



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**Propuesta de Selección Metodológica para la Medición de la Huella de Carbono en el Uso
de las TIC**

Johan Andrés Perilla Hernández

**Universidad Santo Tomás de Aquino
Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones**

Bogotá, Colombia

2020

**Propuesta de Selección Metodológica para la Medición de la Huella de Carbono en el Uso
de las TIC**

Johan Andrés Perilla Hernández

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero de Telecomunicaciones

Director:

PhD (c) Ing. Gustavo Alonso Chica Pedraza

Universidad Santo Tomás de Aquino
Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones
Bogotá, Colombia
2020

Nota de Aceptación

Director

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 2020

Dedicatoria

A lo largo de este proceso (un poco accidentado) me encontré con muchas situaciones adversas en los diferentes ámbitos de mi vida personal y académica, logré sobreponerme gracias al apoyo desinteresado de varias personas; desde familiares, docentes y compañeros de universidad que me brindaron su apoyo en momentos en donde el aprendizaje y la toma de decisiones fueron vitales para mi continuidad logrando construir en mí la motivación suficiente que me permitió llegar hasta este punto. Esta fue una carrera que decidí emprender con una expectativa muy alta. Confié en el potencial que percibía y que percibieron los demás en mí, en mi capacidad intelectual que venía en crecimiento y en que las situaciones por solucionar serían una cuestión diaria. Este trabajo representa para mí la recopilación de conocimientos, las oportunidades laborales y una oportunidad excepcional para quedar en la historia. Este tipo de escenarios deja en mí una huella que en mi día a día procuraré impartir y aplicar tras los conocimientos obtenidos.

Dedico este logro académico a mi futuro, a mis padres que ya no están conmigo, a mis padres adoptivos y al esfuerzo realizado durante un poco más de 5 años.

Agradecimientos

Agradezco a mi alma mater, la universidad Santo Tomás por la oportunidad de haberme acogido como becario del programa ser pilo paga primera edición. Agradezco a los profesores de la facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones por todos los conocimientos impartidos. Agradezco en especial a mi señor padre (Q.E.P.D) por los esfuerzos hechos durante toda su vida para apoyarme en la manera en qué pudo para yo llegar a esta instancia, a mis tías Susana, Gloria y Andrea. Agradezco a los ingenieros Gustavo y Víctor por la comprensión y el apoyo en los momentos difíciles y a mis amigos y compañeros de la universidad con los cuales pude compartir este proceso académico de enriquecimiento mutuo.

Resumen

El trabajo investigativo recopilado en este documento propone a través de modelos matemáticos no jerárquicos (SCORING, CRITIC, PRESS, ENTROPIA) y del análisis de resultados de la aplicación de estos modelos identificar la metodología adecuada para las mediciones de carbono y gases de efecto invernadero generadas y/o derivadas del uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en Colombia para así seleccionar la mejor alternativa que permita armonizar los modelos, metodologías, herramientas y resultados asociados.

La identificación de los modelos matemáticos no jerárquicos se hace mediante la revisión y relación de fuentes bibliográficas de carácter académico para asociar y evaluar las metodologías desde el punto científico que rigen a nivel mundial para así considerar los criterios y variables que harán de niveles tales como: nivel técnico, económico, regulatorio, político y social.

La forma en cómo se escogen estos criterios está sujeta a la aplicación de modelos matemáticos que permiten calcular niveles cuantitativos de importancia, en escenarios donde hay pocos datos para la evaluación. Del mismo modo, los métodos se someten a escenarios para encontrar la relevancia de las variables y/o criterios encontrados. Los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos matemáticos no jerárquicos (SCORING, CRITIC, PRESS, ENTROPIA) permiten la selección de la metodología GHG Protocol de forma concluyente para armonizar la forma de medir la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia.

PALABRAS CLAVES: Huella de carbono, Modelos matemáticos no jerárquicos, metodologías, SCORING, CRITIC, PRESS, ENTROPIA.

ABSTRACT

The research work compiled in this document proposes, through non-hierarchical mathematical models (SCORING, CRITIC, PRESS, ENTROPIA) and the analysis of results from the application of these models, to identify the appropriate methodology for measuring carbon and greenhouse gases generated and/or derived from the use of Information and Communication Technologies (ICT) in Colombia in order to select the best alternative that will allow the harmonization of models, methodologies, tools and associated results.

The identification of non-hierarchical mathematical models is done through the review and listing of academic bibliographic sources to associate and evaluate methodologies from the scientific point of view that govern the world in order to consider the criteria and variables that will make levels such as: technical, economic, regulatory, political and social level.

The way these criteria are chosen is subject to the application of mathematical models that allow calculating quantitative levels of importance, in scenarios where there are few data for evaluation. Similarly, the methods are subjected to scenarios to find the relevance of the variables and/or criteria found. The results obtained after the application of these 4 methods allowed finding the selection of the GHG Protocol methodology as a tool used for measuring the carbon footprint in the use of ICTs in Colombia.

KEY WORDS: Carbon Footprint, Models, mathematical non-hierarchical, methodologies, SCORING, CRITIC, PRESS, ENTROPIA.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	8
Abstract.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABLAS.....	13
Introducción.....	15
1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO	17
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.2 ALCANCE	17
1.3 METODOLOGIA.....	18
2 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA LITERATURA CIENTÍFICA	20
2.1 IDENTIFICACIÓN EN LITERATURA CIENTÍFICA	20
2.1.1 GREENHOUSE GAS PROTOCOL	20
2.1.2 BILAN CARBONE – Balance de Carbono	26
2.1.3 PAS 2050.....	33
2.1.4 PAS 2060.....	35
2.1.5 MC3 – MÉTODO COMPUESTO DE LAS CUENTAS CONTABLES.....	37
2.1.6 CARROT.....	38
2.1.7 CARBONE IMPACT	38
2.1.8 EMISSIONS LOGIC	39
2.1.9 CARBON MANAGEMENT	39
2.1.10 GREENHOUSE GAS SUITE	39
2.1.11 GEMS	40
2.1.12 GRIP	40
2.1.13 CO2 NAVIGATOR.....	40
2.1.14 SOFIEM.....	41

2.1.15	CARBON VIEW.....	41
2.1.16	UMBERTO	41
2.2	CUADRO COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO.....	42
3	VARIABLES Y CRITERIOS PARA MINIMIZAR IMPLICACIONES	45
3.1	Criterio Técnico	45
3.2	Criterio Económico	46
3.3	Criterio Ambiental.....	46
3.4	Criterio Geopolítico.....	47
4	LOS MODELOS MATEMÁTICOS ANALÍTICOS NO JERARQUICOS.....	48
4.1	METODO SCORING.....	49
4.1.1	Aplicación del método Scoring	50
4.2	METODO ENTROPIA	55
4.2.1	APLICACIÓN DEL MÉTODO ENTROPIA	57
4.3	METODO CRITIC.....	61
4.3.1	APLICACIÓN DEL MÉTODO CRITIC	63
4.4	METODO PRESS	67
4.4.1	APLICACIÓN DEL MÉTODO PRESS	71
5	CONCLUSIONES.....	75
6	REFERENCIAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 – GHG Protocol	21
Ilustración 2 – Resumen de alcances y emisiones a través de la cadena de valor	22
Ilustración 3 – Procesos en GHG Protocol	23
Ilustración 4 – Portada del Estándar de objetivos de mitigación	24
Ilustración 5 – Portada del Estándar de política y acción	24
Ilustración 6 – Países con programas de GHG Protocol.....	25
Ilustración 7 – Portada estándar Bilan Carbone.....	26
Ilustración 8 – Procesos en Bilan Carbone	28
Ilustración 9 – Diagrama de flujo para adopción de medidas para fomentar una economía circular	29
Ilustración 10 – Diagrama de las categorías de emisión, que constituyen el ámbito operacional de una organización, a lo largo de toda la vida útil del producto.....	30
Ilustración 11 - Huella de carbono presentado en ECA	31
Ilustración 12 – Calculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero	33
Ilustración 13 – Fases del proceso en la norma PAS 2050.....	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Cuadro Comparativo de Metodología	43
Tabla 2 - Matriz de decisión.....	48
Tabla 3 - Criterios de la Selección	50
Tabla 4 - Valores de las alternativas evaluadas en cada criterio.....	51
Tabla 5 - Matriz de decisión.....	52
Tabla 6 - Valor en que cada alternativa satisface a cada criterio	53
Tabla 7 - Score total	54
Tabla 8 - Cálculo del Log10 del valor normalizado de cada alternativa evaluada en cada criterio	57
Tabla 9 - Cálculo del Log10 del valor normalizado de cada alternativa evaluada en cada criterio	58
Tabla 10 - Cálculo del entropy rate, diversidad y diversidad normalizada.....	58
Tabla 11 - Cálculo del entropy rate, diversidad y diversidad normalizada.....	59
Tabla 12 - Cálculo de prioridad global	60
Tabla 13 - Valores normalizados por el Rango.....	63
Tabla 14 - Valores normalizados por el Rango.....	64
Tabla 15 - Cálculo de los coeficientes de correlación	65
Tabla 16 - Normalización de los Pesos	66
Tabla 17 - Cálculo de la prioridad global.....	66
Tabla 18 - Matriz de valoración	67
Tabla 19 - Matriz de valoración (normalizada).....	68
Tabla 20 - Matriz de dominación	69
Tabla 21 - Matriz de dominación	72
Tabla 22 - Matriz de dominación con valores positivos.....	73
Tabla 23 - Cálculo de d_i y D_i	74
Tabla 24 - Cálculo del Índice PRESS	74

Introducción

El desarrollo de este trabajo está enmarcado en un proyecto de investigación FODEIN 2019, perteneciente a la Universidad Santo Tomás, el cual cuenta con el asesoramiento de docentes de la Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones y la participación de estudiantes de pregrado y posgrado de la Facultad. Este proyecto de investigación nace desde el año 2019 con el fin de generar una propuesta metodológica viable para la medición de la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia, involucrando activamente el sector de las telecomunicaciones con el fin de minimizar el impacto que se realiza sobre el medio ambiente promoviendo el uso de buenas prácticas en el proceso.

Con el desarrollo de la tecnología y la 'necesidad' de estar conectado se ha creado una demanda y por ello la producción a gran escala busca cubrir y a su vez preparar la creación de más mercado sin medir en primeras instancias las afectaciones que esto puede acarrear para la sociedad y en mayor medida al medio ambiente. Sin embargo, los consumidores, productores y comerciantes han sido actores para que la huella de carbono relacionada con las TIC siga en expansión en países que buscan alcanzar metas propias de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Del mismo modo, con la creación de compromisos internacionales como Kioto y procesos voluntarios de medición, se establecieron mecanismos y metodologías para la reducción y hasta neutralización de la huella de carbono de productos, eventos, territorios y empresas. Así mismo, las compañías, deberían llegar a ser neutros en carbono, para esto algunas requieren cambios en sus políticas de responsabilidad social e implemente tecnologías más amigables con el medio ambiente y con los usuarios finales y así lograr la disminución del riesgo ambiental con elementos como baterías, pilas, cargadores u otros que llegasen a afectar el medio ambiente, por eso es necesario el uso de energías renovables y equipos más sostenibles orientados a las buenas prácticas. De acuerdo a lo anterior, las iniciativas y los procesos de medición deben ser revisados porque a través de estos se busca la reducción de la huella de carbono y así seleccionar la metodología que esté acorde al caso colombiano.

Siguiendo esto, en América Latina, hay países que han decidido reducir la huella de carbono, como es el caso de Brasil, el cual sigue los lineamientos de la lucha contra el cambio climático del Plan Nacional sobre el cambio climático. México por su parte, diseñó e implementó el Programa Especial de Cambio Climático. Chile, busca definir y aplicar un procedimiento metodológico de cálculo de la huella de carbono, así mismo, identificar y priorizar alternativas

técnicas para reducir el consumo energético y las emisiones de GEI en el ciclo de vida de los productos. En América Latina, se observa que existen muchas iniciativas para medir y asimismo reducir la huella de carbono, las cuales se han orientado y basado en las metodologías Europeas y Estadounidenses, sin embargo, aún no se ha identificado una que logre abarcar el mercado y los productos latinoamericanos.

La metodología con la cual se busca lograr una propuesta viable está definida de la siguiente manera: En el capítulo uno se enmarca el trabajo mediante la descripción del título, los objetivos, el alcance y la metodología del proyecto para la identificación de las metodologías de medición de la huella de carbono a nivel bibliográfico, modelos matemáticos y establecimiento de las variables y criterios que servirán para la armonización para medir la huella de carbono en las TIC. El capítulo dos, se hace una revisión desde el punto de vista de la literatura científica para concentrar metodologías asociadas a la medición de la huella de carbono siendo estas las más recomendadas y/o usadas por varias empresas para generar sus reportes. El capítulo tres, se explican las variables y criterios relacionados con las metodologías descritas en el capítulo dos. El capítulo cuatro, recopila el marco conceptual de los modelos matemáticos analíticos no jerárquicos que permiten calcular los niveles cuantitativos de importancia en escenarios donde hay pocos datos para evaluar variables y/o criterios. En el capítulo cinco, se realiza la aplicación y análisis de los modelos matemáticos del capítulo cuatro. Finalmente, en el capítulo seis se muestran las conclusiones del trabajo y la propuesta seleccionada.

1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO

En este capítulo se muestran los objetivos, el alcance y la metodología del proyecto para la identificación de las metodologías de medición de la huella de carbono a nivel bibliográfico, modelos matemáticos y establecimiento de las variables y criterios que servirán para la armonización para medir la huella de carbono en las TIC.

1.1 OBJETIVOS

Seleccionar la mejor alternativa que permita armonizar la forma de medir la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia, aplicando métodos matemáticos analíticos no jerárquicos existentes.

- Definir desde el punto de vista de la literatura, el estado actual de las metodologías utilizadas para la medición de huella de carbono.
- Establecer las variables y/o criterios que se deben tener en cuenta desde el punto de vista técnico, económico, regulatorio, político y social, para minimizar las implicaciones que pueda generar el proceso de armonización de la forma de medir la huella de Carbono en el uso de las TIC en Colombia teniendo en cuenta casos similares en el mundo.
- Identificar los métodos matemáticos analíticos que hay en la actualidad, para calcular niveles cuantitativos de importancia, en escenarios donde hay pocos datos evaluar variables y/o criterios.
- Comparar la aplicación de los métodos matemáticos identificados, utilizando las variables y/o criterios establecidos, para encontrar los pesos de las variables y/o criterios establecidos.
- Seleccionar la mejor alternativa que permita armonizar la forma de medir la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia, aplicando los métodos matemáticos no jerárquicos identificados.

1.2 ALCANCE

Este trabajo busca a través de modelos matemáticos no jerárquicos (SCORING, CRITIC, ENTROPÍA, PRESS) identificar la metodología adecuada para mediciones de carbono derivadas

del uso de las TIC en Colombia para así seleccionar la mejor alternativa que permita armonizar los modelos matemáticos asociados.

1.3 METODOLOGIA

La metodología prevista para abordar la identificación de los modelos matemáticos no jerárquicos de medición de la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia se explica a continuación:

Etapa 1: Identificación de bibliografía para revisión de fuentes bibliográficas en bases de datos con la finalidad de depurar los documentos a nivel académico, que estén relacionados con la forma de medir la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia a nivel técnico, económico, regulatorio, político y social. Para realizar esta etapa se requieren las siguientes actividades:

- a. Identificación de documentos en literatura científica.
- b. Identificación de variables y/o criterios a nivel técnico, económico, regulatorio, político y social
- c. Documentación.

Etapa 2: Revisión bibliográfica para identificar modelos matemáticos analíticos que permitan calcular niveles cuantitativos de importancia, en escenarios donde hay pocos datos para evaluar variables y/o criterios. Para realizar esta etapa se requieren las siguientes actividades:

- a. Identificación de documentos en literatura científica.
- b. Identificación de modelos matemáticos.
- c. Entendimiento de los modelos matemáticos.
- d. Documentación.

Etapa 3: Comparación y aplicación de los métodos: a partir de la información recopilada en la etapa 2, se aplicarán los métodos identificados para encontrar la relevancia de las variables y/o criterios encontrados en la etapa 1. Para realizar esta etapa se requieren las siguientes actividades:

- a. Definición de escenarios para la evaluación de los métodos.
- b. Aplicación de los métodos matemáticos.
- c. Evaluación de los resultados.
- d. Comparación de los resultados de los métodos aplicados.
- e. Documentación.

Etapa 4: Seleccionar la mejor alternativa que permita armonizar la forma de medir la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia, aplicando los métodos matemáticos no jerárquicos identificados. Para realizar esta etapa se requieren las siguientes actividades:

- a. Aplicación del método SCORING
- b. Aplicación del método CRITIC.
- c. Aplicación del método ENTROPÍA.
- d. Aplicación del método PRESS.
- e. Comparación de los resultados de los métodos aplicados.
- f. Documentación.

2 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA LITERATURA CIENTÍFICA

En este capítulo se hace una revisión desde el punto de vista de la literatura científica para concentrar metodologías asociadas a la medición de la huella de carbono siendo estas las más recomendadas y/o usadas por varias empresas para generar sus reportes. Estas metodologías tienen su descripción correspondiente para su debida identificación.

2.1 IDENTIFICACIÓN EN LITERATURA CIENTÍFICA

Las metodologías son de diversa procedencia por lo que su información puede estar condicionada al momento de acceder a ella. Sin embargo, la información relevante se presenta en el cuadro comparativo de la Tabla 1.

A continuación, se presentan metodologías reconocidas y ampliadas para el ámbito de la medición de la huella de carbono y gases de efecto invernadero (GEI):

2.1.1 GREENHOUSE GAS PROTOCOL

El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol) es una de las herramientas más utilizadas a nivel internacional para registro, medición e inventario de emisiones [1]. En la Ilustración 1 se muestra el logo con el que se identifica esta metodología:



GREENHOUSE GAS PROTOCOL

Ilustración 1 – GHG Protocol

Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) es una alianza que apoya al sector público y privado con marcos globales para la gestión y medición estandarizada para las operaciones de mitigación de gases de efecto invernadero [2]. GHG Protocol comprende dos estándares distintos: Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y Estándar de Cuantificación de Proyectos del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero [3].

- Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI: guía para las diferentes empresas interesadas en cuantificar y reportar sus emisiones de GEI [3].
- Estándar de Cuantificación de Proyectos del Protocolo de GEI: guía para la cuantificación y reducción de emisiones de GEI en proyectos específicos [3].

GHG Protocol sacó una guía metodológica para el cálculo de emisiones en toda la cadena de valor para ayudar a las empresas a medir su exposición ante riesgos climáticos y aumentar su eficiencia en la cadena de suministros en la Ilustración 2 se realiza un resumen de la cadena de valor en diferentes escenarios por los que podría pasar empresas a nivel general y cómo cada uno de estos escenarios se identifica como un alcance en donde se identifican las emisiones como directas o indirectas.

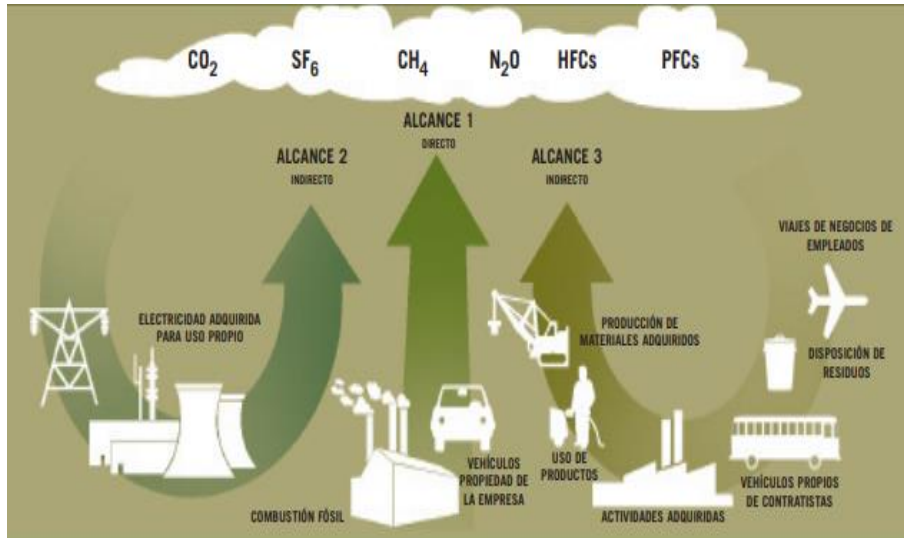


Ilustración 2 – Resumen de alcances y emisiones a través de la cadena de valor

Los informes de GHG Protocol sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI) se fundamentan en los siguientes principios [3] [4]:

- **Consistencia:** Usa metodologías que permiten comparar las emisiones y registrar de forma transparente los cambios que se presenten en cualquier factor relevante en una serie de tiempo.
- **Integridad:** Abarca todas las actividades y fuentes de emisión de GEI que se incluyen en los reportes. La exclusión de cualquier factor se debe justificar.
- **Transparencia:** Realiza seguimientos basados en auditoría transparente lo cual permite revelar los supuestos de importancia con referencia a las metodologías de contabilidad y cálculo, al igual que las fuentes de información utilizadas.
- **Precisión:** Consolida la cuantificación de emisiones de GEI ante posibles errores de evaluación con respecto a emisiones reales y procura reducir la incertidumbre lo máximo posible y así adquirir confianza de la plenitud de la información reportada.
- **Relevancia:** Garantiza que las mediciones de GEI de una empresa en los que intervienen usuarios internos y externos evidencien de manera oportuna el objetivo al momento de la toma de decisiones.

Estándar: El estándar de GHG Protocol proporciona requisitos y orienta a las organizaciones que preparan reportes de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel corporativo. Además, establece

una norma para siete gases de efecto invernadero los cuales están cubiertos en el protocolo Kioto: Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PCF), hexafluoruro de azufre (SF₆) y trifluoruro de nitrógeno (NF₃) [5].

En la Ilustración 3 se muestra el marco metodológico con el que GHG Protocol ayuda a las empresas a que la recopilación de los datos de las emisiones de gases de efecto invernadero pasen por una serie de pasos que permitirán visualizar de manera más real y precisa aquel escenario en el que se encuentra la empresa con el fin de tomar decisiones para la mitigación de estas emisiones.

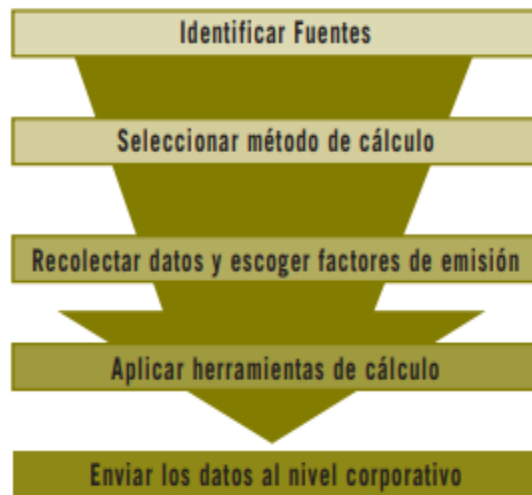


Ilustración 3 – Procesos en GHG Protocol

En una publicación realizada a finales de 2011, se ajustó el estándar para el Alcance 3 o Fuente 3, esta fuente o alcance está asociada a aquellas emisiones que no son propias de la empresa y que están asociadas a actividades terciarias como la adquisición de bienes, eliminación de productos y viajes de personal. Sobre esta base, el GHG Protocol ha realizado la publicación de los estándares presentados en la Ilustración 4 y 5 para que a las empresas les resulte más sencillo completar los inventarios relacionados con el alcance 3.



Ilustración 4 – Portada del Estándar de objetivos de mitigación



Ilustración 5 – Portada del Estándar de política y acción

Herramientas de cálculo: Establece diferentes herramientas de cálculo las cuales son [6]:

- Herramientas intersectoriales: Aplicable a empresas de cualquier sector industrial.
- Herramientas específicas para cada país: Acorde para países en desarrollo.
- Herramientas específicas del sector: Aplicable a sectores específicos industriales con disposición para diferentes situaciones.
- Herramientas para los países y las ciudades: Aplicable para objetivos climáticos en seguimiento.

2.1.2 BILAN CARBONE – Balance de Carbono

Es una solución metodológica y operativa para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Bilan Carbone establece un estándar de excelencia en la medición y cálculo de los GEI en organizaciones, proyectos o eventos [11]. El método Bilan Carbone es también una herramienta de gestión ambiental, que sirve como guía y recurso de apoyo para diferentes organizaciones y entes que están desarrollando su plan de acción de transición climática y energética [11]. Bilan Carbone ha sido desarrollado para la Agencia Francesa de Medio Ambiente y Gestión de la Energía (ADEME) [12] [13] [14].

En la Ilustración 7 se muestra la portada del estándar de Bilan Carbone Versión 8, la cual presenta modificaciones con respecto a versiones anteriores y es una versión reciente según su año de publicación que fue en el 2017. Esta versión está promovida por la Asociación Bilan Carbone (ABC) la cual se asegura de la mejora continua a través de planes de acción.



Ilustración 7 – Portada estándar Bilan Carbone

Los informes de Bilan Carbone sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI) se fundamentan en los siguientes principios [11]:

- Enfoque: Los procesos están centrados en las necesidades
- Precisión: El margen de error y la incertidumbre se mantienen al mínimo.
- Integridad: El inventario busca abarcar la gama más amplia posible de emisiones.
- Relevancia: El inventario examina las categorías de las emisiones que son relevantes para la organización.
- Transparencia: El inventario debe ser suficientemente claro para permitir la adopción de decisiones informadas.
- Verificación: El inventario debe producir resultados verificables.

Asimismo, Bilan Carbone permite a los usuarios realizar un análisis estratégico de sus emisiones de GEI. En este sentido, la metodología incorpora los siguientes principios [11]:

- Estrategia de bajo-carbono: El proceso introduce dentro de la estrategia de la organización el concepto de reducción de emisiones.
- Visión a largo plazo: El proceso ayuda para la transición de la organización a una economía con emisiones de carbono más bajas.
- Anticipación: El proceso alienta a los usuarios a anticiparse a los cambios que se avecinan y a sus consecuencias en las operaciones de la organización, debido en particular a la vulnerabilidad al cambio climático y a los factores de dependencia energética.
- Pragmatismo: El proceso requiere un enfoque pragmático de los resultados que no siempre son los que se esperaba inicialmente.
-

Estándar: En la Ilustración 8 se muestra el proceso de Bilan Carbone. Sin embargo, los escenarios por los cuales tiene que pasar serán descritos a continuación [11]:

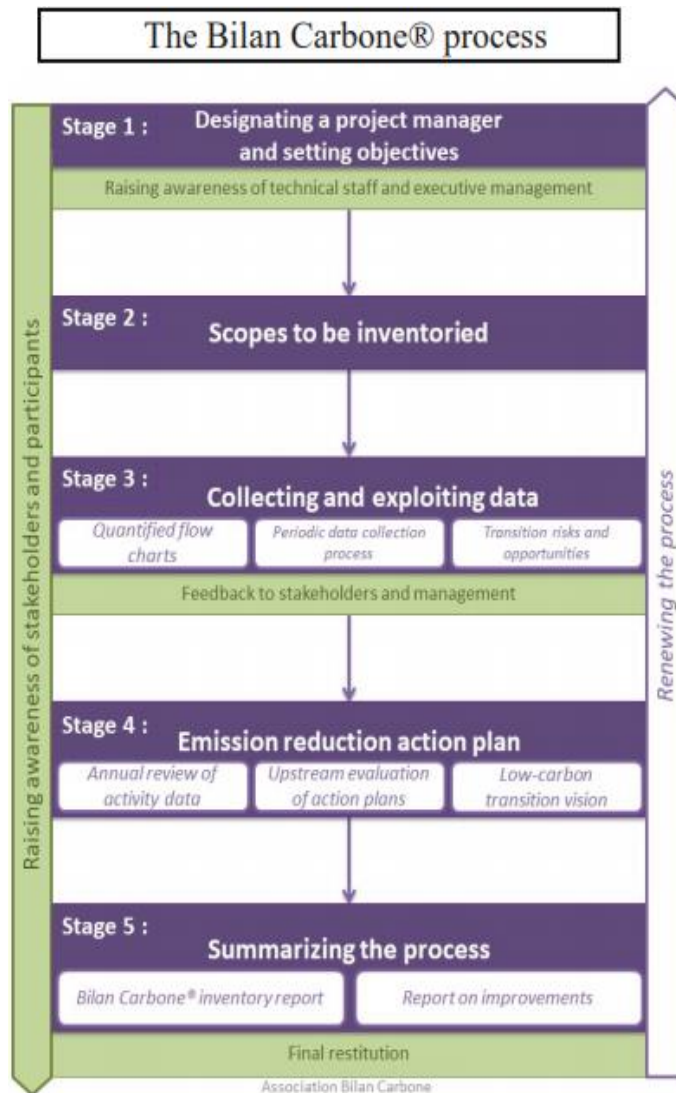


Ilustración 8 – Procesos en Bilan Carbone

Etapa 1: Designación de un director de proyecto y establecimiento de objetivos

El proceso de Bilan Carbone requiere, en primer lugar, que la dirección de la organización se comprometa a determinar y redactar sus objetivos y a nombrar a una persona que dirija y “posea” el proceso de evaluación. En la Ilustración 9 se presente un diagrama de flujo para la adopción de medidas para fomentar una economía circular que va desde el proceso inicial de manufactura hasta la disposición de desechos y productos que trabaje la organización.

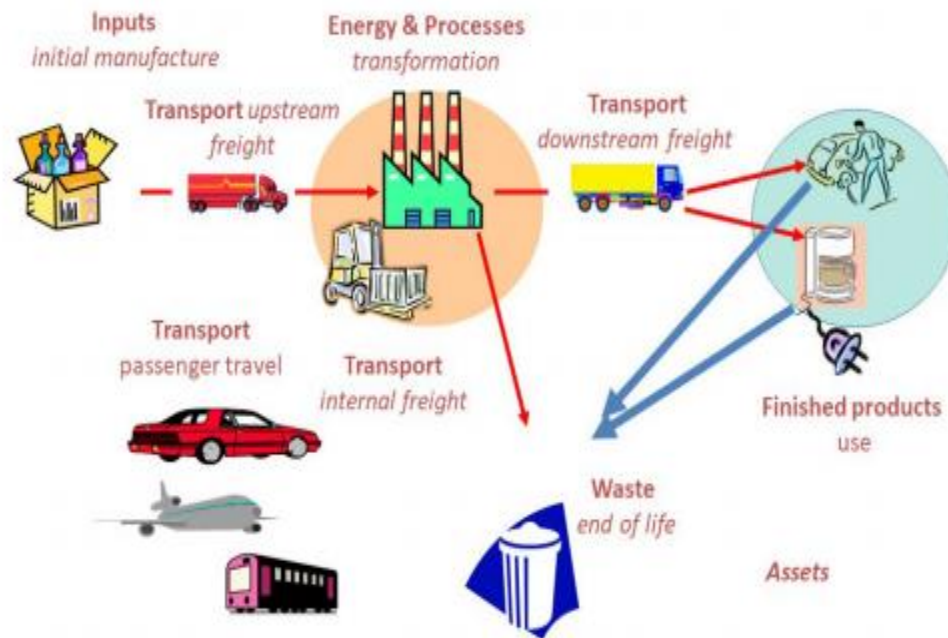


Ilustración 9 – Diagrama de flujo para adopción de medidas para fomentar una economía circular

Etapas 2: Alcances a ser inventariados y determinación de los límites del inventario

La organización debe en primer lugar trazar un mapa de las corrientes de energía, materias primas, desechos, insumos y productos que se incluirán en el proceso de contabilidad de las emisiones.

El ámbito de la organización se refiere a todos los sitios e instalaciones de la organización que van a ser evaluados.

El ámbito operacional se refiere a todas las emisiones directas e indirectas generadas por la actividad de la organización que se incluirán en la evaluación. En la Ilustración 10 se muestra las diferentes emisiones presentes en el ámbito operacional de una organización.

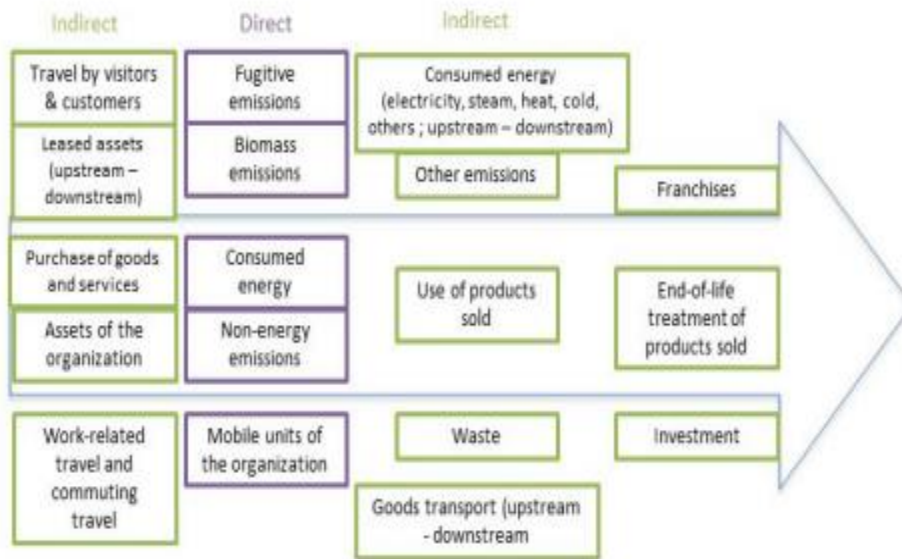


Ilustración 10 – Diagrama de las categorías de emisión, que constituyen el ámbito operacional de una organización, a lo largo de toda la vida útil del producto.

El plazo del inventario de Bilan Carbone es el período considerado para la contabilidad, normalmente un año, para reflejar mejor la actividad de la organización en su totalidad. También se puede realizar un inventario para un período específico, por ejemplo, el marco temporal, por ejemplo, el marco temporal de un evento o proyecto, con el fin de tomar una decisión concreta.

Etapa 3: Recopilación y explotación de datos

El director del proyecto Bilan Carbone compila una lista de todos los datos, internos y externos a la organización, que serán necesarios para calcular las emisiones para los alcances de la evaluación. Además, establece un procedimiento de recopilación de datos para actualizar periódicamente los cálculos y revisar las medidas de reducción de las emisiones. Cuantificando las corrientes trazadas utilizando los datos de actividad recopilados.

Las unidades de los datos se convierten en unidades equivalentes de CO₂. Las emisiones se calculan y agrupan por categorías. Un análisis inicial revela las categorías que requieren una acción inmediata. Si la organización ha realizado una evaluación anterior, este análisis incluye una comparación con los resultados anteriores. Además, se determinan los riesgos y oportunidades en áreas específicas, dependiendo de las necesidades y objetivos de la

organización; por ejemplo, la dependencia energética, la futura obligación de pagar impuestos sobre el carbono, la imagen pública, etc.

La retroalimentación inicial del proceso de Bilan Carbone, las primeras cifras y las perspectivas de acción de alta prioridad en materia de emisiones se presentan a los comités técnicos y luego a la dirección ejecutiva para su revisión. Las medidas tomadas se presentan en estas revisiones y los comités que participan en la planificación de la acción para la siguiente etapa.

Etapa 4: Plan de acción para la reducción de las emisiones

Después del examen inicial se redactan recomendaciones y uno o más planes de acción. Los indicadores se eligen para vigilar las medidas de reducción de las emisiones.

Etapa 5: Resumir el proceso

Los resultados del proceso Bilan Carbone son un inventario cuantitativo de las emisiones de gases de efecto invernadero de la organización, declarado por categoría de emisión dentro de los alcances considerados, y al menos un plan de acción para hacer frente a estas emisiones, junto con los indicadores asociados para la acción de seguimiento. El plan de acción basado en el inventario incluye al menos una medida destinada a mejorar el proceso.



Ilustración 11 - Huella de carbono presentado en ECA

En la Ilustración 11 se muestran los gases que son considerados por el método Bilan Carbone que están en el protocolo de Kioto. Además, considera otros gases que no están considerados en el protocolo de Kioto tales como los CFCs y los vapores arrojados por la aviación a nivel estratosférico.

Herramientas de cálculo [12]:

Se compone de dos versiones

- **Negocios:** Se aplica para las valoraciones de emisiones relacionadas a las actividades del sector industrial.
- **Autoridades locales:** Se compone por dos módulos, el de “activos y servicios” para las emisiones relacionadas con actividades de administración, y el de “territorio” que relaciona las actividades (industrial, residencial, agricultura, servicios, etc.) en el territorio gestionado por la autoridad local.

Su base está en hojas de cálculo de Excel las cuales a partir del ingreso de datos calculan las emisiones según los datos de actividad de los sectores antes citados [12]:

- **Hoja maestra:** Realiza el cálculo de emisiones y la comparación de valores de emisión entre diferentes años. Además, permite evaluar diversas acciones de reducción.
- **Primera herramienta:** Permite calcular las toneladas de emisiones por kilómetro recorrido en la industria del transporte terrestre.
- **Segunda herramienta:** Permite calcular las emisiones de gases refrigerantes provenientes de fugas de máquinas de refrigeración y aires acondicionados.
- **Tercera herramienta:** Permite usar los resultados de la hoja maestra en procesos de simulación en función del cambio de variables “como el incremento en el precio de los combustibles o la implementación de impuestos sobre las emisiones de GEI”.
- **Software con una cuantificación por estimación.**
- **Emisiones de GEI = datos de actividad x factor de emisión correspondiente**
Coherencia, Precisión, Integridad, Relevancia, Transparencia, Verificación. En la Ilustración 12 se muestra el cálculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero.



Ilustración 12 – Cálculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Año de Implementación: Implementado en 2004 a nivel nacional (Francia) y en 2011 a nivel internacional [10] [13] [14].

Países participantes: Francia y países asociados al Acuerdo de París [13] [14].

Compatibilidad con otros programas de GEI (GHG): Compatible con GHG Protocol, ISO 14064/14065, GEI40 y demás programas que utilizan el Protocolo Kioto [10] [13] [14].

2.1.3 PAS 2050

PAS 2050 es una especificación para la verificación de la huella de carbono y la evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de productos y servicios de BSI (British Standards Institution) para uso público, en su elaboración han participado diversos expertos de la administración pública británica, de organizaciones empresariales, así como expertos procedentes de organizaciones internacionales y del British Standards Institution [15] [16].

PAS 2050 diferencia 2 tipos de ciclos de vida, en función del tipo de producto [15]:

- Business to Business, cuando el ciclo de vida considerado del producto finaliza con la entrega del mismo a otra organización para que lo utilice en la elaboración de otro producto.
- Business to Customer, cuando se considera el ciclo de vida completo del producto, incluidas las actividades posteriores a la entrega del producto al cliente/usuario.

Las emisiones deben medirse en masa y convertirse a emisiones de CO2 utilizando los últimos coeficientes de conversión IPCC disponibles. Además, el periodo a considerar para el análisis de ciclo de vida debe ser de 100 años.

Las actividades que propone PAS 2050 son:

- Convertir los datos primarios y secundarios en emisiones GEI.
- Transformar las emisiones de GEI a emisiones de CO2 equivalente.
- Deducir el carbono almacenado asociado al producto.
- Expresar los datos por unidad funcional de producto.
- Contabilizar contribuciones menores (de materias primas o actividades) excluidas.

La metodología y herramientas específicas para su cálculo están basadas en las normas ISO 14064-14069. La Ilustración 13 muestra el proceso a seguir, el cual se realiza de forma exhaustiva, analizando y estudiando cada una de sus fases: medición, reducción, compensación, verificación y comunicación [17].

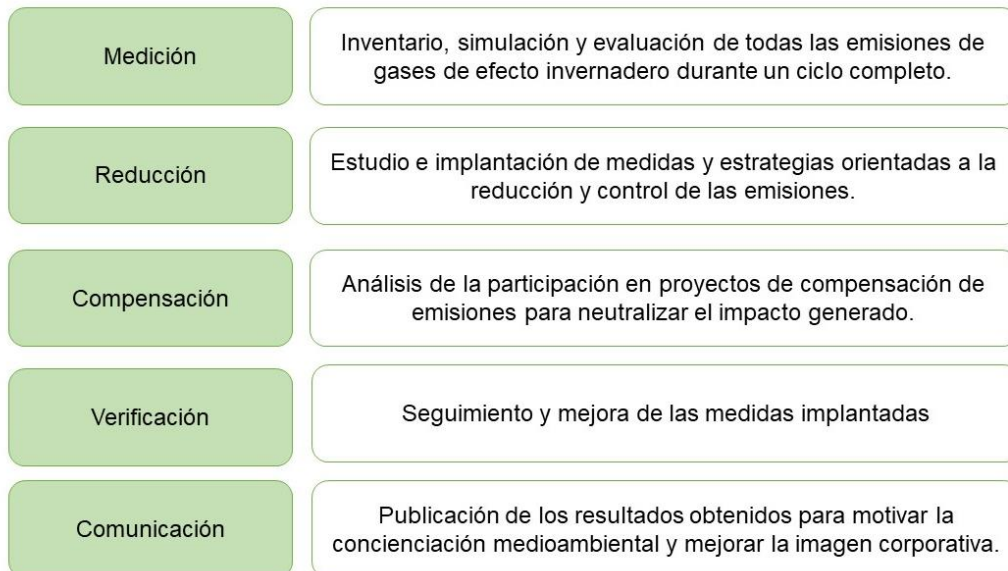


Ilustración 13 – Fases del proceso en la norma PAS 2050

PAS 2050 no difiere en gran medida de otros estándares internacionales, de hecho, se basa en los requerimientos de normas como [15] [18]:

- ISO 14021 Etiquetas y declaraciones ambientales.
- ISO 14025 Etiquetas y declaraciones ambientales. Principios y procedimientos.

- ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y guía.
- ISO/TS 14048 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Modelo de documentación de los datos.
- ISO 14064-1 Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con guía a nivel organizativo para la cuantificación e informe de las emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero.

Otros datos de interés:

Año de Implementación: Implementado en el año 2007 [15] [19].

Países participantes: Países que conforman el Reino Unido [15] [19] .

Desarrollador: British Standard Institute [15] [19].

2.1.4 PAS 2060

Esta metodología creada por el Instituto de Británico de Estandarización (BSI) es un estándar que busca lograr que las declaraciones de las organizaciones sobre la neutralidad de las emisiones de CO₂ sean correctas [20] [21].

Es una estrategia contra el cambio climático esencial para los gobiernos y para la industria; puesto que, al implantar medidas eficaces para mitigar el cambio climático, resulta fundamental contar con la capacidad de distinguir entre las declaraciones falsas y reales sobre Neutralidad en Carbono [19] [21].

PAS 2060 proporciona orientación sobre la manera de cuantificar, reducir y compensar las emisiones de GEI sobre una materia específica, incluidas las actividades, productos, servicios, edificios, proyectos y territorios [20].

Herramientas de cálculo:

- Carbono neutral (3.5) a la condición por la cual no hay incremento neto en las emisiones globales de GEI a la atmósfera como resultado de las emisiones de GEI asociadas a un objeto [19] [21].

- Compensación de carbono (3.7), hace referencia a la reducción discreta de las emisiones de GEI no procedentes del objeto en cuestión, disponible en forma de créditos de carbono y utilizada para contrarrestar emisiones del objeto en cuestión
- Validación (3.29) sugiere comprobar o probar la veracidad de una reclamación de conformidad con PAS 2060.

PAS 2060 se basa en los siguientes principios para su desarrollo y aplicación [22]:

- Definir los límites y documentarlos.
- Los datos que vayan a ser utilizados deben ser propiamente de las actividades que ejecute la empresa, de no ser así se establece la razón y la alternativa que será comparable.
- Minimización de incertidumbre.
- Para la cuantificación de las emisiones se debe garantizar que estos cálculos son verídicos y en su totalidad deben ser tomados de publicaciones nacionales.
- Para la conversión de factores de GEI a CO₂ se deben seguir los lineamientos del IPCC y de las entidades nacionales del medio ambiente.
- Los resultados deben darse en toneladas de CO₂.

En el proceso metodológico PAS 2060 propone las siguientes estrategias:

- Elegir el proceso en el que se requiere controlar los niveles de emisión.
- Aplicar alguna metodología para los registros del nivel de emisión.
- Generar y aplicar un plan de acción asociado a la huella de carbono. Allí se debe representar los objetivos y planes que busquen mitigar las emisiones de GEI.
- Realizar proyectos para la mitigación de la huella de carbono.
- Generar el reporte de emisiones encontradas con la metodología usada, esto con el fin de realizar proyectos con mecanismos de mitigación.

Es de vital importancia realizar un seguimiento y control debido a que si se presenta cualquier variación esta debe aparecer en el informe final, al igual que las emisiones mitigadas y las razones de las emisiones que no pudieron mitigar. Sin embargo, la metodología seleccionada el proceso debe ser la misma en cada una de las etapas, desde el comienzo de conteo de emisiones, hasta para los parámetros del reporte final.

Para lograr la certificación de neutralidad la empresa debe cumplir con los requerimientos con base en la declaración de neutralidad establecida.

Tipos de Declaración:

- Declaración de Compromiso: Se debe documentar los planes y estrategias que se llevaran a cabo, así como el tipo de metodología que será usada con el fin de que la empresa al alcanzar la neutralidad entre las emisiones emitidas y mitigadas pueda evidenciarlo en el informe final.
- Declaración de consecución: Es un compromiso que adquiere la empresa para la continuación y ejecución de planes y estrategias de mitigación en donde se logre siempre la neutralidad de emisiones de manera periódica y esta debe ser renovada cada año y estará firmado por la máxima autoridad de la empresa.

Otros datos de interés

Año de Implementación: Se implementó en 2010 [19] [21].

Países participantes: Países que conforman el Reino Unido [19] [21].

Desarrollador: Desarrollado por British Standard Institute [10] [19] [21].

2.1.5 MC3 – MÉTODO COMPUESTO DE LAS CUENTAS CONTABLES

Es un método que cuenta con dos versiones, este método en la versión 2.0 presenta modificaciones de las secciones y se agregan nuevas categorías con respecto al original [23]. MC3 considera la compra de todo tipo de bienes y servicios, la ocupación del espacio y la generación de residuos [23]. Es un método que permite la fluidez de la información de una organización a otra sin necesidad de contar con la colaboración de clientes o proveedores debido a que la información se acumula progresivamente y el estudio se limita siempre a una única entidad lo cual permite el ecoetiquetado de la organización y de sus productos o servicios con la misma metodología [24].

Herramientas de cálculo: Se basa en 20 hojas de una plantilla de cálculo en Excel [23]. En la primera hoja incluye una guía de uso de la plantilla de cálculo para comprender cómo se consideran los aportes a la huella de carbono. La segunda hoja de cálculo de la planilla orienta sobre los datos que se deben actualizar para el caso de estudio. Se consideran precios variables de combustibles, indicadores de sostenibilidad y factores de rendimiento, equivalencia y

absorción de CO₂ para terrenos y agua [23]. La hoja principal es la hoja tres, allí se deben ingresar los datos específicos o actualizar otros. El resto de las hojas contienen información relacionada para el cálculo de la huella de carbono y en una hoja aparte llamada “out” aparecen los resultados finales expresados en diferentes formas, entre ellas la huella de carbono en ton. de CO₂/año [23].

Otros datos de interés:

- Año de Implementación: A partir del año 2004 [24].
- Países participantes: España [24].
- Desarrollador: Desarrollado por Doménech y demás colaboradores [24].

2.1.6 CARROT

Es un método que busca ayudar empresas y organizaciones en fijar un año de referencia para la realización de gases de efecto invernadero (GEI) y proponer soluciones de reducción [10]. Utiliza factores de emisión y factores de conversión con el fin de lograr mejor consistencia y comparabilidad en el uso de energía eléctrica (kWh) o gas natural (MMBtu). Los usuarios deben ingresar los datos asociados al uso de las diferentes fuentes de energía para que CARROT puede calcular a las emisiones de GEI. Además, a través del acceso web se permite el uso simultáneo de cualquier número de usuarios en todos los lugares conectados. El año de implementación de esta metodología fue en el 2007 por el Estado de California en EEUU.

Datos de interés [10]:

- Herramientas de cálculo: Software en línea basado en GHG Protocol.
- Países participantes: Estados Unidos.
- Desarrollador: Estado de California bajo un estatuto público.

2.1.7 CARBONE IMPACT

Es una herramienta interactiva en línea orientada a la industria del transporte de carga para medir y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [25]. Para el desarrollo del cálculo de las emisiones se realizan comparaciones en tres criterios claves: Emisión de CO₂ generada en el transporte, duración del transporte y el impuesto potencialmente pagado. [25]

Datos importantes [10] [25]:

- Año de Implementación: A partir de enero de 2006.
- Países participantes: Francia y países de la unión europea.

- Desarrollador: Inotti bajo un estatuto privado.

2.1.8 EMISSIONS LOGIC

Emissions Logic es una metodología que tiene facilidad de integración con respecto a otros estándares por eso su herramienta de cálculo permite generar un inventario de GEI con adaptación a distintos estándares [26]. Por su facilidad de integración, considera los gases prescritos por el protocolo de Kioto.

Otros datos:

- Año de Implementación: No específica.
- Países participantes: No específica.
- Desarrollador: Carbonsim PTY Ltd bajo un estatuto privado [10].

2.1.9 CARBON MANAGEMENT

Carbon Management es una metodología que busca otorgar facilidad a organizaciones que requieren en gran medida transportar combustibles y demás productos asociados a envíos. Por esto la herramienta permite generar un Inventario e identificar aquellas emisiones que deben incluirse en los planes de reducción [10] [26].

Otros datos importantes:

- Año de Implementación: No específica.
- Países participantes: Francia [10]
- Desarrollador: Carbon Trust bajo un estatuto público [10]. Modelo para el cálculo de los combustibles de transporte 'LCA (Evaluación del ciclo de vida) [26].

2.1.10 GREENHOUSE GAS SUITE

Greenhouse Gas Suite es una metodología que a través de su herramienta de cálculo permite al usuario tener la posibilidad de gestionar y generar un inventario a través de 'bolsas' de carbono [10] [26]. Esta clase de 'bolsas' de carbono permite clasificar o asociar ciertos gases de efecto invernadero para llevar de cierta manera las emisiones bajo una misma medida.

Otros datos:

- Año de Implementación: No específica.

- Países participantes: No específica.
- Desarrollador: Environmental Software Providers bajo un estatuto privado [10].

2.1.11 GEMS

Se centraliza en el análisis del potencial y capacidad de un país o región para emprender, se focaliza en las actitudes y percepciones de la población como actividad [26]. Las herramientas de cálculo permiten hacer un inventario a través de software en línea con esquemas de reducción [10]. Esta metodología está especializada para el sector del petróleo y lleva una implementación desde el año 1997 [26]. Debido a que muchos países tienen empresas relacionadas con el sector del petróleo, presenta una alta acogida en la mayoría de naciones que son participes activamente de esta industria.

Datos importantes:

- Año de Implementación: A partir de 1997 [26].
- Países participantes: 80 países [27].
- Desarrollador: ICF International bajo un estatuto privado [10].

2.1.12 GRIP

Greenhouse Gas Regional Inventory Project es un software interactivo en el cual se pueden debatir temas relacionados con el uso de la energía [28] [29]. Cuenta con la participación de los países que conforman la Unión Europea pero el mayor aporte se ha visto de parte del Reino Unido y de Inglaterra al este mantener esa metodología bajo un régimen público.

Datos importantes:

- Países participantes: Inglaterra y la Unión Europea [28].
- Desarrollador: UK Environment Agency y Tyndall Centre bajo un régimen público [10].

2.1.13 CO2 NAVIGATOR

Es un servicio en línea de un Proveedor de Servicios de Aplicación (ASP) para empresas que están bajo legislación japonesa [30]. Su implementación se inicia en el año 2006. Las herramientas de cálculo permiten calcular emisiones de seis tipos de gases de efecto invernadero prescritos por el Protocolo de Kioto [30] y controla la capacidad de logro para el proceso de gestión ambiental.

Otros datos importantes:

- Países participantes: Japón y empresas de países que adquieran el software con licencia.
- Compatibilidad con otros programas de GEI (GHG): Permite la medición de 6 gases prescritos en el Protocolo Kioto [30].
- Desarrollador: NTT Data Corporation bajo un estatuto privado [10].

2.1.14 SOFIEM

SOFIEM es una metodología desarrollada bajo un estatuto privado debido a que su implementación está principalmente asociada a las entidades financieras y recursos de capital. La herramienta de cálculo que presenta esta metodología es una herramienta de monitoreo financiero de emisiones con software en línea [26].

Otros datos:

- Año de Implementación: No específica.
- Países participantes: No específica.
- Desarrollador: PE International bajo un estatuto privado [10].

2.1.15 CARBON VIEW

Es una herramienta a nivel de software con bases de datos para el monitoreo de organizaciones con estrategias implementadas para la reducción de emisiones [31]. La herramienta de cálculo de esta metodología permite hacer el inventario, monitoreo y gestión financiera de la aplicación de las estrategias y planes de acción en la organización para tomar decisiones y llevar todos estos datos de forma online [26].

Otros datos importantes:

- Año de Implementación: Su lanzamiento en Estados Unidos fue en 2007 [31].
- Países participantes: Estados Unidos y empresas de países que adquieran el software con licencia.
- Desarrollador: Supply Chain Consulting bajo un estatuto privado [10].

2.1.16 UMBERTO

Es una herramienta a nivel de software que cuenta con diferentes versiones las cuales están sujetas a una licencia y su uso es principalmente para soluciones a nivel de análisis de flujos de materiales y de ingeniería sostenible con base en focos de emisiones. [32].

Herramientas de cálculo: Umberto tiene varias herramientas a nivel de software las cuales son [33]: Umberto NXT Efficiency, Umberto NXT LCA, Umberto NXT Universal, Umberto NXT CO2

- Umberto NXT Efficiency: Permite crear flujos de energía e identificar factores de los procesos de un sistema de producción.
- Umberto NXT LCA: Software para Análisis de Ciclo de Vida y modelos gráficos del ciclo de vida un producto.
- Umberto NXT Universal: Permite mejorar la eficiencia ecológica de productos y procesos de fabricación con base en perspectivas ambientales y de costos.
- Umberto NXT CO2: Determina el impacto climático producido por empresas y productos.

Otros datos importantes:

- Año de Implementación: Su implementación se inicia en el año 1998 hasta la actualidad [34].
- Países participantes: Alemania y empresas de países que adquieran el software con licencia.
- Compatibilidad con otros programas de GEI (GHG): Es compatible con GHG Protocol, ISO 14067, PAS 2050 [35]. Además, teniendo en cuenta todas sus versiones es compatible con todos los programas [10].
- Desarrollador: Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH bajo un estatuto privado [10].

2.2 CUADRO COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO

El siguiente cuadro comparativo Tabla 1 complementa la información de las metodologías más relevantes y con aplicación actual que se usan para la medición de la huella de carbono. Además, brinda información sobre qué territorios estas metodologías se pueden escalar y si las metodologías alcanzan las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero. Se resalta que tanto este cuadro comparativo, como la identificación de variables específicas del capítulo siguiente, fueron trabajados de forma conjunta con lo realizado en [22], teniendo en cuenta que ambos trabajos se enmarcan bajo el mismo objetivo de estudio, al estar enmarcados en un proyecto de investigación FODEIN 2019, perteneciente a la Universidad Santo Tomás.

3 VARIABLES Y CRITERIOS PARA MINIMIZAR IMPLICACIONES

En este capítulo se explicarán las variables y criterios relacionados con las metodologías descritas anteriormente. Para ello las metodologías de medición fueron expuestas y en algunos casos sintetizadas debido a que algunas no se encuentran en bibliografía científica y en ocasiones ciertas características no son especificadas tras el barrido de consulta. Sin embargo, al tener analogías entre metodologías se permite reunir información y/o versiones con base en sus herramientas de cálculo, software, funciones y desarrolladores.

A continuación, se explican los criterios y subcriterios seleccionados para minimizar implicaciones al momento de considerar las metodologías adecuadas:

3.1 Criterio Técnico

En este criterio se agrupan los aspectos técnicos y tecnológicos para el uso de las metodologías de medición, y para ello las características asociadas a las emisiones y gases relacionados con GEI se presentan como subcriterios [26] [22].

- **Gases incluidos:** En este subcriterio se consideran los gases con los cuales las diferentes metodologías soportan para hacer cálculos, estos gases resultan de las diferentes exposiciones, estudios y estándares que intervienen en el cálculo de la huella de carbono.
- **Emisiones de GEI:** Este subcriterio se consideran las emisiones de GEI resultado de diferentes interacciones y procesos. Por eso se dividen en:
 - **Emisiones directas:** Estas emisiones son resultado de procesos directos en procesos de fabricación, producción, despliegue de productos y servicios en general. Por ejemplo, el uso de combustibles para la funcionalidad de la organización. En resumen, son emisiones que son originales de la organización y que pueden llegar a ser controladas por esta [36].
 - **Emisiones indirectas:** Estas emisiones son resultado de procesos externos o adicionales para los cuales las organizaciones recurren para el desarrollo de las actividades y fluidez de los procesos. Por ejemplo, el uso de la electricidad, desprendimiento de calor y transporte de materiales. En resumen, son emisiones consecuencia de otras organizaciones [36].
- **Facilidad de comprensión técnica:** Este subcriterio permite durante el proceso de medición y aplicación de las metodologías, lograr que los valores evidencien información

importante con respecto a cómo el uso de las metodologías aporta al estudio y su uso permite dar valores reales.

- **Modelo matemático para medición:** Este subcriterio está sujeto a los métodos y metodologías y considera los factores necesarios para los cálculos de la huella de carbono. Es una expresión matemática que cumple con condiciones para la representación de relaciones entre variables, parámetros, restricciones y resultados [37].
- **Relación con las telecomunicaciones:** Este subcriterio direcciona la investigación y el estudio de la huella de carbono hacia las telecomunicaciones y en cómo estas aplicaciones tienen un escenario tecnológico que debe ser tratado ante la gran problemática que pasa el planeta por desechos, emisiones y cadenas de valor de esta industria.

3.2 Criterio Económico

En este criterio se cubren los aspectos económicos que implica adquirir las diferentes herramientas a nivel tecnológico. Las variables pertenecientes a este criterio dan un estimado promedio en términos de la inversión que un usuario deberá realizar. Las variables consideradas son [26] [22]:

- **Software:** Este subcriterio considera el medio digital con el cual se busca gestionar grandes cantidades de datos para la aplicación de las metodologías.
- **Licencia:** Este subcriterio considera los permisos que requiere un usuario para utilizar un software o medio digital teniendo en cuenta el tipo de licencia y el costo de la misma.
- **Guía para el usuario:** Este subcriterio considera la información útil para el usuario en el momento de explorar y establecer los recursos digitales y físicos.

3.3 Criterio Ambiental

En este criterio se consideran los impactos medio ambientales que son consecuencia de diversos factores y de los gases de efecto invernadero y en cómo las metodologías utilizan esta información para sus cálculos [26] [22]:

- **Función de recomendación de reducción:** Este subcriterio relaciona la cantidad de emisiones y en cómo estas emisiones son sometidas a procesos de disminución para la evaluación de la reducción de la huella de carbono en función del criterio ambiental.

- **Función de recomendación de compensación:** Este subcriterio evalúa la afectación de los recursos naturales con metodologías que consideran las diferentes actividades de la cadena de producción y distribución de las organizaciones y en cómo se puede disminuir y equilibrar la incidencia de estos impactos en los diferentes escenarios naturales.
- **Consideración de otros impactos ambientales:** No se excluye la contaminación de cuerpos de agua, erosión de la tierra, radiación, concentración de gases, desechos artificiales y afectaciones a la fauna y flora.

3.4 Criterio Geopolítico

En este criterio se consideran los espacios políticos en los cuales una metodología tiene cabida y aceptación por parte de entidades, organizaciones y/o empresas que están sujetos a normas y acuerdos para minimizar los riesgos y las consecuencias. Para ello es necesario tener las mediciones asociadas para los diferentes escenarios de la sociedad y de la industria. Tiene 3 subcriterios [26] [22]:

- **Ámbito global:** Se especifica si es explícito para un país, para una serie de países u organizaciones internacionales con acuerdos ya definidos y aceptados con metodologías que permitan tener una visión real de sus emisiones de gases de efecto invernadero y en cómo las diferentes industrias asumen la responsabilidad social en las organizaciones.
- **Aplicabilidad:** Este subcriterio considera la cobertura en donde la medición de la huella de carbono tiene importancia. Para ello se analizan tres escenarios:

Sitio: Es un lugar específico, dentro de las organizaciones puede ser una fábrica y a nivel social pueden ser comunidades, ciudades, pueblos o corregimientos.

Territorio: Puede ser un país u organización con todas sus sedes a nivel nacional o internacional.

Producto: Es el resultado de los procesos previos de desarrollo y producción y se considera principalmente porque este reúne todas las actividades y su huella de carbono se calcula a través de cada etapa de producción.

- **Relación con el Protocolo de Kioto:** El protocolo de Kioto es la base con la que las metodologías consideran aquellos gases que son utilizados en los procesos de medición de la huella de carbono.

4 LOS MODELOS MATEMÁTICOS ANALÍTICOS NO JERARQUICOS

En este capítulo hay una recopilación de modelos matemáticos analíticos que permiten calcular los niveles cuantitativos de importancia en escenarios donde hay pocos datos para evaluar variables y/o criterios. Las variables y/o criterios tienen un punto de vista técnico, económico, regulatorio, político y social.

Los métodos a abordar son: SCORING, ENTROPÍA, CRITIC Y PRESS, los cuales por lo general buscan la forma de evaluar alternativas según los criterios que se hayan definido, a través de una matriz de decisión, como se muestra en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2 - Matriz de decisión

ALTERNATIVA	CRITERIO A	CRITERIO B	CRITERIO C	W (PESO)
1	X_{1A}	X_{1B}	X_{1C}	W_1
2	X_{2A}	X_{2B}	X_{2C}	W_2
3	X_{3A}	X_{3B}	X_{3C}	W_3
4	X_{4A}	X_{4B}	X_{4C}	W_4
5	X_{5A}	X_{5B}	X_{5C}	W_5
6	X_{PA}	X_{PB}	X_{PC}	W_6

Para este caso en particular, se tienen 6 alternativas de las cuales conocemos tres criterios (criterio A, criterio B, criterio C). La decisión dependerá de las ponderaciones realizadas por cada uno de los métodos, los cuales tienen particularidades especialmente para encontrar el peso de cada uno de los criterios que hacen parte de la decisión a tomar. A continuación, se explican las características principales de cada uno de los métodos y su correspondiente aplicación para seleccionar la metodología para la medición de la huella de carbono en el uso de las TIC.

4.1 METODO SCORING

El método de Ponderación Lineal (Scoring) permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. “Si se tienen varios criterios con diferentes escalas, se requiere un proceso previo de normalización para que pueda efectuarse la suma de las contribuciones de cada uno de los atributos” [38]. Usa una función de valor para cada una de las alternativas y supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad [39].

El método Scoring es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones [39]. Debe tomarse en cuenta que, sin embargo, el orden obtenido con este método no es independiente del procedimiento de normalización aplicado [38].

El método Scoring propone una serie de etapas con el fin de identificar de manera rápida y sencilla la alternativa preferible en un problema de decisión multicriterio [39]:

- 1 Identificar la meta general del problema.
- 2 Identificar las alternativas.
- 3 Listar los criterios a emplear en la toma de decisión.
- 4 Asignar valores
- 5 Asignar una ponderación para cada uno de los criterios.
- 6 Establecer en cuanto satisface cada alternativa a nivel de cada uno de los criterios.
- 7 Calcular el Score para cada una de las alternativas. La alternativa con el Score más alto representa la alternativa a recomendar.

Modelo para calcular el Score

La Ecuación 1 permite calcular el score:

$$S_j = \sum_i w_i r_{ij}$$

Ecuación 1

Donde:

r_{ij} = rating de la Alternativa j en función del criterio i

w_i = ponderación para Criterio i

S_j = Score para la Alternativa j.

4.1.1 Aplicación del método Scoring

1. Identificar la meta general del problema: La selección de la metodología para la medición de la huella de carbono en el uso de las TIC.
2. Identificar las alternativas: Las alternativas fueron las seleccionadas en el capítulo anterior y son: GHG, Bilan Carbone, PAS 2050, PAS 2060 y MC3.
3. Listar los criterios a emplear en la toma de decisión: Los criterios fueron los establecidos en el capítulo anterior y se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3 - Criterios de la Selección

CRITERIOS	
Tecnológico	Gases Incluidos
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones
	Facilidad de comprensión técnica
	Propone matemáticamente un modelo de medición
Económico	Licencia
	Guía para el usuario
Ambiental	Función de recomendación de reducción
	Función de recomendación de compensación
Geopolítico	Se específica para un país
	Aplicabilidad Sitio
	Aplicabilidad Territorio
	Aplicabilidad Producto
	Relación con el protocolo de Kioto

4. Asignar valores de las alternativas en cada criterio:

Tabla 4 - Valores de las alternativas evaluadas en cada criterio

NIVELES / CRITERIOS		METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN				
		GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3
Tecnológico	Gases Incluidos	0,188	0,188	0,281	0,281	0,063
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	0,280	0,240	0,120	0,120	0,240
	Facilidad de comprensión técnica	0,308	0,308	0,115	0,115	0,154
	Propone matemáticamente un modelo de medición	0,450	0,400	0,050	0,050	0,050
Económico	Licencia	0,310	0,310	0,310	0,034	0,034
	Guía para el usuario	0,310	0,310	0,310	0,034	0,034
Ambiental	Función de recomendación de reducción	0,167	0,042	0,042	0,375	0,375
	Función de recomendación de compensación	0,077	0,077	0,077	0,692	0,077
Geopolítico	Se específica para un país	0,257	0,114	0,257	0,257	0,114
	Aplicabilidad Sitio	0,243	0,243	0,027	0,243	0,243
	Aplicabilidad Territorio	0,243	0,243	0,027	0,243	0,243
	Aplicabilidad Producto	0,310	0,310	0,310	0,034	0,034
	Relación con el protocolo de Kioto	0,265	0,265	0,206	0,206	0,059

Es de anotar, que los valores correspondientes a cada una de las alternativas, evaluadas en cada criterio son traídas de [22], en donde se utilizó el método analítico jerárquico para el mismo objeto de estudio que el propuesto en este trabajo.

5. Asignar una ponderación (Peso W) para cada uno de los criterios y completar la matriz de decisión:

Tabla 5 - Matriz de decisión

NIVELES / CRITERIOS		METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN					W
		GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3	
Tecnológico	Gases Incluidos	0,188	0,188	0,281	0,281	0,063	5
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	0,280	0,240	0,120	0,120	0,240	5
	Facilidad de comprensión técnica	0,308	0,308	0,115	0,115	0,154	5
	Propone matemáticamente un modelo de medición	0,450	0,400	0,050	0,050	0,050	4
Económico	Licencia	0,310	0,310	0,310	0,034	0,034	3
	Guía para el usuario	0,310	0,310	0,310	0,034	0,034	4
Ambiental	Función de recomendación de reducción	0,167	0,042	0,042	0,375	0,375	4
	Función de recomendación de compensación	0,077	0,077	0,077	0,692	0,077	4
Geopolítico	Se especifica para un país	0,257	0,114	0,257	0,257	0,114	3
	Aplicabilidad Sitio	0,243	0,243	0,027	0,243	0,243	3
	Aplicabilidad Territorio	0,243	0,243	0,027	0,243	0,243	3
	Aplicabilidad Producto	0,310	0,310	0,310	0,034	0,034	3
	Relación con el protocolo de Kioto	0,265	0,265	0,206	0,206	0,059	4

Tal como se aprecia en la Tabla 5, la columna W, corresponde a los pesos otorgados por los expertos a cada uno de los criterios. Es de anotar, que estos valores fueron concertados por consenso entre ellos, utilizando el método Delphi con tres rondas ejecutadas satisfactoriamente.

6. Establecer en cuanto satisface cada alternativa a nivel de cada uno de los criterios.

Tabla 6 - Valor en que cada alternativa satisface a cada criterio

NIVELES / CRITERIOS		METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN				
		GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3
Tecnológico	Gases Incluidos	0,940	0,940	1,405	1,405	0,315
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	1,400	1,200	0,600	0,600	1,200
	Facilidad de comprensión técnica	1,540	1,540	0,575	0,575	0,770
	Propone matemáticamente un modelo de medición	1,800	1,600	0,200	0,200	0,200
Económico	Licencia	0,930	0,930	0,930	0,102	0,102
	Guía para el usuario	1,240	1,240	1,240	0,136	0,136
Ambiental	Función de recomendación de reducción	0,668	0,168	0,168	1,500	1,500
	Función de recomendación de compensación	0,308	0,308	0,308	2,768	0,308
Geopolítico	Se específica para un país	0,771	0,342	0,771	0,771	0,342
	Aplicabilidad Sitio	0,729	0,729	0,081	0,729	0,729
	Aplicabilidad Territorio	0,729	0,729	0,081	0,729	0,729
	Aplicabilidad Producto	0,930	0,930	0,930	0,102	0,102
	Relación con el protocolo de Kioto	1,060	1,060	0,824	0,824	0,236

La Tabla 6 muestra el valor que corresponde a multiplicar la columna W de la Tabla 5 por cada uno de los valores de las alternativas evaluadas en cada uno de los criterios también de la Tabla 5. Como ejemplo se puede apreciar el primer valor de la esquina superior izquierda, donde se encuentra la alternativa GHG y el criterio “gases incluidos”. Al multiplicar el valor $0.188 \times 5 = 0.940$, que es el valor mostrado en la misma ubicación de la Tabla 6.

7. Calcular el Score para cada una de las alternativas. La alternativa con el Score más alto representa la alternativa a recomendar.

Tabla 7 - Score total

NIVELES / CRITERIOS		METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN				
		GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3
Tecnológico	Gases Incluidos	0,940	0,940	1,405	1,405	0,315
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	1,400	1,200	0,600	0,600	1,200
	Facilidad de comprensión técnica	1,540	1,540	0,575	0,575	0,770
	Propone matemáticamente un modelo de medición	1,800	1,600	0,200	0,200	0,200
Económico	Licencia	0,930	0,930	0,930	0,102	0,102
	Guía para el usuario	1,240	1,240	1,240	0,136	0,136
Ambiental	Función de recomendación de reducción	0,668	0,168	0,168	1,500	1,500
	Función de recomendación de compensación	0,308	0,308	0,308	2,768	0,308
Geopolítico	Se especifica para un país	0,771	0,342	0,771	0,771	0,342
	Aplicabilidad Sitio	0,729	0,729	0,081	0,729	0,729
	Aplicabilidad Territorio	0,729	0,729	0,081	0,729	0,729
	Aplicabilidad Producto	0,930	0,930	0,930	0,102	0,102
	Relación con el protocolo de Kioto	1,060	1,060	0,824	0,824	0,236
		13,045	11,716	8,113	10,441	6,669

Tal como se aprecia en la Tabla 7, se hace la sumatoria por columnas, y se encuentra el valor total del método Scoring. Se aprecia con suficiencia que la alternativa mejor valorada es GHG con un valor de 13,045, seguida por Bilan Carbone con un valor de 11,716 y a su vez por PAS 2060, PAS 2050 y MC3, con valores de 10.441, 8.113 y 6.669, respectivamente.

4.2 METODO ENTROPIA

El término entropía tiene su significado dependiendo del campo de su aplicación. Por ejemplo, en la física implica el nivel de desorden en un sistema, y en los modelos de transporte muestra la dispersión de los viajes entre dos lugares [40]. Para algunas aplicaciones o eventos cuantifica el grado de aleatoriedad o la falta de claridad [40].

En el MCDM, la entropía se relaciona con el grado de diversidad dentro de un conjunto de datos de atributos [40]. Cuanto menor sea la entropía dentro de los datos asociados a un atributo, mayor será el poder de discriminación del atributo en cuanto a cambiar rangos de las alternativas. Cuanto mayor sea el grado de diversidad, mayor será el peso de ese atributo.

Este método fue propuesto como un método objetivo de cálculos de los pesos de los criterios por parte del autor Zeleny en 1982. Parte del supuesto de que un criterio j "la importancia relativa del criterio j en una situación dada de decisión, medida por su peso W_j está directamente relacionado con la cantidad de información intrínsecamente aportada por el conjunto de las alternativas respecto a dicho criterio. Más concretamente y refiriéndose siempre al criterio j en cuestión, cuando mayor diversidad haya en las evaluaciones (valores) de las alternativas, mayor importancia deberá tener dicho criterio en la decisión final, pues mayor poder de discriminación entre las alternativas posee" [41].

El objetivo es medir la Diversidad de un criterio y conceptualmente, se basa en la teoría de la información de Shannon, que introduce el concepto de entropía en un canal de información. Su aplicación es la siguiente:

Normalización

Se empieza por normalizar por la suma de los distintos valores de los criterios [42]. Dado que los datos medidos bajo diferentes criterios pueden ser de diferentes unidades o escalas, una matriz de decisión debería ser transformada primero en un espacio sin dimensiones a través de la Ecuación 2 [40]:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} ; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

Ecuación 2

donde x_{ij} es un elemento de la matriz de decisión correspondiente a la i -ésima alternativa y al criterio j -ésimo. m es el número total de alternativas, y n es el número de criterios [40].

Cálculo de la entropía (E) y del grado de diversidad (d_j)

El cálculo de la entropía del criterio E_j dentro de los conjuntos de datos de la matriz de decisión normalizada puede calcularse mediante la Ecuación 3 [40] y la Ecuación 4 [42]:

$$E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}$$

Ecuación 3

y

$$E_j = -K * \sum_i (a_{ij} * \log a_{ij})$$

Ecuación 4

Siendo:

$$k = \frac{1}{\log m}, \text{ y } m \text{ el número de alternativas.}$$

La entropía calculada es tanto mayor cuanto más similares son las a_{ij} consideradas. Para medir el grado de Diversidad, a partir de E_j , se calcula la diversidad con la Ecuación 5 [40] [42]:

$$d_j = 1 - E_j$$

Ecuación 5

Cálculo de la ponderación o pesos de los criterios:

Finalmente, el último paso es la normalización lineal de d_j para encontrar el peso relativo de cada criterio se usa la Ecuación 6 [40]:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_j d_j}$$

Ecuación 6

Siendo:

w_j = ponderación o peso de cada uno de los criterios.

4.2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO ENTROPIA

Teniendo en cuenta que los primeros 3 pasos del método Scoring, también se aplican a la entropía (objeto de estudio, identificación de criterios y alternativas) y que el proceso de normalización de los datos ya se encuentra realizado previamente en la tabla 4 (Ver que la suma de valores de la tabla 4 por fila es igual a uno), a continuación, se muestra el desarrollo del método de la entropía a partir del paso 5:

5. Encontrar el Log en base 10 del valor de cada una de las alternativas evaluadas en cada criterio:

Tabla 8 - Cálculo del Log_{10} del valor normalizado de cada alternativa evaluada en cada criterio

Log10(Alt_1)	Log10(Alt_2)	Log10(Alt_3)	Log10(Alt_4)	Log10(Alt_5)
-0,726	-0,726	-0,551	-0,551	-1,201
-0,553	-0,62	-0,921	-0,921	-0,62
-0,511	-0,511	-0,939	-0,939	-0,812
-0,347	-0,398	-1,301	-1,301	-1,301
-0,509	-0,509	-0,509	-1,469	-1,469
-0,509	-0,509	-0,509	-1,469	-1,469
-0,777	-1,377	-1,377	-0,426	-0,426
-1,114	-1,114	-1,114	-0,16	-1,114
-0,59	-0,943	-0,59	-0,59	-0,943
-0,614	-0,614	-1,569	-0,614	-0,614
-0,614	-0,614	-1,569	-0,614	-0,614
-0,509	-0,509	-0,509	-1,469	-1,469
-0,577	-0,577	-0,686	-0,686	-1,229

Tal como se aprecia en la tabla 8, a los valores normalizados de la Tabla 4, se les encuentra el Log_{10} . Como ejemplo, al valor de la esquina superior izquierda de la tabla 4 (0.188) se le encuentra el Log en base 10, esto es igual a: -0.726, valor que se aprecia en la Tabla 8 en la misma ubicación.

6. Multiplicar el valor obtenido en el paso 5 por el valor al que se le halló el Log en base 10:

Tabla 9 - Cálculo del Log₁₀ del valor normalizado de cada alternativa evaluada en cada criterio

Aij * Log10(Alt_1)	Aij * Log10(Alt_2)	Aij * Log10(Alt_3)	Aij * Log10(Alt_4)	Aij * Log10(Alt_5)	Sumatoria x Criterio
-0,136	-0,136	-0,155	-0,155	-0,076	-0,658
-0,155	-0,149	-0,110	-0,110	-0,149	-0,673
-0,158	-0,158	-0,108	-0,108	-0,125	-0,656
-0,156	-0,159	-0,065	-0,065	-0,065	-0,510
-0,158	-0,158	-0,158	-0,050	-0,050	-0,573
-0,158	-0,158	-0,158	-0,050	-0,050	-0,573
-0,130	-0,058	-0,058	-0,160	-0,160	-0,565
-0,086	-0,086	-0,086	-0,111	-0,086	-0,454
-0,152	-0,108	-0,152	-0,152	-0,108	-0,670
-0,149	-0,149	-0,042	-0,149	-0,149	-0,640
-0,149	-0,149	-0,042	-0,149	-0,149	-0,640
-0,158	-0,158	-0,158	-0,050	-0,050	-0,573
-0,153	-0,153	-0,141	-0,141	-0,073	-0,661

Al multiplicar el valor de 0.188 (valor de la esquina superior izquierda de la Tabla 4) x -0.726 (valor de la esquina superior izquierda de la Tabla 8, da como resultado el 0.136 que se encuentra en la misma posición de la Tabla 9.

7. Encontrar el entropy rate (ER), la diversidad y la diversidad normalizada: En este punto, se debe calcular K, como el 1/log del número de alternativas evaluadas, cuyo resultado es: 1.4306. después de esto, se debe multiplicar este valor por el resultado de la sumatoria por fila de la Tabla 9, encontrando el ER. Del mismo modo, se calcula la diversidad como 1- ER. Finalmente, se suman todos los valores obtenidos en la diversidad (Sumatoria de columna) y se normalizan estos valores, encontrando el valor de los pesos de los criterios. Estos resultados se pueden apreciar en la Tabla 10.

Tabla 10 - Cálculo del entropy rate, diversidad y diversidad normalizada

Entropy Rate ER	DIVERSIDAD (Dj)	Dj NORMALIZADA (PESOS)
0,942	0,058	0,033
0,963	0,037	0,021

0,939	0,061	0,034
0,730	0,270	0,152
0,820	0,180	0,102
0,820	0,180	0,102
0,808	0,192	0,108
0,649	0,351	0,198
0,959	0,041	0,023
0,915	0,085	0,048
0,915	0,085	0,048
0,820	0,180	0,102
0,946	0,054	0,031

Multiplicación de los pesos por los valores inicialmente normalizados: A los valores de la tabla 4 se les multiplica por el valor de la diversidad normalizada (pesos). Estos resultados se aprecian en la Tabla 11.

Tabla 11 - Cálculo del entropy rate, diversidad y diversidad normalizada

METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN				
GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3
0,006	0,006	0,009	0,009	0,002
0,006	0,005	0,002	0,002	0,005
0,011	0,011	0,004	0,004	0,005
0,068	0,061	0,008	0,008	0,008
0,031	0,031	0,031	0,003	0,003
0,031	0,031	0,031	0,003	0,003
0,018	0,005	0,005	0,040	0,040
0,015	0,015	0,015	0,137	0,015
0,006	0,003	0,006	0,006	0,003
0,012	0,012	0,001	0,012	0,012
0,012	0,012	0,001	0,012	0,012
0,031	0,031	0,031	0,003	0,003
0,008	0,008	0,006	0,006	0,002

Nuevamente se aprecia como el valor 0.188 (ver esquina superior izquierda de la tabla 4) x 0.033 (ver esquina superior izquierda de la tabla 10), da como resultado el 0.006 que se encuentra en la misma posición en la Tabla 11.

8. Cálculo de la prioridad global: Se hace la sumatoria por columna y se encuentra la alternativa que mayor valoración obtenga. Estos resultados se observan en la Tabla 12.

Tabla 12 - Cálculo de prioridad global

NIVELES / CRITERIOS		METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN				
		GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3
Tecnológico	Gases Incluidos	0,006	0,006	0,009	0,009	0,002
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	0,006	0,005	0,002	0,002	0,005
	Facilidad de comprensión técnica	0,011	0,011	0,004	0,004	0,005
	Propone matemáticamente un modelo de medición	0,068	0,061	0,008	0,008	0,008
Económico	Licencia	0,031	0,031	0,031	0,003	0,003
	Guía para el usuario	0,031	0,031	0,031	0,003	0,003
Ambiental	Función de recomendación de reducción	0,018	0,005	0,005	0,040	0,040
	Función de recomendación de compensación	0,015	0,015	0,015	0,137	0,015
Geopolítico	Se especifica para un país	0,006	0,003	0,006	0,006	0,003
	Aplicabilidad Sitio	0,012	0,012	0,001	0,012	0,012
	Aplicabilidad Territorio	0,012	0,012	0,001	0,012	0,012
	Aplicabilidad Producto	0,031	0,031	0,031	0,003	0,003
	Relación con el protocolo de Kioto	0,008	0,008	0,006	0,006	0,002
		0,256	0,231	0,152	0,246	0,114

Tal como se aprecia en la Tabla 12, la alternativa mejor valorada es GHG con un valor de 0.256, seguida por PAS 2060 con un valor de 0.246 y a su vez por Bilian Carbone, PAS 2050 y MC3, con valores de 0.231, 0.152 y 0.114, respectivamente.

4.3 METODO CRITIC

El método CRITIC es un método para la ayuda de toma de decisiones y su nombre es el acrónimo de su denominación en inglés Criteria Importance Through Intercriteria Correlation propuesta por los autores D. Diakoulaki, G. Mavrotas y L. Papayannakis en 1995 para la revista Computers Operation Research [42]. CRITIC es un método objetivo de la determinación de pesos de los criterios o variables, esta objetividad viene porque se determinan los pesos en función de la información de la matriz de decisión sin que influyan las preferencias de decisión cuantificando dos nociones fundamentales en la toma de decisiones multicriterio (MCDM): la intensidad de contraste y el carácter contradictorio de los criterios de evaluación [40].

En CRITIC, los pesos de los objetivos se miden exhaustivamente por la importancia del cambio y la alternancia entre los diferentes índices, lo cual es más científico y razonable. El análisis, que muestra el grado de diferencia de valor de todos los objetos bajo el mismo índice fue considerado por la desviación estándar y el conflicto entre criterios se midió por el coeficiente de correlación [40].

Cuanto mayor es la desviación estándar de un índice, más información tiene este índice [43]. Cuanto mayor sea el coeficiente de correlación de forma negativa entre dos diferentes índices, mayor es su conflicto. Esto muestra que la información reflejada de la evaluación tiene una mayor diferencia, y el peso de los dos índices debería ser mayores [43].

El método CRITIC como ayuda a la toma de decisiones “calcula el peso de los criterios (A,B,..) a partir del valor (X_{ij}) que las distintas alternativas (1, 2,..) tienen para cada criterio (Tabla 2)” [42]:

El método CRITIC anuncia en la Ecuación 7 que el peso de cada variable, peso de cada característica y el peso de cada criterio es igual a su desviación estándar multiplicada por la sumatoria de uno menos la correlación de un criterio con el resto de criterios [42]:

$$w_j = s_j * \sum(1 - r_{jk})$$

Ecuación 7

En la Ecuación 8 se muestra el mismo cálculo con una expresión más amplia:

$$w_{j,CRITIC} = \frac{\sum_{k=1}^n (1 - \beta R_{jk})}{\sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^n (1 - \beta R_{jk}))} ; j \text{ and } k = 1, 2, \dots, n$$

Ecuación 8

Siendo:

w_j = Peso o ponderación del criterio j

s_j = Desviación típica (estándar) del criterio j

r_{jk} = Coeficiente de correlación entre el criterio j y k

La función del signo β es igual a + 1 si los dos objetivos son del mismo tipo (ambos cuanto más altos mejor, o ambos cuanto más bajos mejor), de lo contrario $\beta = -1$.

Esto define la importancia de las alternativas en función de que cada criterio con gran desviación (sea muy variable) y que no esté correlacionado con los demás criterios. El cálculo de los parámetros como la desviación típica y el coeficiente de correlación se puede obtener de manera “sencilla” a través de hojas de cálculo de Excel.

La desviación estándar de cada criterio se obtiene aplicando la Ecuación 9 [42]:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Puede calcularse con la función DESVEST de Excel.

La Ecuación 10 que la fórmula de Coeficiente de correlación de Pearson permite cálculos de los distintos coeficientes de correlación entre los criterios:

$$r_{jk} = \frac{cov(j, k)}{s_j * s_k}$$

Ecuación 10

En la Ecuación 11 se muestra el mismo cálculo con una expresión más amplia:

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}}; (j \& k=1, \dots, n)$$

Ecuación 11

Si r_{jk} está cerca de valores +1 o -1 indica criterios altamente correlacionados, mientras que r_{jk} es igual a 0 indica que no hay correlación.

Puede calcularse utilizando la función Coeficiente de correlación en Datos, Asistente de funciones de Excel.

4.3.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO CRITIC

La aplicación del método CRITIC parte también de la aplicación de los primeros 4 pasos ya realizados para el método Scoring y Entropía, sin embargo, el método de normalización del paso 4 no es por el mayor como el realizado en la tabla 4, sino por el método del rango (valor a normalizar – el mínimo de los valores del mismo criterio / el valor máximo – el valor mínimo de los valores del mismo criterio evaluado). Los valores normalizados por el rango se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13 - Valores normalizados por el Rango

	Valores Normalizados por el rango				
	0,573	0,573	1	1	0
Gases Incluidos	0,573	0,573	1	1	0
Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	1	0,75	0	0	0,75
Facilidad de comprensión técnica	1	1	0	0	0,202
Propone matemáticamente un modelo de medición	1	0,875	0	0	0
Licencia	1	1	1	0	0
Guía para el usuario	1	1	1	0	0
Función de recomendación de reducción	0,375	0	0	1	1
Función de recomendación de compensación	0	0	0	1	0
Se especifica para un país	1	0	1	1	0
Aplicabilidad Sitio	1	1	0	1	1
Aplicabilidad Territorio	1	1	0	1	1
Aplicabilidad Producto	1	1	1	0	0
Relación con el protocolo de Kioto	1	1	0,714	0,714	0

5. Encontrar la desviación estándar por criterio: Se calcula la desviación estándar por cada uno de los criterios evaluados. Estos valores se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14 - Valores normalizados por el Rango

Desviación Estándar
0,411
0,468
0,517
0,515
0,548
0,548
0,503
0,447
0,548
0,447
0,447
0,548
0,409

6. Encontrar los coeficientes de correlación: Se calculan los coeficientes de correlación por cada uno de los criterios evaluados. Estos valores se encuentran en la Tabla 15.
7. Sumar los coeficientes de correlación y multiplicarlos por el valor de la desviación estándar (penúltima fila de la Tabla 15.)
8. Sumar los valores obtenidos en el paso anterior, encontrando los valores de los pesos sin normalizar. (última fila de la Tabla 15.)

Tabla 15 - Cálculo de los coeficientes de correlación

	Gases Incluidos	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	Facilidad de comprensión técnica	Propone matemáticamente un modelo de medición	Licencia	Guía para el usuario	Función de recomendación de reducción	Función de recomendación de compensación	Se especifica para un país	Aplicabilidad Sitio	Aplicabilidad Territorio	Aplicabilidad Producto	Relación con el protocolo de Kioto
Gases Incluidos	1,000	-0,740	-0,281	-0,124	0,287	0,287	-0,338	0,504	0,760	-0,504	-0,504	0,287	0,620
Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	-0,740	1,000	0,827	0,745	0,244	0,244	-0,066	-0,598	-0,488	0,598	0,598	0,244	0,048
Facilidad de comprensión técnica	-0,281	0,827	1,000	0,984	0,599	0,599	-0,450	-0,476	-0,283	0,476	0,476	0,599	0,579
Propone matemáticamente un modelo de medición	-0,124	0,745	0,984	1,000	0,664	0,664	-0,497	-0,407	-0,111	0,407	0,407	0,664	0,699
Licencia	0,287	0,244	0,599	0,664	1,000	1,000	-0,952	-0,612	0,167	-0,408	-0,408	1,000	0,733
Guía para el usuario	0,287	0,244	0,599	0,664	1,000	1,000	-0,952	-0,612	0,167	-0,408	-0,408	1,000	0,733
Función de recomendación de reducción	-0,338	-0,066	-0,450	-0,497	-0,952	-0,952	1,000	0,583	-0,045	0,528	0,528	-0,952	-0,655
Función de recomendación de compensación	0,504	-0,598	-0,476	-0,407	-0,612	-0,612	0,583	1,000	0,408	0,250	0,250	-0,612	0,038
Se especifica para un país	0,760	-0,488	-0,283	-0,111	0,167	0,167	-0,045	0,408	1,000	-0,408	-0,408	0,167	0,414
Aplicabilidad Sitio	-0,504	0,598	0,476	0,407	-0,408	-0,408	0,528	0,250	-0,408	1,000	1,000	-0,408	-0,038
Aplicabilidad Territorio	-0,504	0,598	0,476	0,407	-0,408	-0,408	0,528	0,250	-0,408	1,000	1,000	-0,408	-0,038
Aplicabilidad Producto	0,287	0,244	0,599	0,664	1,000	1,000	-0,952	-0,612	0,167	-0,408	-0,408	1,000	0,733
Relación con el protocolo de Kioto	0,620	0,048	0,579	0,699	0,733	0,733	-0,655	0,038	0,414	-0,038	-0,038	0,733	1,000
Desviación Estándar * Sumatoria de la Diferencia de Valores	4,833	4,838	4,322	4,073	5,306	5,306	7,682	5,941	6,387	4,882	4,882	5,306	3,327
Pesos (W) (Normalización por la Suma)	0,072	0,072	0,064	0,061	0,079	0,079	0,115	0,089	0,095	0,073	0,073	0,079	0,050

9. Encontrar los valores normalizados (Pesos Normalizados): Se realiza la normalización por la suma de los valores obtenidos en el paso 8, tal y como se aprecia en la Tabla 16.

Tabla 16 - Normalización de los Pesos

	Pesos (W) (Normalización por la Suma)
Gases Incluidos	0,072
Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	0,072
Facilidad de comprensión técnica	0,064
Propone matemáticamente un modelo de medición	0,061
Licencia	0,079
Guía para el usuario	0,079
Función de recomendación de reducción	0,115
Función de recomendación de compensación	0,089
Se especifica para un país	0,095
Aplicabilidad Sitio	0,073
Aplicabilidad Territorio	0,073
Aplicabilidad Producto	0,079
Relación con el protocolo de Kioto	0,050

10. Cálculo de la prioridad global: Los pesos normalizados se multiplican por los valores de la Tabla 13 y se obtiene la tabla 17. Finalmente se suman las columnas y se encuentra la alternativa que mayor valoración tenga.

Tabla 17 - Cálculo de la prioridad global

NIVELES / CRITERIOS		METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN				
		GHG PROTOCOL	BILAN CARBONE	PAS 2050	PAS 2060	MC3
Tecnológico	Gases Incluidos	0,014	0,014	0,020	0,020	0,005
	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	0,020	0,017	0,009	0,009	0,017
	Facilidad de comprensión técnica	0,020	0,020	0,007	0,007	0,010
	Propone matemáticamente un modelo de medición	0,027	0,024	0,003	0,003	0,003

Económico	Licencia	0,025	0,025	0,025	0,003	0,003
	Guía para el usuario	0,025	0,025	0,025	0,003	0,003
Ambiental	Función de recomendación de reducción	0,019	0,005	0,005	0,043	0,043
	Función de recomendación de compensación	0,007	0,007	0,007	0,061	0,007
Geopolítico	Se especifica para un país	0,024	0,011	0,024	0,024	0,011
	Aplicabilidad Sitio	0,018	0,018	0,002	0,018	0,018
	Aplicabilidad Territorio	0,018	0,018	0,002	0,018	0,018
	Aplicabilidad Producto	0,025	0,025	0,025	0,003	0,003
	Relación con el protocolo de Kioto	0,013	0,013	0,010	0,010	0,003
		0,253	0,220	0,163	0,222	0,142

Tal como se aprecia en la Tabla 17, la alternativa mejor valorada es GHG con un valor de 0.253, seguida por PAS 2060 con un valor de 0.222 y a su vez por Bilan Carbone, PAS 2050 y MC3, con valores de 0.220, 0.163 y 0.142, respectivamente.

4.4 METODO PRESS

El método PRES es un método para la ayuda de toma de decisiones y su nombre es el acrónimo de Programa de Evaluación de Proyectos Sociales [39]. Para la aplicación del método PRESS se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Encontrar las alternativas discretas
- Tener un caso general con N criterios y M alternativas
- Generar una matriz de valoración
- Generar matriz de dominación
- Calcular el índice PRESS

Matriz de valoración

Después de haber establecido los criterios y las alternativas se procede a generar la matriz de valoración la cual está representada en la Tabla 18:

Tabla 18 - Matriz de valoración

CRITERIO	C1	C2	(...)	C _j	(...)	C _N
PESO	P1	P2	...	P _j	...	P _N
ALT 1	G ₁ (1)	G ₂ (1)	...	G _j (1)	...	G _N (1)

(...)
ALT X	G ₁ (X)	G ₂ (X)	...	G _j (X)	...	G _N (X)
(...)
ALT M	G ₁ (M)	G ₂ (M)	...	G _j (M)	...	G _N (M)

Siendo:

P_j es el peso asignado por el decisor al criterio j = 1, 2, ..., N

G_j(X) es la valoración correspondiente a la alternativa según el criterio j, con X = 1, 2, ..., M

Para un correcto tratamiento de datos [39]:

Se normalizan los valores de los pesos de los criterios con la Ecuación 12:

$$p_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^N P_j}$$

Ecuación 12

Se transforman las escalas de evaluación de los criterios para que sean comparables aplicando la Ecuación 13:

$$g_j = \frac{G_j(x)}{G_j^{max}}$$

Ecuación 13

Después de normalizar los valores de los pesos de los criterios y de transformar las escalas de evaluación de los criterios para que sean comparables, se presenta la Matriz de valoración (normalizada) en la Tabla 19 [39]:

Tabla 19 - Matriz de valoración (normalizada)

CRITERIO	C1	C2	(...)	C _j	(...)	C _N
PESO	p ₁	p ₂	...	p _j	...	p _N

ALT 1	$g_1(1)$	$g_2(1)$	...	$g_j(1)$	...	$g_N(1)$
(...)
ALT X	$g_1(X)$	$g_2(X)$	...	$g_j(X)$	...	$g_N(X)$
(...)
ALT M	$g_1(M)$	$g_2(M)$	...	$g_j(M)$	...	$g_N(M)$

Matriz de dominación

“La matriz de dominación es una matriz cuadrada Alternativa – Alternativa en cuya posición T_{ij} se realiza una comparación entre la alternativa i y la alternativa j en base a cada uno de los N criterios” [39].

“Este método se basa en comparar cada iniciativa con todos los demás. La obtención de la Matriz de dominación requiere una comparación binaria de una alternativa ‘a’ con otra ‘b’ para cada criterio” [39]. La matriz de dominación se presenta en la Tabla 20:

Tabla 20 - Matriz de dominación

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1M} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{M1} & T_{M2} & \dots & T_{MM} \end{bmatrix}$$

La comparación de posiciones se hace con la Ecuación 14 [39]:

$$T_{ij} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in D}}^N p_k [g_x(i) - g_k(j)]$$

Ecuación 14

Y de una manera más simplificada con la Ecuación 15:

$$T_{ij} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in D}}^N p_k d_k$$

Ecuación 15

Donde:

$i, j = 1, 2, \dots, M$ (Alternativas)

$k = 1, 2, \dots, N$ (criterios)

$$D = \begin{cases} d_k(i, j) > 0 ; k \text{ es a maximizar} \\ d_k(i, j) < 0 ; k \text{ es a minimizar} \end{cases}$$

Índice PRESS

“El índice PRESS establece la relación entre el grado con que la alternativa i domina a las demás alternativas y el grado con que estas alternativas dominan a la alternativa i ” [39] :

$$D_i = \sum_{j=1}^M T_{ij} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N p_k [g_x(i) - g_k(j)]$$

Ecuación 16

El valor D_i (suma de filas) representa hasta qué punto la alternativa i domina a todas las demás. Este valor se obtiene aplicando la Ecuación 16.

$$d_i = \sum_{i=1}^M T_{ij} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N p_k [g_x(i) - g_k(j)]$$

Ecuación 17

El valor d_i (suma de columnas) representa hasta qué punto la alternativa i es dominada por todas las demás. Este valor se obtiene aplicando la Ecuación 17.

$$I_i = \frac{D_i}{d_i}$$

Ecuación 18

Las alternativas se ordenan de mayor a menor preferencia según el índice PRESS obtenido con la Ecuación 18.

4.4.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO PRESS

La aplicación del Método PRESS parte del hecho de tener las alternativas, criterios y valores de cada alternativa evaluados en cada criterio. La tabla 4 sirve nuevamente como punto de partida. A continuación, se realizan los pasos necesarios para realizar el método PRESS.

Por facilidad las alternativas se trabajan de la siguiente forma: a GHG se denomina A1, a Bilan Carbone se denomina A2, del mismo modo a PAS 2060, PAS 2050, y MC3, se les llama A3, A4, y A5 respectivamente.

Se debe generar una matriz que identifique los valores de restar los valores de una alternativa con cada una de las otras alternativas y por cada criterio evaluado. Estos resultados se muestran en la Tabla 21. Teniendo en cuenta que este método no calcula los pesos de los criterios, se tomaron en cuenta los pesos ya calculados previamente en el método de la entropía, por esta razón, en la última fila de la Tabla 21 se observan estos valores.

Continuando con el proceso, se necesita generar la matriz de dominación, pero solo con valores positivos, para esto si el valor evaluado es positivo, se multiplica el peso del criterio por ese valor, de tal manera que después se puedan sumar los valores obtenidos, ya no por criterio, sino por dominancia entre alternativas, es decir se suma toda la fila que corresponde a los valores de restarle a A1, A2 y así sucesivamente. Estos valores se aprecian en la Tabla 22.

Con estos valores, ahora se debe construir una matriz que permita calcular valores de D_i y d_i , para esto, se debe tener en cuenta que se traen los valores de la sumatoria encontrada en la Tabla 22, según corresponda el cruce entre las filas vs las columnas. Para dar claridad en este punto, el valor de la esquina superior izquierda de la Tabla 23 corresponde a cruzar la alternativa 1 (filas) con la alternativa 2 (columnas) y el valor a traer de la Tabla 22 es aquel que corresponde a A1 – A2, es decir 0.0338. Del mismo modo se calculan los demás campos. Los valores D_i corresponderán a la sumatoria de las filas, mientras que los d_i serán los de la sumatoria de las columnas.

Finalmente, el índice PRESS se calcula con una última matriz que divide los valores obtenidos de D_i entre d_i , tal como se aprecia en la tabla 24.

Tabla 21 - Matriz de dominación

	Gases Incluidos	Afinidad con el sector de las Telecomunicaciones	Facilidad de comprensión técnica	Propone matemáticamente un modelo de medición	Licencia	Guía para el usuario	Función de recomendación de reducción	Función de recomendación de compensación	Se especifica para un país	Aplicabilidad Sitio	Aplicabilidad Territorio	Aplicabilidad Producto	Relación con el protocolo de Kioto
A1	0,188	0,280	0,308	0,450	0,310	0,310	0,167	0,077	0,257	0,243	0,243	0,310	0,265
A2	0,188	0,240	0,308	0,400	0,310	0,310	0,042	0,077	0,114	0,243	0,243	0,310	0,265
A3	0,281	0,120	0,115	0,050	0,310	0,310	0,042	0,077	0,257	0,027	0,027	0,310	0,206
A4	0,281	0,120	0,115	0,050	0,034	0,034	0,375	0,692	0,257	0,243	0,243	0,034	0,206
A5	0,063	0,240	0,154	0,050	0,034	0,034	0,375	0,077	0,114	0,243	0,243	0,034	0,059
A1-A2	0,000	0,040	0,000	0,050	0,000	0,000	0,125	0,000	0,143	0,000	0,000	0,000	0,000
A1-A3	-0,093	0,160	0,193	0,400	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,216	0,216	0,000	0,059
A1-A4	-0,093	0,160	0,193	0,400	0,276	0,276	-0,208	-0,615	0,000	0,000	0,000	0,276	0,059
A1-A5	0,125	0,040	0,154	0,400	0,276	0,276	-0,208	0,000	0,143	0,000	0,000	0,276	0,206
A2-A1	0,000	-0,040	0,000	-0,050	0,000	0,000	-0,125	0,000	-0,143	0,000	0,000	0,000	0,000
A2-A3	-0,093	0,120	0,193	0,350	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,143	0,216	0,216	0,000	0,059
A2-A4	-0,093	0,120	0,193	0,350	0,276	0,276	-0,333	-0,615	-0,143	0,000	0,000	0,276	0,059
A2-A5	0,125	0,000	0,154	0,350	0,276	0,276	-0,333	0,000	0,000	0,000	0,000	0,276	0,206
A3-A1	0,093	-0,160	-0,193	-0,400	0,000	0,000	-0,125	0,000	0,000	-0,216	-0,216	0,000	-0,059
A3-A2	0,093	-0,120	-0,193	-0,350	0,000	0,000	0,000	0,000	0,143	-0,216	-0,216	0,000	-0,059
A3-A4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,276	0,276	-0,333	-0,615	0,000	-0,216	-0,216	0,276	0,000
A3-A5	0,218	-0,120	-0,039	0,000	0,276	0,276	-0,333	0,000	0,143	-0,216	-0,216	0,276	0,147
A4-A1	0,093	-0,160	-0,193	-0,400	-0,276	-0,276	0,208	0,615	0,000	0,000	0,000	-0,276	-0,059
A4-A2	0,093	-0,120	-0,193	-0,350	-0,276	-0,276	0,333	0,615	0,143	0,000	0,000	-0,276	-0,059
A4-A3	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,276	-0,276	0,333	0,615	0,000	0,216	0,216	-0,276	0,000
A4-A5	0,218	-0,120	-0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,615	0,143	0,000	0,000	0,000	0,147
A5-A1	-0,125	-0,040	-0,154	-0,400	-0,276	-0,276	0,208	0,000	-0,143	0,000	0,000	-0,276	-0,206
A5-A2	-0,125	0,000	-0,154	-0,350	-0,276	-0,276	0,333	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,276	-0,206
A5-A3	-0,218	0,120	0,039	0,000	-0,276	-0,276	0,333	0,000	-0,143	0,216	0,216	-0,276	-0,147
A5-A4	-0,218	0,120	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,615	-0,143	0,000	0,000	0,000	-0,147
W	0,0720	0,0721	0,0644	0,0607	0,0791	0,0791	0,1145	0,0886	0,0952	0,0728	0,0728	0,0791	0,0496

Tabla 23 - Cálculo de di y Di

	A1	A2	A3	A4	A5	Di
A1	0,000	0,034	0,097	0,117	0,135	0,383
A2	0,000	0,000	0,077	0,111	0,116	0,303
A3	0,007	0,020	0,000	0,065	0,102	0,195
A4	0,085	0,113	0,124	0,000	0,091	0,413
A5	0,024	0,038	0,081	0,011	0,000	0,154
di	0,115	0,205	0,378	0,304	0,444	

Tabla 24 - Cálculo del Índice PRESS

	Di	di	I=Di/di
A1	0,383	0,115	3,315
A2	0,303	0,205	1,478
A3	0,195	0,378	0,514
A4	0,413	0,304	1,358
A5	0,154	0,444	0,346

Tal como se aprecia en la Tabla 22, la alternativa mejor valorada es GHG con un índice PRESS de 3.315, seguida por Bilan Carbone con un valor de 1.478 y a su vez por PAS 2050, PAS 2060 y MC3, con valores de 1.358, 0.514 y 0.346, respectivamente.

5 CONCLUSIONES

1. Al utilizar los 4 métodos la alternativa seleccionada siempre fue la misma, hecho que da a entender que los resultados entre los métodos son concluyentes y a su vez complementarios. Esto se explica teniendo en cuenta las propiedades de cada uno de los métodos aplicados, es el caso de la entropía que tiene en cuenta la cantidad de información que entregan los valores de las alternativas en cada criterio y según esto le da más o menos peso a un criterio en particular. Del mismo modo, el método CRITIC utiliza coeficientes de correlación entre los criterios para hallar la alternativa que menos dependa linealmente de las demás. Por otra parte, el método PRESS establece la relación entre el grado con que la alternativa i domina a las demás alternativas y el grado con que estas alternativas dominan a la alternativa i , de tal modo que busca encontrar la alternativa que mejor guarde la proporción entre lo que domina y lo que la dominan. Finalmente, el método Scoring permite computar los valores de las alternativas evaluadas en cada criterio a través de una ponderación lineal entre estos valores y los pesos otorgados por expertos.
2. Los resultados obtenidos, permiten corroborar aquellos obtenidos en [22], en donde se utilizó el método analítico jerárquico para el mismo objeto de estudio. Este hecho, es de gran importancia ya que permite aseverar que hay consonancia entre la aplicación de los diferentes métodos, sean o no jerárquicos, lo que a su vez se traduce en poder decir con mayor seguridad que los resultados son concluyentes con relación a la selección de la metodología GHG Protocol para medir la huella de carbono en el uso de las TIC en Colombia.
3. Es necesario tomar conciencia sobre el daño que la humanidad le está ocasionando al medio ambiente, los procesos de obtención y fabricación de materiales y dispositivos utilizados en la industria TIC hacen parte del deterioro que sufre el planeta. Por esta razón, iniciativas como la de este trabajo, abren la puerta para encontrar soluciones, que se podrían traducir en la puesta en marcha de estrategias para mitigar el impacto al medio ambiente.
4. La medición de la huella de carbono se constituye en una herramienta muy interesante para mitigar las emisiones de CO₂, sin embargo, para que esto se pueda implementar en Colombia, además de crear conciencia en todas las partes involucradas del sector TIC, se necesita apoyo estatal que permita promover el uso de una metodología que facilite el control de emisiones perjudiciales al medio ambiente.
5. Al momento de enfrentarse a tomar una decisión, como en este caso la selección de una metodología para la medición de la huella de carbono en el uso de las TIC, es necesario

aplicar más de un método que permita validar y respaldar la selección realizada. Esto no solamente genera argumentos sólidos para sustentar la selección realizada sino reduce el riesgo de tomar una decisión inadecuada.

6. Hasta el momento final del desarrollo de este proyecto de investigación no se logró encontrar una metodología especialmente dedicada a medir la huella de carbono en el uso de las telecomunicaciones en cualquier escenario global. La selección y congruencia de esta metodología GHG Protocol permite adaptar el uso de las TIC desde el inicio de la manufactura hasta el momento en el que los productos y servicios finales llegan al usuario. Esto se logra teniendo en cuenta a que el uso de las telecomunicaciones obedece a una serie de procesos que involucran el uso de energía, materiales para la fabricación de los diferentes dispositivos de la industria y el transporte de recursos tanto humanos y operativos, entre otros. Los cuales se pueden delimitar en períodos como lo recomienda esta metodología para la correcta medición de la huella de carbono en el uso de las telecomunicaciones.

6 REFERENCIAS

- [1] R. Estéves, «¿Conoces en qué consiste el GHG Protocol?,» ecointeligencia, 2013.
- [2] GREENHOUSE GAS PROTOCOL, «About us | GHG Protocol,» [En línea]. Available: <http://ghgprotocol.org/about-us>. [Último acceso: 10 2019].
- [3] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); World Business Council For Sustainable Development; World Resources Institute, «Protocolo de Gases Efecto Invernadero - Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte,» Ginebra, 1998.
- [4] S. Harsha, «A REPORT ON GRI GUIDELINES AND GHG PROTOCOL».
- [5] GREENHOUSE GAS PROTOCOL, «Corporate Standard | GHG Protocol,» [En línea]. Available: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>. [Último acceso: 10 2019].
- [6] GREENHOUSE GAS PROTOCOL, «Calculation Tools | GHG Protocol,» [En línea]. Available: <http://ghgprotocol.org/calculation-tools>. [Último acceso: 10 2019].
- [7] GREENHOUSE GAS PROTOCOL, «Country Programs | GHG Protocol,» [En línea]. Available: <http://ghgprotocol.org/country-programs>. [Último acceso: 10 2019].
- [8] WORLD BUSINESS COUNCIL For SUSTAINABLE DEVELOPMENT, «WBCSD,» [En línea]. Available: <https://www.wbcsd.org>. [Último acceso: 10 2019].
- [9] WORLD RESOURCES INSTITUTE, «WRI | MAKING BIG IDEAS HAPPEN,» [En línea]. Available: <https://www.wri.org>. [Último acceso: 10 2019].
- [10] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), «Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina,» FRANCIA, 2004.
- [11] ASSOCIATION BILAN CARBONE, «Methodological guidelines: Accounting principles and objectives,» BILAN CARBONE V8, 2017.

- [12] «7 METODOLOGIAS PARA EL CALCULO DE EMISIONES DE EFECTO INVERNADERO,» Bilbao, 2013.
- [13] BILAN CARBONE, «Guide méthodologique,» [En línea]. Available: <https://www.associationbilancarbhone.fr/wp-content/uploads/2018/03/bilan-carbone-v8-guide-methodologique-final.pdf>. [Último acceso: 10 2019].
- [14] BILAN CARBONE, «Guide d'application du Bilan carbone,» [En línea]. Available: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bilan-carbone-applique-batiment-guide-methodologique-7152.pdf>. [Último acceso: 10 2019].
- [15] PAS 2050, [En línea]. Available: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2050>. [Último acceso: 10 2019].
- [16] QAEC - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CALIDAD , «Norma PAS 2050,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2050>.
- [17] O. L. PEDROCHES, «PAS 2050 Verificación de la Huella de Carbono (VHC),» [En línea]. Available: <https://olipe.com/vhc>.
- [18] ISOTOOLS, «Qué es la norma PAS 2050,» 13 Diciembre 2012. [En línea]. Available: <https://www.isotools.org/2012/12/13/que-es-la-norma-pas-2050/>.
- [19] PAS 2050 / PAS 2060, «Huella de carbono Cálculo de emisiones (PAS 2050) y Neutralidad de carbono (PAS 2060),» [En línea]. Available: <http://www.ecotech.cat/pas2050.pdf>. [Último acceso: 10 2019].
- [20] Q. -. A. E. P. L. CALIDAD, «NORMA PAS 2060,» [En línea]. Available: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2060>.
- [21] PAS 2060, [En línea]. Available: <https://www.bsigroup.com/es-ES/Neutralidad-en-Emissiones-de-carbono-PAS-2060/>. [Último acceso: 10 2019].

- [22] D. M. Rincon, «ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR PARA LA MEDICIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL USO DE LAS TIC EN COLOMBIA,» Bogotá, 2020.
- [23] T. H. y. J. O. V. Rafael Quezada, «Determinación de la Huella del Carbono mediante el Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3) para una Empresa Vitivinícola en Chile,» 2013. [En línea]. Available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642013000400002&script=sci_arttext. [Último acceso: Diciembre 2019].
- [24] C. E. y. J. Valderrama, «Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas,» 2012. [En línea]. Available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci_arttext&tlng=en. [Último acceso: Diciembre 2019].
- [25] Carbone Impact, «Carbone Impact - Puedes cambiar el futuro,» 2005-2009. [En línea]. Available: <http://www.carboneimpact.com/>. [Último acceso: Diciembre 2019].
- [26] D. M. Rincón, «COMPARACIÓN,» Bogotá, 2019.
- [27] ICF International, [En línea]. Available: <https://www.icf.com/company/about>. [Último acceso: 2019].
- [28] University of Manchester | Sebastian Carney, «GHG Emissions Accounting, Scenarios and Reporting GRIP (Greenhouse Gas Regional Inventory Protocol),» UK.
- [29] Clean Energy Solutions, «Greenhouse Gas Regional Inventory Protocol,» <https://cleanenergysolutions.org/es/resources/greenhouse-gas-regional-inventory-protocol-grip-website>.
- [30] NTT DATA CORPORATION, «JAPAN FOR SUSTAINABILITY,» 26 02 2007. [En línea]. Available: https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id026595.html. [Último acceso: 10 2019].
- [31] Post&Parcel, «SUPPLY CHAIN CONSULTING LAUNCHES CARBONVIEW TECHNOLOGY FOR GREEN SUPPLY CHAINS,» 11 09 2007. [En línea]. Available:

- <https://postandparcel.info/18812/news/supply-chain-consulting-launches-carbonview-technology-for-green-supply-chains/>. [Último acceso: 10 2019].
- [32] IFU Hamburg | Member of iPoint Group, «umberto,» [En línea]. Available: <https://www.ifu.com/en/umberto/>. [Último acceso: 10 2019].
- [33] gaia, «gaia Servicios Ambientales | Productos,» gaia S.A, [En línea]. Available: <https://www.gaiasa.com/productos>. [Último acceso: 10 2019].
- [34] IFU Hamburg | Member of iPoint Group, «umberto,» [En línea]. Available: <https://www.ifu.com/en/umberto/references/>. [Último acceso: 10 2019].
- [35] U. J. I. | E. P. Soler, «CÁLCULO Y COMPENSACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN ORGANIZACIONES,» España.
- [36] R. Estévez, «Eco Inteligencia: ¿Qué es la huella de carbono?,» Julio 2017. [En línea]. Available: <https://www.ecointeligencia.com/2017/07/huella-carbono/>. [Último acceso: Diciembre 2019].
- [37] P. N. Roldan, «Economipedia,» [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/modelo-matematico.html>.
- [38] A. M.-E. Y. M.-L. O. B.-F. O. F.-B. Eduardo Román Veitia- Rodriguez, «El Método Scoring en la selección de síntomas motrices,» Guantánamo.
- [39] J.-C. P. Sergio Barba-Romero, «Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica,» Madrid, 1998.
- [40] M. Alemiardakani, «ENHANCING IMPACT CHARACTERIZATION AND MULTI-CRITERIA DESIGN OPTIMIZATION OF GLASS FIBER REINFORCED POLYPROPYLENE LAMINATES,» 2014.
- [41] B.-R. S. Y. P. J.CH., «Decisiones Multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica,» Servicio Publicaciones, 1997.

- [42] F. G. M. Jerónimo Aznar Bellver, NUEVOS MÉTODOS DE VALORACIÓN MODELOS MULTICRITERIO, Segunda edición ed., UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA .
- [43] J. H. H. S. L. W. Lianhui Li, «A conjunctive multiple-criteria decision-making approach for cloud service supplier selection of manufacturing enterprise,» *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, nº 3, pp. 1-15, 2017.
- [44] UNEP | Charles Thomas, Tessa Tennant and Jon Rolls , «The GHG Indicator: UNEP Guidelines for Calculating Greenhouse Gas Emissions for Businesses and Non-Commercial Organisations,» 25 10 2000. [En línea]. Available: https://www.unepfi.org/fileadmin/publications/cc/ghg_indicator_2000.pdf. [Último acceso: 10 2019].
- [45] GHG PROTOCOL, «Boustead Model,» [En línea]. Available: <https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/Boustead-Model>. [Último acceso: 2019].
- [46] Carbon Trust, [En línea]. Available: <https://www.carbontrust.com/home/>. [Último acceso: 2019].
- [47] UIT (2009), «Un cargador universal para los teléfonos móviles,» [En línea]. Available: <https://www.itu.int/net/itunews/issues/2009/07/32-es.aspx>. [Último acceso: 07 06 2018].
- [48] ITU (2009), «Ecuador acoge el simposio sobre el cambio climático,» [En línea]. Available: <https://www.itu.int/net/itunews/issues/2009/07/28-es.aspx>.
- [49] ITUnews (2010), «Las TIC cumplen un cometido esencial para ayudar a todos los sectores a responder al reto del cambio climático,» [En línea]. Available: <http://itunews.itu.int/Es/314-Las-TIC-cumplen-un-cometido-esencial-para-ayudar-a-todos-los-sectores-a-responder-al-reto-del-cambio-climatico.note.aspx>.
- [50] «Las TIC y el cambio climático,» [En línea].
- [51] Sigea (2011), «Las TIC y su impacto sobre el medio ambiente,» [En línea]. Available: <https://www.sigea.es/las-tic-impacto-sobre-el-medioambiente/>.

- [52] ITU (2018), «El papel de las telecomunicaciones/tecnologías de las información y la comunicación en el cambio climático y la protección del medio ambiente,» [En línea]. Available: <https://www.itu.int/themes/climate/docs/Res%20182%20SP.pdf>.
- [53] Unfccc (2016), «El sector TIC ayuda contra el cambio climático,» [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/news/el-sector-tic-ayuda-en-la-lucha-contr-el-cambio-clim%C3%A1tico>.
- [54] Ladb (2013), «Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático,» [En línea]. Available: <http://www20.iadb.org/intal/catalogo/PE/2013/13146.pdf>.
- [55] BBC (2012), «La industria de los celulares que India quiere ser más verde,» [En línea]. Available: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/08/120823_tecnologia_empresas_telecomunicacion_mas_ecologicas_india_bd.shtml.
- [56] BBC (2011), «China los retos del mayor inversor en energías verdes.,» [En línea]. Available: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/09/110917_economia_china_energia_limpiar_mayor_inversor_mundo_az.shtml.
- [57] Sigea (2011), «El gobierno de las TIC y la Green IT,» [En línea]. Available: <https://www.sigea.es/el-gobierno-de-las-tic-y-la-green-it/>.
- [58] Schneider, H. Samaniego, J (2009), Naciones Unidas, «La huella de carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios.,» [En línea]. Available: <http://ingenieros.es/files/proyectos/La%20huella%20del%20carbono%20en%20la%20produccion%20distribucion%20y%20consumo.pdf> .
- [59] CEPAL , «Metodologías de cálculo de la huella de carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina,» [En línea]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37288/Metodolog%EDas_calculo_HC_AL.pdf;jsessionid=2F7BBEA217765CC3CBF1E28415937BD4?sequence=1 .

[60] Bilan Carbone; EUROPEAN COURT OF AUDITORS , «Calculating the ECA's carbon footprint using the Bilan Carbone method,» 2018.