones están dando resultados.

La Figura 10, nos da la pauta para poder hacer comparación con otras universidades en las cuales se ha hecho algún estudio similar, es importante resaltar que la única manera de comparar este estudio con los hechos en otras universidades es sabiendo la Huella de Carbono Per Cápita, es decir, cuanto CO₂ eq produce cada uno de las personas de la universidad por el consumo de energía eléctrica únicamente, hay otros estudios que no manejan la huella de CO₂ sin dividir sus alcances, con estas no se puede aislar el alcance de emisiones indirectas por uso propio.

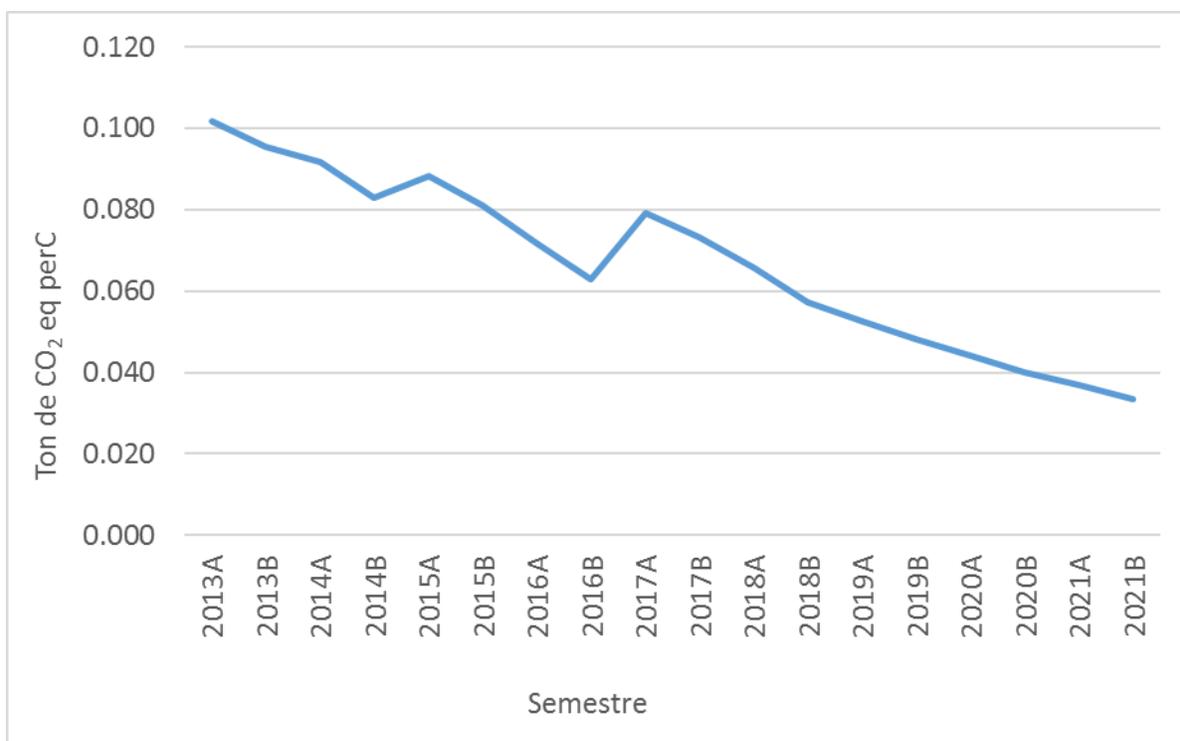


Figura 10. Proyección en Calculado de toneladas de CO₂ eq per cápita del CUCBA.

Cuadro 7. Comparación entre la HC perC por consumo de energía eléctrica de diferentes universidades

Universidad	Año	t CO ₂ eq PerC	Referencia
CUCBA	2021	0.035	Cálculo del presente estudio
CUCBA	2017	0.076	Cálculo del presente estudio
CUCBA	2013	0.098	Cálculo del presente estudio
UNAM	2011	0.307	(Escobedo et al. 2014)
Universidad Técnica de Madrid	2010	0.511	(Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014)
De Montfort University	2009	0.005	(Ozawa-Meida et al. 2013)

En el Cuadro 7, los datos indican que la Universidad Técnica de Madrid (Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014) es la que emite mayor cantidad de CO₂ eq per cápita, y la universidad De Montfort (Ozawa-Meida et al. 2013) es la que tiene una menor tasa de emisiones por consumo de energía eléctrica. A su vez, es claro como en CUCBA disminuye la cantidad de emisiones per cápita por consumo de energía eléctrica, esto es resultado de la

disminución presentada antes de cada una de los factores que determinan la HC per C; Consumo de Mwh, Habitantes y Factor de emisión. Sin embargo, en la actualidad se genera al año 76 kg de CO₂ equivalente tan solo por el consumo de energía eléctrica.

Cabe aclarar que todos los datos que se utilizaron para la comparación con otras universidades se hicieron con la HdeC perC, sobre el consumo de la energía eléctrica para que los estudios fueran comparables y los datos estandarizados. Hay otras universidades que generaron esfuerzos en el cálculo de la HdeC, pero toman en cuenta otros factores o no lo transforman a HdeC perC, lo que hace imposible la comparación.

7.2. Fase 2. Captura de CO₂

La captura de CO₂ es calculada a partir de la captura de carbón, misma que es derivada de la biomasa. Para el cálculo de la biomasa es necesario aplicar las fórmulas alométricas individuales para cada árbol.

Para esta fase de la investigación se compararon tres distintas aplicaciones de fórmulas alométricas, la propuesta por la CONAFOR, la fórmula general y la formula aplicada por un estudio de la universidad.

El total de árboles en el CUCBA es de 1461 (Shalisko 2015), árboles de más de 10cm de DAP, del cual se tomaron los datos de una muestra al 95% de nivel de confianza, con 5% de margen de error, lo que deriva en una muestra de 305 árboles. Estos son los que se procedió a muestrear, sin embargo se eligió como mínimo 15 cm de DAP, siendo el más grueso de los árboles uno con 162 cm de DAP.

Los tres tratamientos de los datos se etiquetaron con los nombres de F. CONAFOR, F. General, F. UdeG. Los datos son presentados en toneladas de CO₂ equivalente, los datos por tratamiento dependen directamente de la biomasa, donde para F. CONAFOR fue de 479.04, para F. General fue de 447.99 y para F. UdeG de 472.46. Esto se puede observar en la Figura 11.

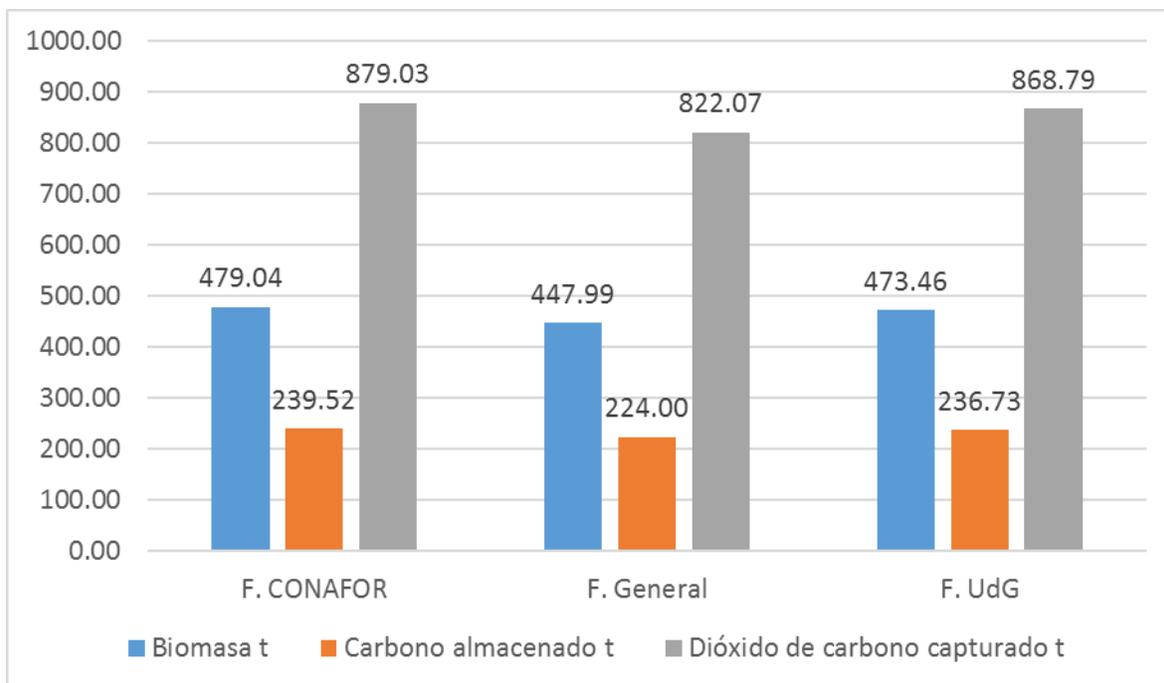


Figura 11. Resultados de la muestra del arbolado en CUCBA

Promediando los datos de cada uno de los tratamientos podemos observar que no se distancian uno del otro, el menor es el F. General con un CO₂ capturado en 2.81 toneladas y el mayor en el tratamiento de F. CONAFOR con 3 toneladas, como podemos observar en la Figura 12.

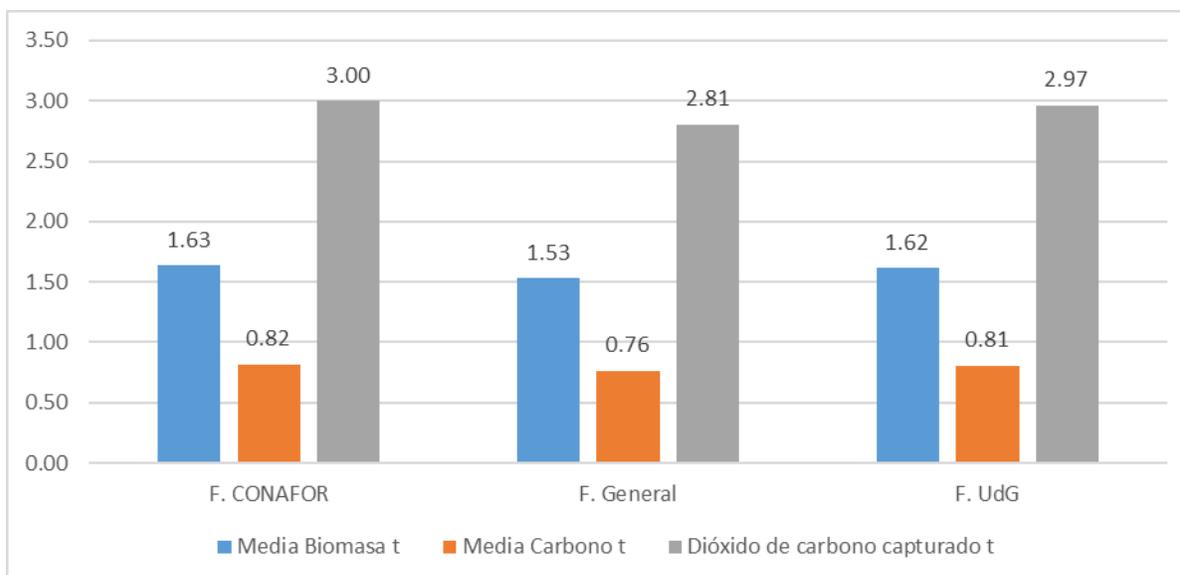


Figura 12. Promedios de los valores de Biomasa, Carbono capturado y CO₂ capturado.

Para los cálculos siguientes se utilizó la medición del CO₂ capturado del tratamiento de datos de F. CONAFOR, dado que las fórmulas de este tratamiento de datos son las fórmulas oficiales del programa REDD+ en conjunto con la Comisión Nacional Forestal.

Si se multiplicó la media del CO₂ capturado por el número de árboles de CUCBA el resultado es de 4383.15 toneladas de CO₂ y con un carbono capturado de 1194.22 toneladas. Este resultado debe de interpretarse como el dióxido de carbono capturado en un año en el arbolado con más de 15cm de DAP en el CUCBA. Cabe aclarar que este resultado es el que ya se encuentra capturado en la actualidad en los árboles, para futuros cálculos se necesita calcular la tasa de crecimiento del arbolado cada año.

Se estima que la tasa de crecimiento anual es de un 1%, por tanto esa es la captura anual de dióxido de carbono anual que se puede capturar con los árboles que están en la actualidad en CUCBA (Cuadro 8). Los datos del muestreo de árboles fueron tomados en enero del 2018, por tanto podremos hacer una estimación de los años 2017 a 2021.

Cuadro 8. Captura de carbono total en toneladas de CO₂ y el incremento por año calculado.

Año	CO ₂ capturado t Total	Diferencia de CO ₂ en t
2015	4254.250	
2016	4296.792	42.542
2017	4339.760	42.968
2018	4383.158	43.398
2019	4426.989	43.832
2020	4471.259	44.270
2021	4515.972	44.713

Esto nos permite graficar el crecimiento lineal del CO₂ capturado al año por todos los árboles de CUCBA, así podemos tener un número de captura en los años subsecuentes, dado que es esencial para el cálculo de la Carbono Neutralidad (Figura 13).

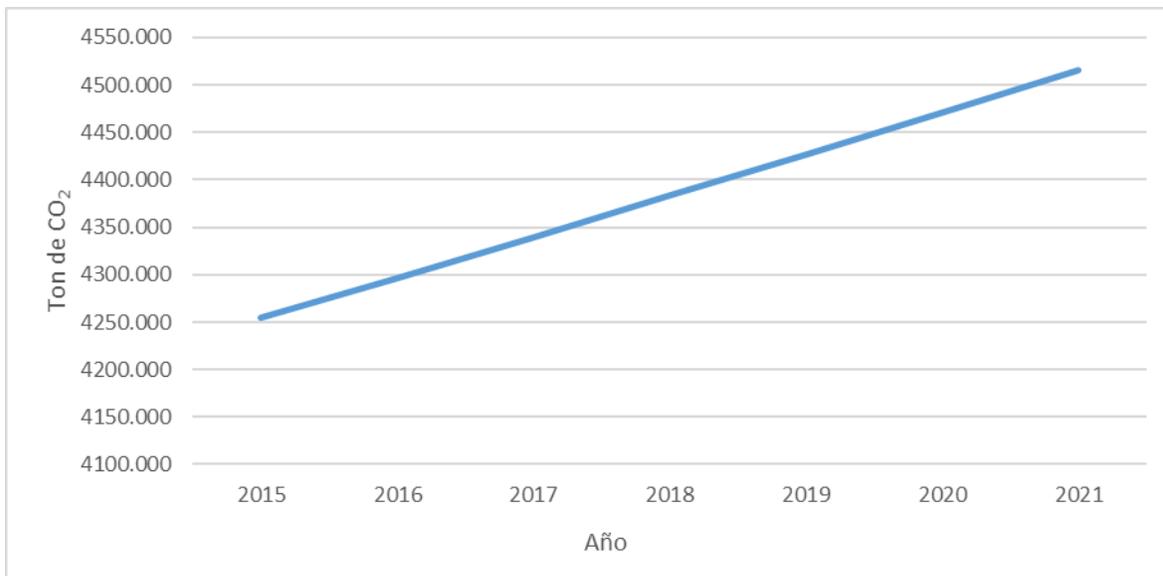


Figura 13. Crecimiento lineal de la Captura de CO₂ total en el CUCBA.

Si los árboles son removidos del CUCBA estos datos pueden cambiar, esto no hace referencia a las podas de seguridad, sino a talar árboles. También es importante mencionar que si se plantan árboles jóvenes en el CUCBA, estos tendrán un crecimiento neto y son capaces de capturar CO₂, mientras que los arboles maduros que crecen poco retienen el carbono ya fijado pero son incapaces de almacenar más CO₂ y los bosques que experimentan una pérdida neta de biomasa por la mortalidad debido a la decadencia de la masa forestal se conviertan en emisores de CO₂ (Kyrklund 1990).

Hay diferentes opciones para mitigar el calentamiento global, enfocadas únicamente en la reducción o captura de las emisiones, es decir a la disminución de la huella de carbono. Una de las vías, es buscar alternativas para evitar el uso de hidrocarburos para generar energía, como puede ser la quema del petróleo, gasolina y carbón, para la función de vehículos motorizados y generación de energía eléctrica y sustituirlos por fuentes de generación de energía renovable (IPCC 2014a). Otra de las vías para mitigar la Huella de Carbono, es el secuestro de este, dentro de los tejidos de las plantas, estas juegan un papel muy importante en el ciclo de carbono, dado que lo integran a los ecosistemas por medio de la fotosíntesis, capturando del carbono en el suelo y la biomasa (Ordóñez and Masera 2001).

Enfriar la tierra constituye un nuevo reto ante el calentamiento global, y la captura de CO₂ es una vía para lograrlo, lo cual es posible con el incremento de la masa verde como sumidero (González Couret 2015).

7.3. Fase 3. Sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico se calculó según el consumo de energía eléctrica de cada uno de recibos de la CFE, a partir de este consumo eléctrico total anual, se puede hacer una estimación del número de paneles solares, o de los módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer las necesidades del centro universitario.

Una vez obtenidas las proyecciones de la fase uno de la investigación se procedió al cálculo del sistema fotovoltaico al 80%, y con esto todos los datos para la instalación del número de módulos fotovoltaicos, como se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Sistema fotovoltaico necesario para cubrir la demanda energética del CUCBA

Semestre	Consumo kWh	kWh Anual	kWh Diario	Sist. Foto. kW 100%	Sist. Foto. kW 80 %	Módulos 270 w	Módulos 320 w
2013A	815002	1636973	4484.858	805.181	644.145	2386	2013
2013B	821971						
2014A	896871	1775385	4864.068	873.262	698.609	2587	2183
2014B	878514						
2015A	900745	1827256	5006.181	898.776	719.021	2663	2247
2015B	926511						
2016A	919153	1790408	4905.227	880.651	704.521	2609	2202
2016B	871255						
2017A	892763	1793012	4912.362	881.932	705.546	2613	2205
2017B	900249						
2018A	895532	1790014	4904.148	880.457	704.366	2609	2201
2018B	894482						
2019A	893431	1785812	4892.636	878.391	702.712	2603	2196
2019B	892381						
2020A	891331	1781611	4881.126	876.324	701.059	2596	2191
2020B	890280						
2021A	889230	1777410	4869.616	874.258	699.406	2590	2186
2021B	888180						

Los datos obtenidos muestran que el consumo más alto anual en kWh es del año de 2015, así mismo esto coincide con el Sistema Fotovoltaico al 80% es el valor más alto, dado que el cálculo del sistema fotovoltaico depende del consumo anual de kWh. Sin embargo, este año 2018 muestra un consumo de 1790014 kWh anual, siendo así que se requiere un Sistema Fotovoltaico al 80% de 704.366 kW. Mismos datos que se presentan en la Figura 14.

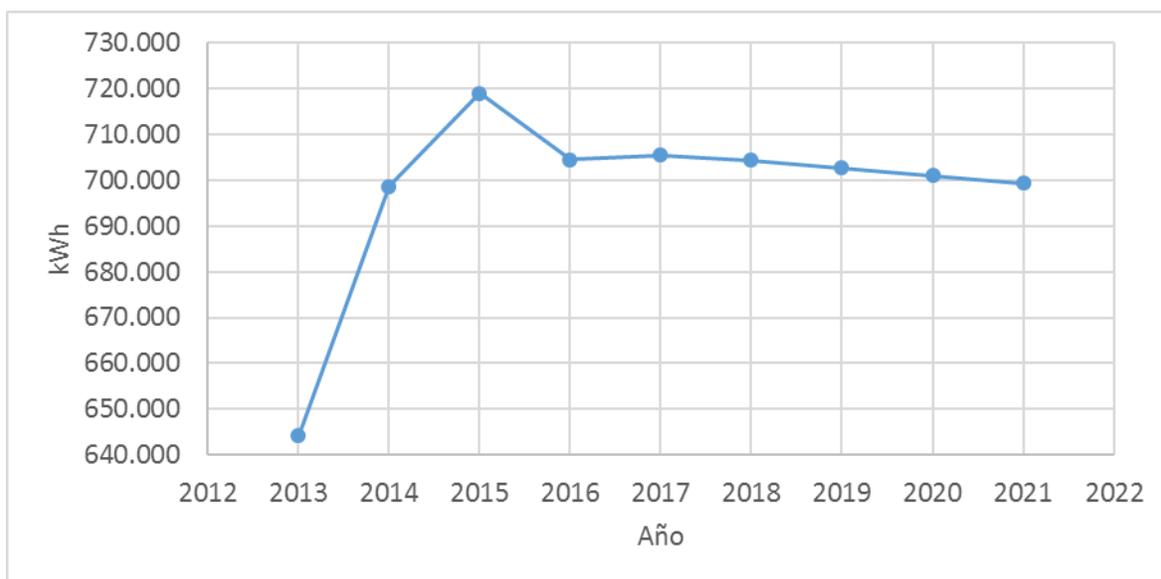


Figura 14. Sistema fotovoltaico al 80% en kWh de los años 2013 al 2021.

Aún que los Sistemas Fotovoltaicos más grandes sean anteriores al 2017 es innecesario instalar un sistema que no se va a necesitar, por tanto con un sistema fotovoltaico adaptado a las necesidades del 2018, es suficiente para sostener el consumo energético al 80% al menos hasta el año 2021.

Para la instalación de sistemas fotovoltaicos se pueden utilizar distintos paneles solares, que a su vez tienen diferentes eficiencias. Los módulos fotovoltaicos más comunes son los de 270 y los de 320 w. Por tanto se puede calcular el número de paneles fotovoltaicos necesarios para alcanzar el Sistema Fotovoltaico, para cubrir las necesidades de consumo de energía eléctrica del CUCBA.

El Sistema Fotovoltaico a 704 kW puede cubrirse con 2609 módulos fotovoltaicos de 270w o con 2201 módulos fotovoltaicos de 320w. Con estos datos podemos calcular el

área que necesitamos para la instalación del sistema fotovoltaico y cuál es el costo aproximado de los paneles fotovoltaicos.

Para tener una Instalación fotovoltaica interconectada con la CFE es necesario que esta no exceda 499 kW, por tanto en CUCBA se necesitan al menos 2 contratos distintos con la CFE para poder cubrir toda la energía utilizada. Sin embargo, esto no es un problema, dado que en la actualidad el centro universitario cuenta con 7 contratos diferentes con la CFE.

Es posible tener una instalación mayor a 499 kW, sin embargo en la política de la CFE esto requeriría un tipo de contrato distinto, el cual tarda más tiempo en ser aprobado. Pero con 7 contratos para el campus las agujas esto no es un problema, dado que pueden dividirse el sistema de 704.366w entre 7 o completar las necesidades con solo 2 contratos distintos, uno de 400 y otro de 304 kW. Estos dos contratos se pueden establecer a base de Generación Distribuida ante la CFE, misma energía que es utilizada dentro del lugar de la instalación. Si se hiciera una instalación completa de 704 kW, esta tendría que ser mediante un contrato con la CFE, la CRE y la CENACE, y la energía producida en el predio, tendría que ser vendida, y no se podría utilizar en el CUCBA.

La orientación de la instalación de los módulos fotovoltaicos debe ser a 21° sur, dado que el CUCBA se encuentra en las coordenadas 20°44'40.13" N y 103°30'47.49" O, con esto se asegura que el aprovechamiento del Sol como Recurso Natural Renovable sea eficiente.

También es importante tener en cuenta que los módulos fotovoltaicos deben de instalarse en un sitio donde no sean ocultados por árboles u otro tipo de agentes que puedan causar sombra sobre los módulos, haciendo con esto que la captación de la radiación sea más efectiva y el sistema fotovoltaico pueda funcionar eficazmente.

Cuadro 10. Área y costo total por módulo fotovoltaico

Módulo fotovoltaico	Número de módulos	Área m ²	Costo por modulo \$	Costo total \$
270w	2609	4252.7	4000	10436000
320w	2202	4292.2	5000	11010000

El costo estimado de los módulos fotovoltaicos de 270w es de 4000\$ pesos y para los módulos de 320w de 5000\$ pesos, si se opta por la instalación de paneles de 270w se ahorran 574,000\$ pesos. Por tanto si se define la elección de los módulos fotovoltaicos a partir del costo total, los módulos de 270w son la mejor opción, Cuadro 10.

El área total por estos módulos de 270w es de 4252.7 m², aplicando estos se ahorraría un área de 39.5 m², por tanto, se requiere un área menor. Debido a los módulos fotovoltaicos de 270w son la mejor opción para la instalación del Sistema Fotovoltaico del Centro Universitario. Sin embargo el área no es un problema para la instalación del sistema, dado que el CUCBA cuenta con suficiente espacio tan solo en el estacionamiento de alumnos para la instalación del sistema. El estacionamiento cuenta con 15402m² por tanto solo se necesitaría menos una tercera parte de este espacio para cubrir el total del Sistema fotovoltaico.

Es importante mencionar que los costos aquí señalados solo incluyen el precio del módulo fotovoltaico, esto quiere decir que se necesitan otros requerimientos de infraestructura como lo son inversores de corriente, medidores bidireccionales, cableado y estructuras de soporte. Por tanto para tener una proyección de las necesidades monetarias para la instalación de los módulos fotovoltaicos es necesario incluir estos costos. En este estudio se deja hasta aquí dado que son muchas las variables que pueden afectar los precios y esto debería calcularse una vez que el CUCBA se decida a aplicar el SF.

7.4. Fase 4. Neutralidad de Carbono

Los resultados de las fases anteriores nos dan los elementos suficientes para llegar a esta fase de la investigación, el carbono neutral, cuando se refiere al carbono se quiere decir el Dióxido de Carbono CO₂, y no solo el C dentro de la fórmula.

Si la instalación del Sistema Fotovoltaico se hace como se recomienda en la tercera fase de la investigación la generación de gases de efecto invernadero emitidos por el CUCBA se reduciría un 80% por el uso de la energía eléctrica. Al 20% faltante, se le resta la captura de CO₂ en cada uno de los años. Esto nos da como resultado el CO₂ que es necesario mitigar.

Si no se instala el Sistema Fotovoltaico como se recomienda en la fase anterior, se tendrá que mitigar al 100% el consumo de energía eléctrica del CUCBA y con esto se tendría que mitigar por completo la Huella de Carbono de cada uno de los años.

La diferencia de CO₂ a capturar si se instala el sistema fotovoltaico y si no se instala, con las cantidades de Captura de CO₂ ya restadas. Siendo el 2018 el año con mayores emisiones de CO₂ por mitigar, donde se muestra un descenso hasta llegar al 2012 con las cantidades de CO₂ a mitigar más bajas, Figura 15.

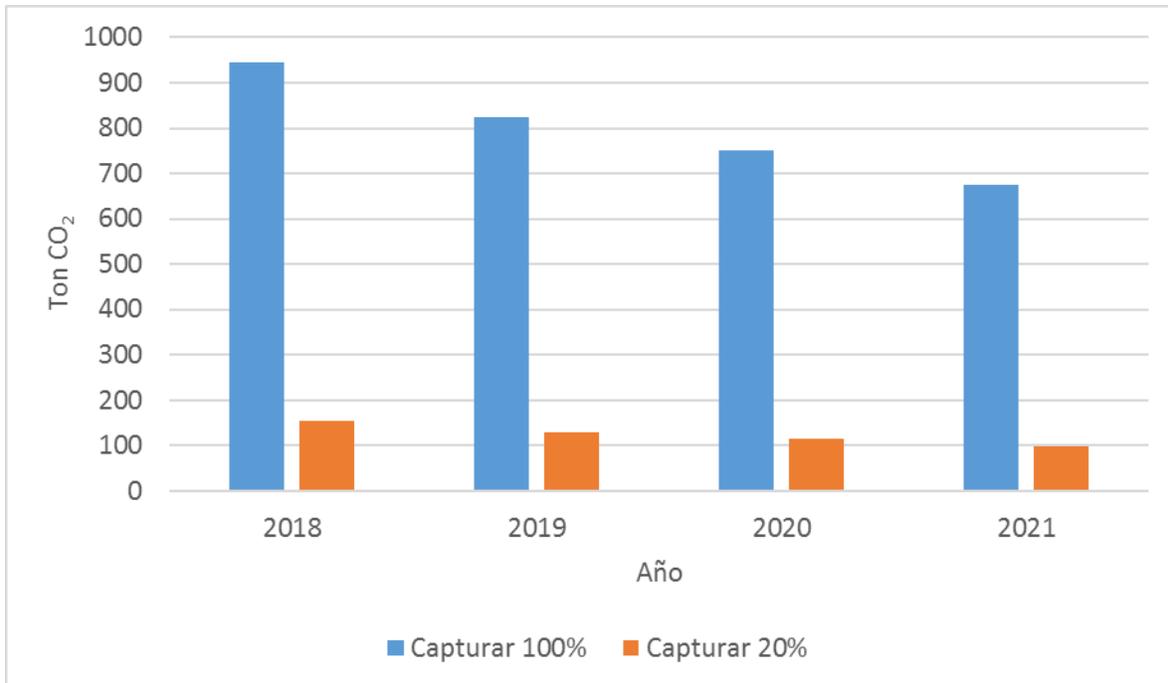


Figura 15. Escenarios a mitigar con y sin la instalación del sistema fotovoltaico

En un escenario con la instalación del Sistema Fovoltáico al 80% la cantidad de HdeC a mitigar en 2018 es de 154 toneladas de CO₂, en comparación con el escenario sin instalación del Sistema Fovoltáico con 945 toneladas de CO₂. Esto equivale, a que en un Escenario sin instalación del Sistema Fovoltáico, hay que mitigar 513.6% más que en un escenario con instalación del Sistema Fovoltáico, Figuras 16 y 17.

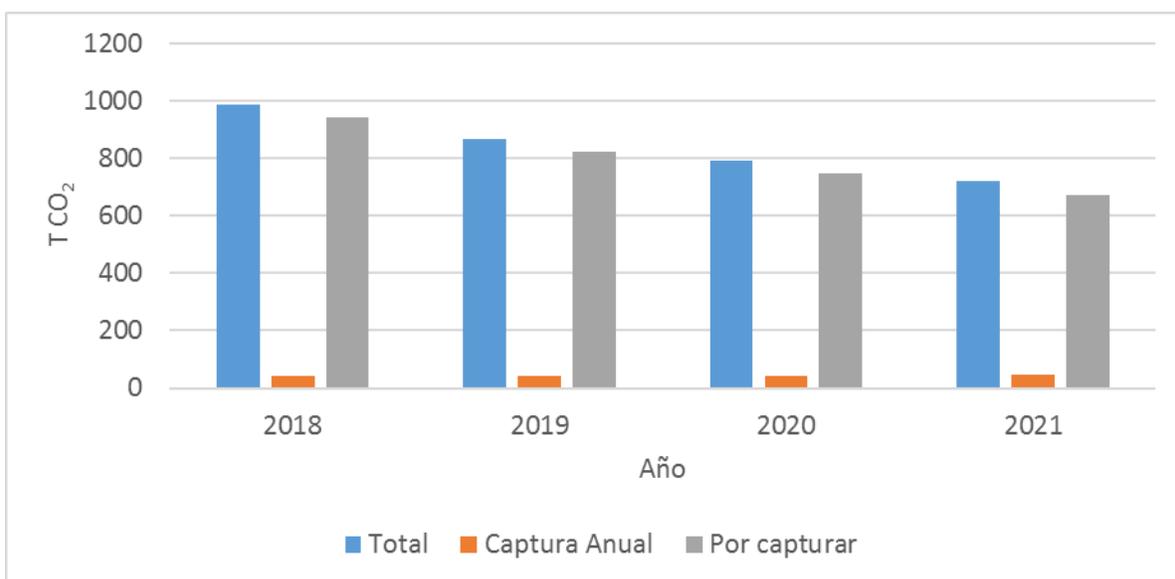


Figura 16. Dióxido de carbono en toneladas en un escenario sin Sistema Fovoltáico

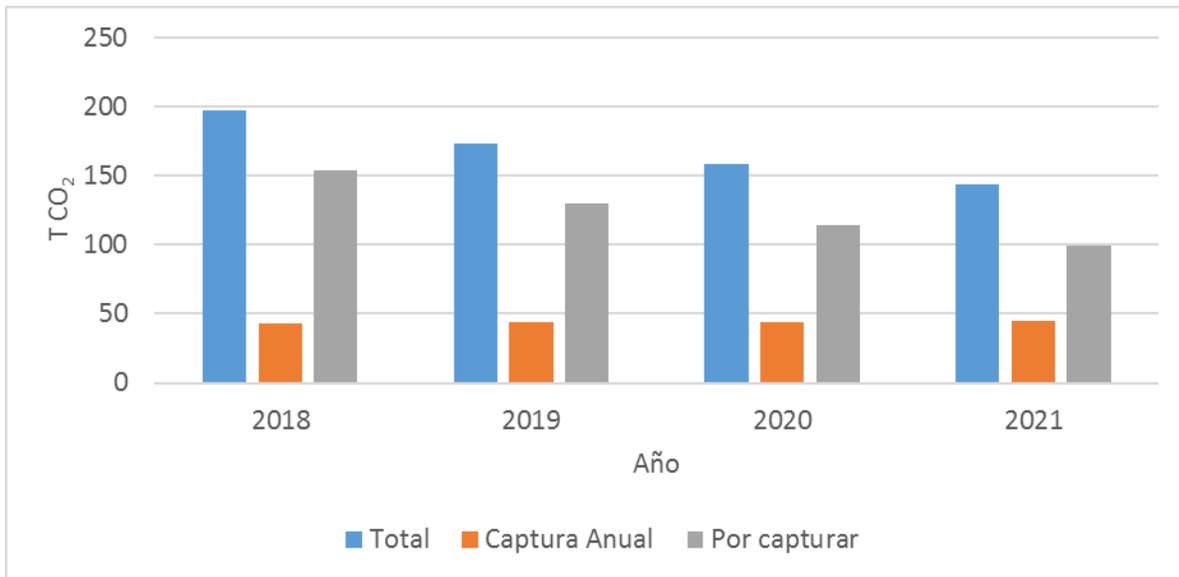


Figura 17. Dióxido de carbono en toneladas en un escenario con Sistema Fotovoltaico

Los valores Per Cápita se muestran en la Figura 18, para los escenarios con y sin la instalación del sistema fotovoltaico.

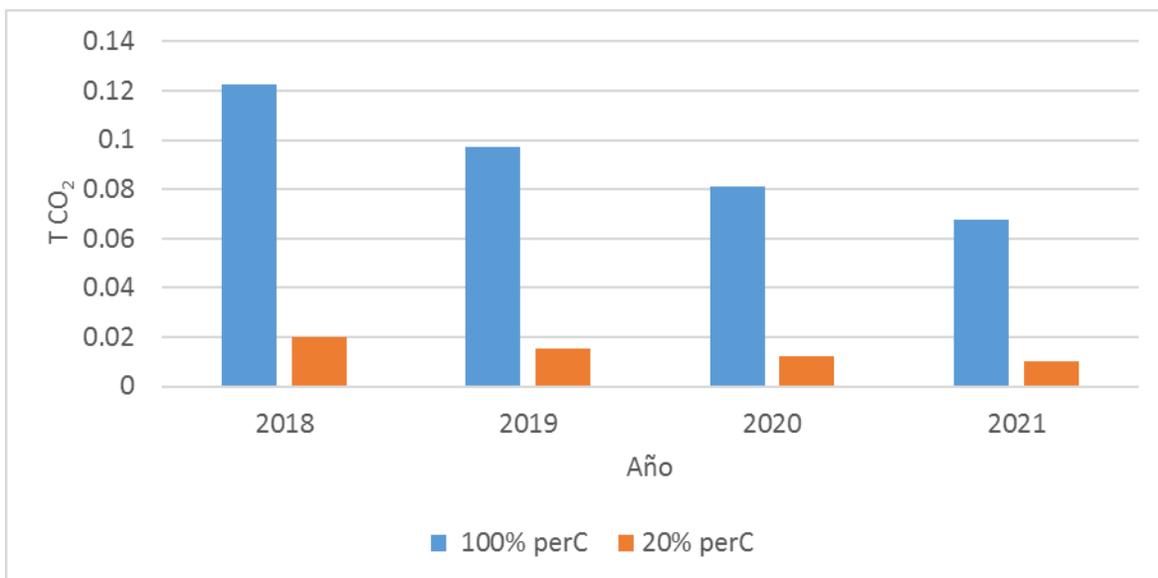


Figura 18. Huella de carbono per cápita con y sin la instalación del Sistema fotovoltaico

Es claro que el escenario a mitigar en cada uno de los años con la instalación del sistema fotovoltaico es menor que el escenario sin instalación del sistema fotovoltaico.

Es de interés comparar el escenario con la instalación del sistema fotovoltaico contra las otras universidades.

Cuadro 11. Comparación de la huella de carbono per cápita con otras universidades

Universidad	Año	t CO ₂ eq PerC	
CUCBA	2021	0.0099	
CUCBA	2020	0.0124	
CUCBA	2019	0.0153	
CUCBA	2018	0.0200	
UNAM	2011	0.3070	(Escobedo et al. 2014)
Universidad Técnica de Madrid	2010	0.5110	(Alvarez, Blanquer, and Rubio 2014)
De Montfort University	2009	0.0050	(Ozawa-Meida et al. 2013)

Siendo así el CUCBA se acerca año con año hacia la Universidad de Montfort (Ozawa-Meida et al. 2013), que genera 0.005 toneladas de CO₂ eq per cápita al año, mientras que el CUCBA en el año 2021, con el registro más bajo de huella de carbono con 0.0099 toneladas de CO₂ eq per cápita.

Los Recursos Naturales Renovables pueden ser utilizados para la generación de energías eléctricas y estos pueden competir con el petróleo. Las universidades deben tomar en cuenta que los Gases de Efecto Invernadero podrían reducirse a través de dos procesos: disminuyendo las emisiones antropogénicas de CO₂, en la manera de producción de los bienes y servicios o mediante la creación y/o mejoramiento del secuestro de carbono en la biosfera, aumentando las superficies de captura o evitando eliminar las ya existentes.

Hay diferentes opciones para disminuir la contaminación y las emisiones de GEI por la generación y el uso de energía, sin necesidad de dejar de cubrir la demanda mundial de servicios energéticos (IPCC 2011). Estas opciones son las tecnologías sustentables, en las cuales sus interacciones con la sociedad, la economía, el medio ambiente, y otras tecnologías, deben tener el menor impacto nocivo posible (Ramírez 2012). En este sentido las tecnologías bajas en carbono pueden suministrar energía, reemplazando el carbón por el gas natural y aumentando el uso de fuentes de energías renovables o de energía nuclear, las cuales, en definitiva, emiten cantidades escasas o nulas de CO₂ (Bert M., Ogunlade D., Coninck H., Loos M. 2005).

Por tanto, encontrar soluciones de ingeniería, urbanismo y comportamiento para ayudar a mitigar las emisiones en el contexto del desarrollo constituye un desafío clave para todas las universidades del mundo (Li, Tan, and Rackes 2015); realizar un análisis de huella de carbono podría encajar perfectamente en esta estrategia y proporcionar informes, monitoreo e identificación de componentes clave del desempeño ambiental y conciencia entre el personal y los estudiantes sobre su papel y posibilidades en acciones de mitigación (Gómez, Cadarso, and Monsalve 2016).

Además de su gran potencial para mitigar el cambio climático, las energías renovables pueden aportar otros beneficios (IPCC 2011). Si se utilizan de forma adecuada, las energías renovables pueden contribuir al desarrollo social y económico, favorecer el acceso a la energía y la seguridad del suministro de energía, y reducir sus efectos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana (IPCC 2011).

Ahora, en cualquiera de los dos escenarios se tiene que mitigar el restante de la huella de carbono, ya habiendo aplicado la resta de la captura de CO₂ de los arboles ya existentes en el CUCBA.

Para la compensación de la huella de carbono restante existen varios caminos posibles, uno de ellos es en la Plataforma de compensación de emisiones CeroCO₂ en donde según las Toneladas de CO₂ que emites te ofrecen diferentes proyectos internacionales en los cuales puedes dar una aportación monetaria y ellos expiden una constancia de tus aportaciones y de la cantidad de CO₂ compensando.

El portal en donde se hacen estos cálculos es <https://www.ceroco2.org/compensacion/>. Se han elegido dos proyectos para hacer el cálculo del dinero que se necesitaría pagar anualmente para compensar la huella de carbono del CUCBA, el proyecto más costoso denominado proyecto A “Mejora de prácticas de agricultura orgánica con comunidades indígenas en Guatemala segunda fase” y el proyecto denominado B, el más económico, “Pequeñas y micro centrales hidroeléctricas en China Segunda fase”.

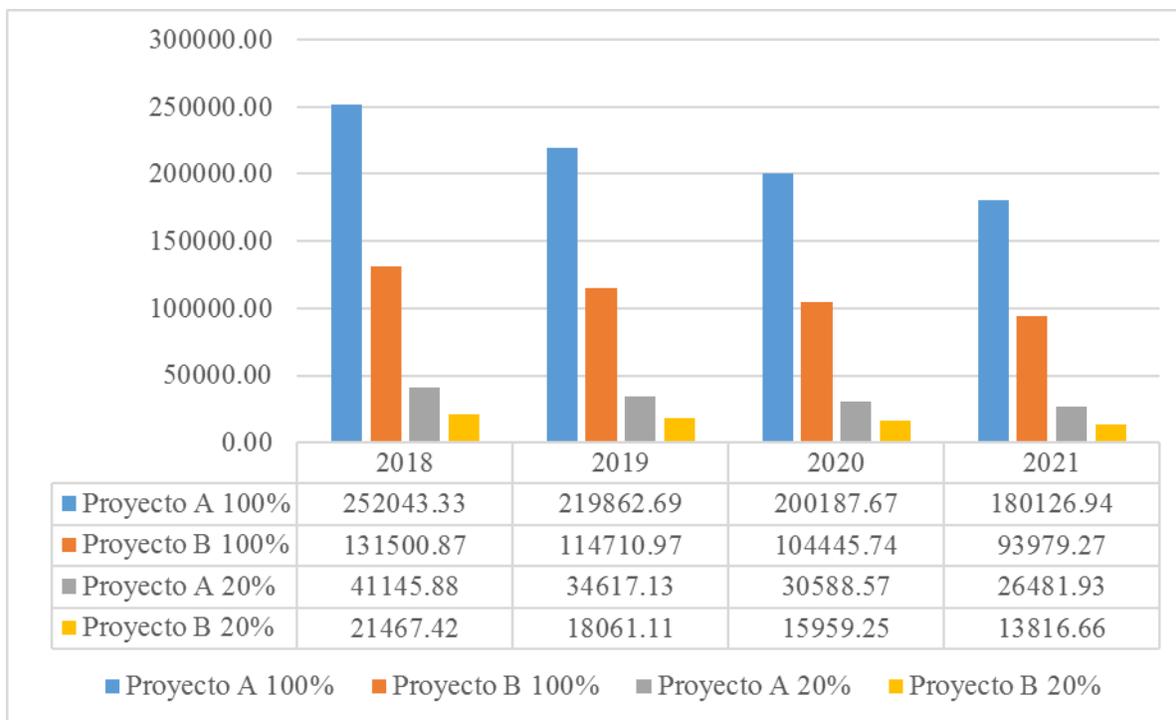


Figura 19. Costo en pesos de la compensación de la huella de carbono con y sin la instalación del Sistema Fotovoltaico.

Según la Figura 19, es claro que el costo de los escenarios con la instalación del sistema fotovoltaico es menor. La aplicación de cualquier de los programas que propone la Plataforma de compensación de emisiones CeroCO₂, es aceptable si consideramos que el calentamiento global es un problema planetario, por tanto el sitio donde se mitigue la huella de carbono es correcto si se considera esta generalidad.

Como esta existen otras plataformas similares, como la plataforma CO₂ Cero, <http://twenergy.com/comunidad/herramientas-y-comparadores/calculadora-huella-de-carbono>, <http://www.co2cero.co/>, <http://yourlittletree.org/planta-un-arbol/> y <http://www.aguadecoco.org/huellaecologica/CalculaCO2/>, creadas por diferentes organizaciones que tratan de generar una manera didácticas para el cálculo de la HdeC.

Las calculadoras de huella de carbono proponen la compensación con programas y proyectos de plantación de árboles u otros en distintos países, sin embargo, contar con esos árboles dentro del territorio del propio país ayuda con otras variables como la temperatura ambiental, la disminución de la tasa de erosión, evita deslaves, y mejora la filtración de agua en los mantos freáticos. Por tanto se propone otra acción para la mitigación de la

huella de carbono, que es la plantación de árboles en terrenos del CUCBA o de la universidad. Así mismo, si no se cuenta con suficientes terrenos, se puede hacer en otros alrededores o en un espacio que sea necesario.

Pinus douglasiana es la especie arbórea que más frecuentemente se encontró en el muestreo del CUCBA, y también, esta especie se encuentra en el bosque la primavera de manera natural, por tanto se recomienda hacer una plantación de este pino en las inmediaciones del centro universitario o cercano al bosque, dado que es un árbol de la zona.

Si se quisiera mitigar todo el dióxido de carbono generado en 2018 a partir del consumo de la energía eléctrica en CUCBA, una vez descontado el carbono almacenado durante este periodo por los árboles del centro universitario, se necesitarían plantar 112,329 *Pinus douglasiana* y mantenerlos vivos durante un año, estos pinos deben ser de una edad inicial de 5 años y mantenerse en las condiciones ideales de riego, o bien 22,466 pinos durante 5 años, con las mismas características de mantenimiento.

Si se instalara el Sistema Fotovoltaico solo se necesitaría capturar el 20% del CO₂, por tanto se necesitarían 18,338 *Pinus douglasiana*, durante un año o 3,667 pinos durante 5 años.

Los resultados de los años siguientes, 2019, 2020, 2021, se presentan en el Cuadro 12, es importante mencionar que para tener un panorama específico del carbono a capturar es necesario medir la huella de carbono, esto nos dará una mayor exactitud.

Cuadro 12. Árboles necesarios para compensar la huella de carbono en CUCBA por consumo de energía eléctrica en escenarios con y sin implementación del Sistema Fotovoltaico

Año	Especie	Árboles 1 año 100%	Árboles 1 año 20%	Árboles a 5 años 100%	Árboles a 5 años 20%
2018	<i>Pinus douglasiana</i>	112329.3851	18337.68679	22465.87701	3667.537357
2019	<i>Pinus douglasiana</i>	97987.28374	15427.98462	19597.45675	3085.596925
2020	<i>Pinus douglasiana</i>	89218.62242	13632.55764	17843.72448	2726.511527
2021	<i>Pinus douglasiana</i>	80278.05703	11802.33289	16055.61141	2360.466578

Siendo así el mejor escenario es la plantación de árboles con un cuidado de 5 años, en la mitigación al 20% es decir con la instalación del Sistema Fotovoltaico al 80%. Con

ambas aplicaciones, el SF y la plantación de árboles, el CUCBA podría llegar a la carbono neutralidad.

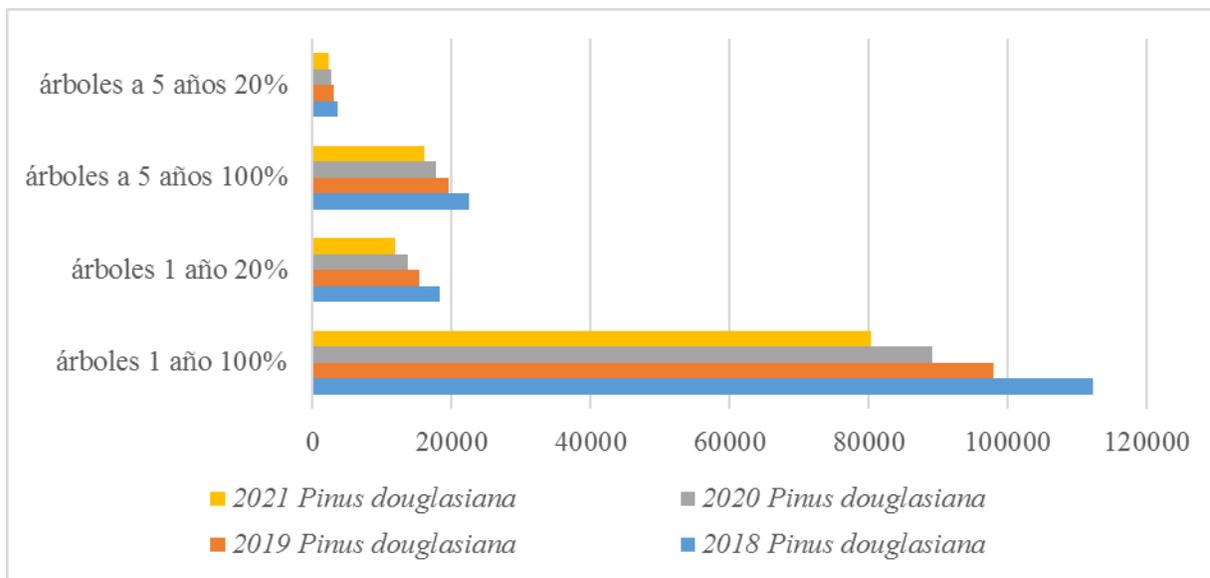


Figura 20. Número de árboles necesarios para la carbono neutralidad, en escenarios con y sin sistema fotovoltaico, con el cuidado de los árboles a 1 y 5 años.

Con la gráfica 19 podemos observar que incluso en un escenario de instalación de sistema fotovoltaico a un año, se deben plantar menos árboles que en un escenario sin instalación de sistema fotovoltaico cuidando los árboles durante 5 años.

8. CONCLUSIONES

La huella de carbono por consumo de energía eléctrica es susceptible de mitigar y compensar, si se aprovechan los recursos naturales renovables de una manera sustentable, el sol como generador de energía eléctrica es una de las vías del aprovechamiento de los recursos naturales para mitigar la huella de carbono, así como también se pueden aplicar otras tecnologías de generación de energía eléctrica sostenibles. Otra de las vías de compensación es el secuestro de CO₂ mediante la fijación de carbono en la biomasa arbórea, esta se puede calcular a partir del crecimiento anual de árboles o por el crecimiento en biomasa por hectárea, donde también se pueden plantar nuevos árboles para compensar las emisiones de dióxido de carbono.

1. El CUCBA emitió 1,043.53 toneladas de CO₂ por consumo de energía eléctrica facturada en el año 2017.
2. Con el arbolado del Centro Universitario se capturaron 42.9 toneladas de CO₂ en el año de 2017.
3. Con la instalación de un sistema fotovoltaico al 80% de las necesidades de energía eléctrica del CUCBA, solo se tendrían que mitigar 165.8 toneladas de CO₂.
4. Para mitigar el resto de las emisiones de CO₂ que tiene el Centro Universitario, se necesita una plantación de 3,943 árboles de *Pinus douglasiana*, mantenidos durante 5 años en condiciones óptimas de riego y suelo.
5. Por tanto la implementación de estas estrategias de mitigación y compensación nos lleva a la huella de carbono cero, programa con el cual podemos contribuir con la desaceleración del calentamiento global y combatir eficazmente el cambio climático.

9. RECOMENDACIONES

1. Hacer la estimación de huella de carbono por consumo de energía eléctrica al menos una vez cada año para mitigar lo más exactamente posible las emisiones de CO₂.
2. Monitorear el secuestro de dióxido de carbono anualmente en un censo de árboles mediante la medición del DAP y la altura total, con una fórmula alométrica específica para cada especie.
3. Optar por la instalación de un Sistema Fotovoltaico para el consumo eléctrico del centro universitario.
4. Tomar en cuenta la compensación del CO₂ emitido en los Planes de Operación Anual de las instituciones u organizaciones y el Plan Maestro de cada centro universitario, de manera monetaria y en espacio e infraestructura.
5. Trabajar por el decremento de la huella de carbono per cápita para poder compararlo con otras universidades o instituciones.
6. Medir la huella de carbono total del CUCBA, incluyendo el transporte, el consumo de materiales, el consumo de elementos químicos, el consumo de agua y generación de residuos sólidos.
7. Actualizar la legislación vigente a favor de la transición hacia energías renovables, sustentada en elementos de investigación científica, esto para reducir la HdeC.

10. LITERATURA CITADA

- Agoglia, Ofelia Beatriz. 2011. *La Crisis Ambiental Como Proceso. Un Análisis Reflexivo Sobre Su Emergencia, Desarrollo y Profundización Desde La Perspectiva de La Teoría Crítica*. Universidad de Girona.
- Alvarez, Sergio, Marco Blanquer, and Agustín Rubio. 2014. "Carbon Footprint Using the Compound Method Based on Financial Accounts. the Case of the School of Forestry Engineering, Technical University of Madrid." *Journal of Cleaner Production* 66. Elsevier Ltd: 224–32. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.050.
- Arrhenius, Svante. 1896. "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground." *Philosophical Magazine Series 5* 41 (251): 237–76. doi:10.1080/14786449608620846.
- Barrionuevo, SA, and E Pan. 2009. "Evaluación Del CO2 Almacenado En La Vegetación Del Bosque Nativo de Santiago Del Estero (Argentina): Bases Para La Conservación de Bosques En." *Foresta Veracruzana* 11 (2): 1–10.
- Benson, S.M., and F.M. Orr. 2008. "Carbon Dioxide Capture and Storage." *MRS Bulletin* 33 (4): 303–305. doi:10.1038/kisup.2012.51.
- Bert M., Ogunlade D., Coninck H., Loos M., Meyer L. 2005. *La Captación y El Almacenamiento de Dióxido de Carbono*. PNUMA. doi:10.3145/epi.2008.jul.13.
- Bifani, Paolo. 1999. *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Madrid: IEPALA.
- Bodansky, Daniel. 2001. "The History of the Global Climate Change Regime." *International Relations and Global Climate Change*, no. May: 23–40.
- Browne, David, Bernadette O'Regan, and Richard Moles. 2009. "Use of Carbon Footprinting to Explore Alternative Household Waste Policy Scenarios in an Irish City-Region." *Resources, Conservation and Recycling* 54 (2): 113–22. doi:10.1016/j.resconrec.2009.07.003.

- Caballero, Margarita, Socorro Lozano, and Beatriz Ortega. 2007. “Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una Perspectiva Desde Las Ciencias de La Tierra.” *Revista Digital Universitaria* 8 (10): 2–12.
http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf.
- Comision Federal de Electricidad. 2016. “CFE Reporte Anual 2016,” 396.
- Comisión Reguladora de Energía. 2018. “Factor de Emisión Del Sector Eléctrico Nacional.” Ciudad de México.
- CONAFOR. 2014. *Estimación de Las Reservas de Carbono En La Biomasa Forestal En México*.
- Cossio, María Laura, Laura F Giesen, Gabriela Araya, María Luisa S Pérez-Cotapos, RICARDO LÓPEZ VERGARA, Maura Manca, R. A. Tohme, et al. 2012. “The Greenhouse Effect and Climate Change.” *Una Ética Para Cuantos? XXXIII* (2): 81–87. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Delgado, Gian Carlo. 2011. “Petróleo, Medio Ambiente, Cambio Climático y Seguridad: Macondo, Otra Advertencia Más.” *Nómadas. Revista Crítica de Ciencia Sociales y Jurídicas* 30 (2).
- Escobedo, Azucena, Sonia Briceño, Héctor Juárez, Daniel Castillo, Mireya Imaz, and Claudia Sheinbaum. 2014. “Energy Consumption and GHG Emission Scenarios of a University Campus in Mexico.” *Energy for Sustainable Development* 18 (1). International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.: 49–57. doi:10.1016/j.esd.2013.10.005.
- Etheridge, D M, L P Steele, R L Langenfelds, R J Francey, J M Barnola, and V I Morgan. 1996. “Natural and Anthropogenic Changes in Atmospheric CO₂ over the Last 1000 Years from Air in Antarctic Ice and Firn.” *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres* 101 (D2): 4115–28. doi:10.1029/95JD03410.
- Eugenia, María, Ibararán Viniegra, and Rafael Gracida Zurita. 2009. “Índice de Sustentabilidad Energética : Estimaciones Para México 1.” *Principios* 15: 85–100.
- FAO. 2015. “La FAO y Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible,” 1–8.

<http://www.fao.org/3/a-i4997s.pdf>.

Foladori, Guillermo, Naína Pierri, Humberto Tommasino, and Javier Taks. 2005. “La Crisis Ambiental Contemporánea.” In *¿Sustentabilidad? Desacuerdos Sobre El Desarrollo Sustentable*, 223. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.

Fuglestvedt, J. S., K. P. Shine, T. Berntsen, J. Cook, D. S. Lee, A. Stenke, R. B. Skeie, G. J.M. Velders, and I. A. Waitz. 2010. “Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Metrics.” *Atmospheric Environment* 44 (37). Elsevier Ltd: 4648–77. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.04.044.

Galli, Alessandro, Thomas Wiedmann, Ertug Ercin, Doris Knoblauch, Brad Ewing, and Stefan Giljum. 2012. “Integrating Ecological, Carbon and Water Footprint into a ‘Footprint Family’ of Indicators: Definition and Role in Tracking Human Pressure on the Planet.” *Ecological Indicators* 16. Elsevier Ltd: 100–112. doi:10.1016/j.ecolind.2011.06.017.

Gómez, Nuria, María Ángeles Cadarso, and Fabio Monsalve. 2016. “Carbon Footprint of a University in a Multiregional Model: The Case of the University of Castilla-La Mancha.” *Journal of Cleaner Production* 138. Elsevier Ltd: 119–30. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.009.

González Couret, Dania. 2015. “Las Energías Renovables Al Servicio de La Humanidad.” *Arquitectura y Urbanismo*. 36 (1): 93–98.

Granados, Alejandra. 2013. “Vigésimo Informe: Estado De La Nación En Desarrollo Humano Sostenible. ‘Carbono Neutralidad: Avances y Desafíos de Cara Al Año 2021,’” 1–31. http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/019/granados_2013.pdf.

Güereca, Leonor Patricia, Nathalia Torres, and Adalberto Noyola. 2013. “Carbon Footprint as a Basis for a Cleaner Research Institute in Mexico.” *Journal of Cleaner Production* 47. Elsevier Ltd: 396–403. doi:10.1016/j.jclepro.2013.01.030.

Hernández, Igor. 2015. “Los Retos de Consiliar El Petroleo y La Sostenibilidad Ambiental.” *Debates IESA XX*: 20–23.

- Hidalgo, Akira. 2013. “Guía Metodológica Cálculo Del Inventario de Gases de Efecto Invernadero de Actividades y Eventos Corporativos.” *Programa Acción Clima*. http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-2/Documentos/metodologia_huellacarbono_actividades_final2014.pdf.
- Huang, C. Y., A. H. Hu, J. Yin, and H. C. Wang. 2016. “Developing a Parametric Carbon Footprinting Tool for the Semiconductor Industry.” *International Journal of Environmental Science and Technology* 13 (1): 275–84. doi:10.1007/s13762-015-0869-z.
- IPCC. 2007a. “Climate Change 2007: The Physical Science Basis.” *Intergovernmental Panel on Climate Change* 446 (7137): 727–28. doi:10.1038/446727a.
- . 2007b. *Climate Change 2007 Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team IPCC]. doi:10.1256/004316502320517344.
- . 2008. “IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories.” *Intergovernmental Panel on Climate Change National Greenhouse Gas Inventories Programme*, 20.
- . 2011. *Fuentes de Energía Renovables y Mitigación Del Cambio Climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático. doi:ISBN 978-92-9169-331-3.
- . 2013. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Climate Change 2013*: doi:10.1017/CBO9781107415324.
- . 2014a. “Cambio Climático 2014 - Informe de Síntesis.”
- . 2014b. “Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers.” *Ipcc*, 31. doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Isaksen, Ivar S.A., Claire Granier, G. Myhre, Terje Berntsen, Stig B. Dalsøren, Michael Gauss, Zbigniew Klimont, et al. 2012. “Atmospheric Composition Change: Climate-Chemistry Interactions.” *The Future of the World’s Climate* 43 (2009): 309–65. doi:10.1016/B978-0-12-386917-3.00012-9.

- Jack, L. B., and D. A. Kelly. 2012. "Property-Based Rainwater Drainage Design and the Impacts of Climate Change." *Building Services Engineering Research and Technology* 33 (1): 19–33. doi:10.1177/0143624411428952.
- Jacobson, Mark Z. 2009. "Review of Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security." *Energy Environ. Sci.* 2 (2): 148–73. doi:10.1039/B809990C.
- Jain, P. C. 1993. "Greenhouse Effect and Climate Change: Scientific Basis and Overview." *Renewable Energy* 3 (4–5): 403–20. doi:10.1016/0960-1481(93)90108-S.
- Jandl, R. 1998. "Secuestro de Carbono En Bosques – El Papel Del Suelo." *Revista Forestal Iberoamericana* 1: 57–62.
- Joachim, Hans, Paul J Crutzen, William C Clark, and Jullian Hunt. 2005. "EARTH SYSTEM ANALYSIS for SUSTAINABILITY." *Environment* 47 (8). Cambridge: MIT Press: 10.
- Keeling, Charles D. 1960. "The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere." *Tellus* 12 (2): 200–203. doi:10.3402/tellusa.v12i2.9366.
- . 1998. "Rewards and Penalties of Monitoring the Earth." *Annual Review of Energy and the Environment* 23 (1): 25–82. doi:10.1146/annurev.energy.23.1.25.
- Kleiner, Kurt. 2007. "The Corporate Race to Cut Carbon." *Nature Reports Climate Change* 3 (0708): 40–43. doi:10.1038/climate.2007.31.
- Kocmanová, Alena, and Marie Dočekalová. 2012. "Global Environmental, Social and Economic Crises: Voluntary Corporate Activities as a Possible Solution." *Ekonomická Revue - Central European Review of Economic Issues* 15 (4): 217–24. doi:10.7327/cerei.2012.12.02.
- Kyrklund, Börje. 1990. "Cómo Pueden Contribuir Los Bosques y Las Industrias Forestales a Reducir El Exceso de Anhídrido Carbónico En La Atmósfera." *Unasylva* 163: 12–14.
- Lagzi, I, Róbert Mészáros, Györgyi Gelybó, and Ádám Leelóssy. 2013. *Atmospheric Chemistry. International Journal of Air Pollution*. Vol. 1.

- Li, Xiwang, Hongwei Tan, and Adams Rackes. 2015. "Carbon Footprint Analysis of Student Behavior for a Sustainable University Campus in China." *Journal of Cleaner Production* 106. Elsevier Ltd: 97–108. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.084.
- Matthews, H Scott, Chris T Hendrickson, and Christopher L Weber. 2008. "The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries." *Environmental Science and Technology* 42 (16): 5839–42. doi:10.1021/es703112w.
- Maya, Augusto. 2013. *La Fragilidad Ambiental de La Cultura. Journal of Chemical Information and Modeling*. Vol. 53. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Naciones Unidas. 2012. "Resolución Aprobada Por La Asamblea General El 27 de Julio de 2012." http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf.
- . 2015. "Convención Marco Sobre El Cambio Climático - PARIS." *COP21*. Vol. 21930. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- . 2017. "Report of the Conference of the Parties on Its Twenty-Second Session, Held in Marrakech from 7 to 18 November 2016."
- Natural Capital Partners. 2016. "The Carbon Neutral Protocol" Jan (January): 1–30.
- Newbery, David M. 2016. "Towards a Green Energy Economy? The EU Energy Union's Transition to a Low-Carbon Zero Subsidy Electricity System – Lessons from the UK's Electricity Market Reform." *Applied Energy* 179. Elsevier Ltd: 1321–30. doi:10.1016/j.apenergy.2016.01.046.
- ONU. 1972. "Declaración de Estocolmo Sobre El Medio Ambiente Humano." In *Conferencia de Las Naciones Unidas Sobre El Medio Ambiente Humano*, 1–4.
- Ordóñez, José A.B., and Omar Masera. 2001. "Captura de Carbono Ante El Cambio Climático." *Madera y Bosques* 7 (1): 3–12.
- Osorio-Arce M M y Segura-Correa J C. 2001. "Ficha Informativa Del IPCC: Fechas y Momentos Destacados de La Historia Del IPCC." *Livestock Research for Rural Development*.
- Ozawa-Meida, Leticia, Paul Brockway, Karl Letten, Jason Davies, and Paul Fleming. 2013.

- “Measuring Carbon Performance in a UK University through a Consumption-Based Carbon Footprint: De Montfort University Case Study.” *Journal of Cleaner Production* 56. Elsevier Ltd: 185–98. doi:10.1016/j.jclepro.2011.09.028.
- Pandey, Divya, Madhoolika Agrawal, and Jai Shanker Pandey. 2011. “Carbon Footprint: Current Methods of Estimation.” *Environmental Monitoring and Assessment* 178 (1–4): 135–60. doi:10.1007/s10661-010-1678-y.
- Pardos, José Alberto. 2010. *Los Ecosistemas Forestales y El Secuestro de Carbono Ante El Calentamiento Global. Instituto Nacional De Investigacion Y Tecnologia Agraria Y Alimentaria*. Madrid. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01879.x.
- Peláez, Olaya. 2016. “La Cumbre de La Tierra París 2015-COP21. Un Reto Ineludible.” *Revista Facultad Nacional de Salud Pública* 34 (1).
- Peters, Glen P. 2008. “From Production-Based to Consumption-Based National Emission Inventories.” *Ecological Economics* 65 (1): 13–23. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.10.014.
- . 2010. “Carbon Footprints and Embodied Carbon at Multiple Scales.” *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (4). Elsevier B.V.: 245–50. doi:10.1016/j.cosust.2010.05.004.
- Popper, Earl R. 1959. *The Logic of Scientific Discovery. Physics Today*. Vol. 12. doi:10.1063/1.3060577.
- Pregitzer, Kurt S., and Eugénie S. Euskirchen. 2004. “Carbon Cycling and Storage in World Forests: Biome Patterns Related to Forest Age.” *Global Change Biology* 10 (12): 2052–77. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00866.x.
- Premalatha, M., S. M. Tauseef, Tasneem Abbasi, and S. A. Abbasi. 2014. “The Promise and the Performance of the World’s First Two Zero Carbon Eco-Cities.” *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies* 6 (1). Elsevier: 81–96. doi:10.1016/j.rser.2013.05.011.
- Programa GEI México. 2014. “Factor de Emisión Eléctrica 2013.” <http://www.geimexico.org/factor.html>.

- Ramírez, Michiko Amemiya. 2012. “Energía Y Sustentabilidad : Algunas Características.” *Revista Digital Universitaria*, 1–11.
- Rendón Carmona, N. 2007. *Metodología Rápida Para La Estimación y Monitoreo de Captura de Carbono*. Ecosur.
- Robert, Michel. 2002. “Captura de Carbono En Los Suelos Para Un Mejor Manejo de La Tierra.” In *Informe Sobre Recursos Mundiales de Suelos*, 61. FAO.
- Rogelj, Joeri, Gunnar Luderer, Robert C. Pietzcker, Elmar Kriegler, Michiel Schaeffer, Volker Krey, and Keywan Riahi. 2015. “Energy System Transformations for Limiting End-of-Century Warming to below 1.5 °C.” *Nature Climate Change* 5 (6). Nature Publishing Group: 519–27. doi:10.1038/nclimate2572.
- Saadatian, Omidreza, Kamaruzzaman Bin Sopian, and Elias Salleh. 2013. “Adaptation of Sustainability Community Indicators for Malaysian Campuses as Small Cities.” *Sustainable Cities and Society* 6 (1). Elsevier B.V.: 40–50. doi:10.1016/j.scs.2012.08.002.
- Schneider, Heloísa, and Joseluis Samaniego. 2010. “La Huella Del Carbono En La Producción, Distribución y Consumo de Bienes y Servicios.” *Colección Documentos de Proyectos*, 46. <http://repositorio.cepal.org:80/handle/11362/3753>.
- SEMARNAT. 2015. “Aviso Para El Registro Nacional de Emisiones.” México DF.
- . 2016. “Aviso Para El Registro Nacional de Emisiones.” Mexico DF.
- . 2017. “Aviso Para El Registro Nacional de Emisiones.” Ciudad de México.
- Shalisko, Viecheslav. 2015. “Ordenamiento Del Arbolado En Áreas Verdes de Los Centros Universitarios de La UdeG En La Zona Metropolitana de Guadalajara.”
- The British Standards Institution. 2011. “PUBLICLY AVAILABLE SPECIFICATION PAS 2050: 2011 Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services.” *System*, 1–45. doi:978 0 580 71382 8.
- The Royal Society. 2010. “Climate Change: A Summary of the Science,” no. September: 16. doi:10.1108/17568691011089927.

- Thurston, Matthew, and Matthew J. Eckelman. 2011. "Assessing Greenhouse Gas Emissions from University Purchases." *International Journal of Sustainability in Higher Education* 12 (3): 225–35. doi:10.1108/14676371111148018.
- Treut, Le, R Somerville, U Cubasch, Y Ding, C Mauritzen, A Mokssit, T Peterson, et al. 2007. "Historical Overview of Climate Change Science." In *Earth*, Chapter 1:93–127. doi:10.1016/j.soilbio.2010.04.001.
- Trewartha, Glenn T. 1937. *AN INTRODUCTION TO WEATHER AND CLIMATE*.
- Turrini, Enrico. 1997. *Energía y Democracia*. La Habana: Cubasolar.
- Ulloa, H, García M, Pérez A, Meulenert, and Ávila D. 2011. "Clima Y Radiación Solar En Las Grandes Ciudades: Zona Metropolitana De Guadalajara (Estado De Jalisco, México)." *Investigaciones Geográficas* 56: 165–75.
- UNECE. 1994. "Copernicus Charter: The University Charter for Sustainable Development." Vol. 1994. <http://www.iisd.org/educate/declarat/coper.htm>.
- United-Nations. 1998. "Kyoto Protocol To the United Nations Framework Kyoto Protocol To the United Nations Framework." *Review of European Community and International Environmental Law* 7: 214–17. doi:10.1111/1467-9388.00150.
- Universidad de Guadalajara. 2017. *Estadística Institucional 2016-2017*. Guadalajara: UdeG.
- Var, Leucaena. 2013. "Secuestro de Carbono En La Biomasa Aérea de Un Sistema Agrosilvopastoril de Cocos Nucifera , Leucaena Leucocephala Var . Carbon Sequestration in Aboveground Biomass of an Agrosilvopastoral" 17 (1): 149–60.
- Vengoechea, A. 2012. "Las Cumbres de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático." *Friederich Ebert Stiftung*, 1–6.
- W. C. WANG, Y. L. YUNG, A. A. LACIS, T. MO, J. E. HANSEN. 1976. "Wang W, Yung L, Lacis A, Mo T, Hsen J. Greenhouse Effects Due to Man-Mad." *Science* 194 (4266): 685–90.
- Walther, G R, E Post, P Convey, A Menzel, C Parmesan, T J C Beebee, J M Fromentin, O

- Hoegh-Guldberg, and F Bairlein. 2002. "Ecological Responses to Recent Climate Change." *Nature* 416 (6879): 389–95. doi:10.1038/416389a.
- Wang, Chi-Tai, and Chui-Sheng Chiu. 2014. "Competitive Strategies for Taiwan's Semiconductor Industry in a New World Economy." *Technology in Society* 36. Elsevier Ltd: 60–73. doi:10.1016/j.techsoc.2013.12.002.
- Wazny, Marwa S Al. 2013. "Renewable Energy and Sustainable Development." *Energía Renovable y Desarrollo Sostenible*. 31 (1): 7–34. doi:10.4018/978-1-61350-138-2.ch003.
- WBCSD and WRI. 2005. "The GHG Protocol for Project Accounting," 148. doi:ISBN 1-56973-598-0.
- Weidema, Bo P., Mikkel Thrane, Per Christensen, Jannick Schmidt, and Søren Løkke. 2008. "Carbon Footprint: A Catalyst for Life Cycle Assessment?" *Journal of Industrial Ecology* 12 (1): 3–6. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x.
- Wiedmann, Thomas, and Jan Minx. 2007. "A Definition of ' Carbon Footprint.'" *Science* 1 (01): 1–11. doi:10.1088/978-0-750-31040-6.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), and World Resources Institute (WRI). 2004. *A Corporate Accounting and Reporting Standard. Greenhouse Gas Protocol*. doi:10.1196/annals.1439.003.
- Yañez, Sandoval Armando. 2004. "La Captura de Carbono En Bosques : ¿una Herramienta Para La Gestión Ambiental?" *Gaceta Ecológica*, no. 70: 5–18.
- Zhao, Linjia, Weihua Zeng, and Zengwei Yuan. 2015. "Reduction of Potential Greenhouse Gas Emissions of Room Air-Conditioner Refrigerants: A Life Cycle Carbon Footprint Analysis." *Journal of Cleaner Production* 100. Elsevier Ltd: 262–68. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.063.
- Zhou, P., and M. Wang. 2016. "Carbon Dioxide Emissions Allocation: A Review." *Ecological Economics* 125. Elsevier B.V.: 47–59. doi:10.1016/j.ecolecon.2016.03.001.