



Universitat Autònoma de Barcelona

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

Análisis regional sistémico para evaluar el impacto ambiental y las implicaciones para la política de cambio climático. El caso de estudio de Puebla, México.

Iraís Argelia Vázquez Cisneros

Tesis Doctoral

Supervisores: Dra. Gara Villalba
Dra. Cristina Madrid
Dr. Abel Chávez

Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos para el Doctorado en Ciencias y Tecnología Ambientales

Grupo de investigación Sostenipra

Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA)
Univeritat Autònoma de Barcelona (UAB)

Bellaterra, 2020



Análisis regional sistémico para evaluar el impacto ambiental y las implicaciones en la política de cambio climático. El caso de estudio de Puebla, México.

Por

Irais Argelia Vázquez Cisneros

Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos para el
Doctorado en Ciencias y Tecnología Ambientales



Septiembre 2020

La presente tesis doctoral fue parcialmente financiada por la beca doctoral otorgada a Irais Vázquez por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del estado de Puebla, México, CVU: 496187

Título: Análisis regional sistémico para evaluar el impacto ambiental y las implicaciones en la política de cambio climático. El caso de estudio de Puebla, México.

Title: Systemic regional analysis to assess environmental impact and implications for climate change policy. The Case Study of Puebla, Mexico.

Títol: Anàlisi regional sistèmic per avaluar l'impacte ambiental i les implicacions en a la política de canvi climàtic. L'cas de estudi de Puebla, Mèxic.

«Lo que haces marca la diferencia, tú tienes que decidir qué tipo de diferencia quieres hacer»

Jane Goodall

«Una mujer con imaginación es una mujer que no sólo sabe proyectar la vida de una familia, la de una sociedad, sino también el futuro de un milenio»

Rigoberta Menchu

Dedico esta tesis a todas y todos aquellos que imaginan un mundo mejor... en especial a todas aquellas mujeres que con su gran fortaleza hacen de este un mundo mejor, primordialmente a mi madre.

La presente tesis doctoral titulada "Análisis regional sistémico para evaluar el impacto ambiental y las implicaciones para la política de cambio climático. El caso de estudio de Puebla, México" se ha llevado a cabo en el Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental (ICTA) de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) dentro del grupo de investigación SOSTENIPRA bajo la supervisión de la Dra. Gara Villalba, del ICTA y del Departamento de Ingeniería Química de la UAB, la Dra. Cristina Madrid, del ICTA, y el Dr. Abel Chávez, del departamento de medio ambiente y sustentabilidad de la Universidad de Western Colorado, EE.UU.

Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), septiembre de 2020

**GARA
VILLALBA
MENDEZ -
DNI
46411103R**

Digitally signed by
GARA VILLALBA
MENDEZ - DNI
46411103R
Date: 2020.10.12
07:26:17 +02'00'

Gara Villalba

**MADRID
LOPEZ
CRISTINA -
48818934P**

Digitally signed by MADRID
LOPEZ CRISTINA -
48818934P
DN: c=ES,
serialNumber=IDCES-48818
934P,
givenName=CRISTINA,
sn=MADRID LOPEZ,
cn=MADRID LOPEZ
CRISTINA - 48818934P
Date: 2020.10.12 23:13:33
+02'00'

Cristina Madrid

**Abel A
Chavez
z**

Digitally
signed by
Abel A
Chavez
Date:
2020.10.12
08:37:10
-06'00'

Abel Chávez

ÍNDICE

PREFACIO	I
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VIII
SUMMARY	XII
RESUM	XVI
ACRÓNIMOS	XIX
PARTE I: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.....	2
1. Presentación de la tesis.....	2
1.1. Objetivo, preguntas de investigación y justificación	2
CAPÍTULO 2.....	7
2. Contexto general	7
2.1 Política ambiental y de cambio climático en México e importancia de los gobiernos locales	7
CAPÍTULO 3.....	13
3. Contexto de México y Puebla.....	13
3.1 México ante el cambio climático, contexto internacional y marco regulatorio.....	13
3.1.2 Participación y alianzas internacionales de México en materia de cambio climático, 2012-2020.....	16
3.1.3 Sector eléctrico en México.....	18
3.1.4 Política nacional de cambio climático e instrumentos regulatorios.....	19
3.1.5 Puebla en el contexto de México	22
CAPÍTULO 4.....	26
4.1 Marco teórico y metodologías: Ecología industrial.....	26
4.1.1 Análisis de ciclo de vida (LCA) con enfoque ambiental	29
4.1.2 Análisis económico del ciclo de vida del insumo-producto (EIO-LCA).....	32
4.1.2.1 Insumo-producto regional, escalamiento con uso de coeficientes de localización ..	39
4.1.3 Análisis de descomposición estructural de insumo-producto	42
4.1.4 Análisis de enlaces productivos insumo-producto.....	44
4.1.5 Huella de carbono	47
4.1.6 Metabolismo socioeconómico y comunitario.....	47
4.1.6.1 Análisis de flujo de materiales (MFA).....	49
4.2 Datos necesarios para esta tesis y su metodología.....	52
PARTE II: RESULTADOS	57
CAPÍTULO 5.....	58
5.1 Huella de carbono del ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla.....	58
5.2 Detalles específicos de la metodología.....	59
5.2 Resultados y discusión	68
CAPÍTULO 6.....	88

6.1	Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México).	88
6.2	Detalles de la metodología.....	89
6.3	Resultados y discusión	94
CAPÍTULO 7.....		116
7.1	Flujo de materiales, análisis de intensidad de recursos y desacoplamiento: el caso de México y el estado de Puebla del 2004-2017	116
7.2	Detalles de la metodología.....	117
7.3	Resultados y discusión	121
PARTE III: CIERRE Y CONCLUSIONES		142
CAPÍTULO 8.....		143
8.1	Conclusiones generales	143
8.2	General conclusions	149
8.3	Reflexiones finales.....	155
8.3.1	Fortalezas de esta tesis.....	155
8.3.2	Limitaciones de esta tesis.....	156
8.3.3	Futuras líneas de investigación.....	157
PARTE IV: REFERENCIAS Y ANEXOS		160
9.	Referencias	161
10.	Anexos	169

TABLAS

TABLA 1.1	RELACIÓN ENTRE PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN, OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y CAPÍTULOS	5
TABLA 4.1	MATRIZ DE INTERACCIONES INTERINDUSTRIALES DEL MODELO INSUMO-PRODUCTO	33
TABLA 4.2	DATOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE ESTA TESIS	53
TABLA 5.1	FUENTES DE DATOS ANÁLISIS DE HUELLA DE CARBONO ELÉCTRICA CON INSUMO-PRODUCTO	60
TABLA 5.2	MEZCLA ENERGÉTICA DE MÉXICO Y CÁLCULOS DEL FACTOR ELÉCTRICO DE EMISIONES 2013	65
TABLA 5.3	COEFICIENTES DE LOCALIZACIÓN DE PUEBLA 2013	68
TABLA 5.4	SECTORES CON MAYOR CONTIBUCIÓN AL PIB DE PUEBLA	79
TABLA 5.5	CÁLCULO DEL FACTOR ELÉCTRICO DE EMISIONES DE MÉXICO CON 35% RENOVABLES.....	85
TABLA 6.1.	CLASIFICACIÓN DE SECTORES SEGÚN RASMUSSEN	93
TABLA 6.2.	CLASIFICACIÓN DE SECTORES SEGÚN CHENERY-WATANABE	94
TABLA 6.3.	RESULTADOS ANÁLISIS DE DESCOMPOSICIÓN ESTRUCTURAL Y ENLACES PRODUCTIVOS POR SECTOR 2008 Y 2013	103
TABLA 7.1.	COMPOSICIÓN DE GRUPOS DE MATERIALES DEL MFA.....	118
TABLA 7.2.	INTENSIDAD DEL DMC Y DMC PER CÁPITA DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017	119
TABLA 7.3.	ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES DE MÉXICO EN MILLONES DE TONELADAS MÉTRICAS	122
TABLA 7.4.	ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES DE PUEBLA EN MILLONES DE TONELADAS MÉTRICAS	124
TABLA 7.5.	ANÁLISIS DE DESACOPLAMIENTO DEL DMC DE MÉXICO 2004-2017	140
TABLA 7.6.	ANÁLISIS DE DESACOPLAMIENTO DEL DMC DE PUEBLA 2004-2017	141

FIGURAS

FIGURA 1. ESTRUCTURA DE LA ESTRATEGIA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO Y APORTACIONES DE ESTA TESIS.....	9
FIGURA 2. LÍNEA DEL TIEMPO DE LA PARTICIPACIÓN Y ALIANZAS INTERNACIONALES DE MÉXICO EN MATERIA DE CAMBIO CLIMÁTICO, 2012-2020	16
FIGURA 3. SISTEMA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO DE MÉXICO.....	20
FIGURA 4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE PUEBLA	23
FIGURA 5. MAPA DE LOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE PUEBLA EN MÉXICO	24
FIGURA 6. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ECOLOGÍA INDUSTRIAL	28
FIGURA 7. PRINCIPALES PASOS DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	30
FIGURA 8. DIMENSIONES FÍSICAS DE UN SISTEMA ECONÓMICO.....	50
FIGURA 9. CINCO SECTORES CON MAYORES EMISIONES DIRECTAS E INDIRECTAS, DADO SU CONSUMO ELÉCTRICO EN PUEBLA DURANTE EL 2013..	78
FIGURA 10. CINCO SECTORES CON MAYORES EMISIONES DE PUEBLA COMPARACIÓN ENTRE MÉXICO Y PUEBLA	82
FIGURA 11. EMISIONES RELACIONADAS CON IMPORTACIONES, EMISIONES DIRECTAS E INDIRECTAS	84
FIGURA 12. SECTORES CON MAYORES EMISIONES DIRECTAS DE PUEBLA, 2008.....	95
FIGURA 13. SECTORES CON MAYORES EMISIONES DIRECTAS DE PUEBLA, 2013.....	96
FIGURA 14. CAMBIO EN LA PRODUCCIÓN TOTAL ENTRE 2008 Y 2013 DE LOS EMISORES MÁS ALTOS DE PUEBLA.....	97
FIGURA 15. ENLACES PRODUCTIVOS DE LOS EMISORES MÁS ALTOS DE PUEBLA DURANTE EL 2008.....	99
FIGURA 16. ENLACES PRODUCTIVOS DE LOS EMISORES MÁS ALTOS DE PUEBLA DURANTE 2013.	100
FIGURA 17. ENTRADA DIRECTA DE MATERIAL EN MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.	132
FIGURA 18. COMPOSICIÓN DE LA ENTRADA DIRECTA DE MATERIAL DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.....	133
FIGURA 19. CONSUMO DOMÉSTICO DE MATERIALES DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.	135
FIGURA 20. CONSUMO DOMÉSTICO DE MATERIALES PER CÁPITA DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.	136
FIGURA 21. BALANZA COMERCIAL FÍSICA DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.	138
FIGURA 22. INTENSIDAD DEL DMC DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.	139
FIGURA 23. DESACOPAMIENTO DE MÉXICO Y PUEBLA 2004-2017.	140

PREFACIO

Esta tesis doctoral fue desarrollada durante el período comprendido entre octubre 2016 y septiembre de 2020 en cumplimiento con el programa de doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental de la Universidad Autónoma de Barcelona. Este período de capacitación tuvo lugar dentro del grupo de investigación SOSTENIPRA en el Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales (ICTA), que incluyó una movilidad internacional, de enero a junio de 2017, en la Universidad de Western Colorado (Gunnison, Colorado, EE. UU.) en el departamento de medio ambiente y sustentabilidad.

De octubre de 2016 a junio de 2018 esta tesis fue apoyada financieramente por la beca doctoral otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del estado de Puebla, México, CVU: 496187. Durante el año 2019 y 2020 Irais Vázquez desarrolló la presente tesis en la Ciudad de México, bajo la tutela y supervisión virtual de su tutora académica y supervisores de tesis.

Esta disertación aborda un enfoque sistémico del análisis económico de ciclo de vida para estimar la huella de carbono dado el consumo de electricidad de ochenta sectores industriales y comerciales de México, específicamente del estado Puebla, así como las principales causas o variables influyentes en las fluctuaciones de la huella de carbono de cada uno de estos sectores. Así mismo, se cuantifica el flujo de materiales tanto de México como de Puebla del 2004-2017 con la finalidad de analizar a través de indicadores el uso, consumo y explotación de recursos naturales.

La novedad de esta investigación es que hasta el día de hoy no se han hecho estudios de huella de carbono regional con el uso de tablas insumo-producto en México ni en el resto de Latinoamérica, consideramos que esta metodología es relativamente fácil de replicar en otras regiones (estados, municipios o ciudades) de México u otros países del continente, siempre y cuando se cuente con la información necesaria para los cálculos. Y aunque los estudios de flujo de materiales ya se han aplicado para México, hasta ahora no se habían cuantificado los indicadores intensivos y extensivos del uso de materiales del estado de Puebla.

Esta tesis se compone de cuatro partes las cuales constan de un grupo de capítulos que presentan una variedad de contenidos relacionados con el tema principal de la disertación.

La **Parte I** corresponde a la introducción en la que se expone el tema, las preguntas de investigación objetivos general y específicos, justificación y la estructura detallada de esta tesis.

La **Parte II** integra los tres capítulos núcleo de esta tesis, los cuales presentan detalles de la metodología y resultados obtenidos de la aplicación cuantitativa de las herramientas de ecología industrial como se muestra en la siguiente tabla:

Número de capítulo	Nombre del capítulo	Metodología principalmente usada en el capítulo
5	Huella de carbono del ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla	Análisis económico del ciclo de vida del insumo-producto (EIO-LCA)
6	Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México).	Análisis de descomposición estructural de insumo-producto (SDA-IO)
7	Flujo de materiales, análisis de intensidad de recursos y desacoplamiento: el caso de México y el estado de Puebla del 2004-2017.	Análisis de flujo de materiales (MFA)

La **Parte III** presenta la discusión general del conjunto de resultados, las conclusiones y reflexiones finales. Y finalmente, la **Parte IV** es el conjunto de referencias y anexos, así como una ejemplificación de la difusión de conocimiento que Irais Vázquez realizó durante el período de sus estudios doctorales. En los anexos se incluye el resumen del manuscrito enviado a publicación, así como ligas a repositorios en Zenodo.

AGRADECIMIENTOS

Hace aproximadamente diez años me puse como meta personal y profesional hacer un doctorado y aunque no tendía idea cómo, cuándo y dónde eso iba a suceder, fue un sueño que puedo afirmar que he luchado duro por conseguir. Desde lo más profundo de mi corazón quiero agradecer a cada una de las personas que me han apoyado para alcanzar dicha meta y convertirla en realidad.

A mis mentores:

Dra. Gara Villalba– gracias por tu paciencia y apoyo durante estos años, gracias por las muchas asesorías virtuales. Sin importar que fueran Navidades, época de pandemia, fines de semana, vacaciones de verano, etc., siempre estuviste ahí dispuesta a apoyarme. Gracias infinitas por escucharme en los momentos más duros, por tu empatía y sobre todo gracias por no desistir incluso cuando las cosas se pusieron difíciles. Gracias por aceptar desde el día uno guiarme y empujarme a dar lo mejor de mi durante este proceso de formación. Eres una mujer que cumple su palabra, que inspira disciplina y eso es digno de admiración.

Dra. Cristina Madrid– gracias por tu buena actitud, amabilidad, profesionalismo y apoyo. Gracias porque desde el día que te conocí siempre has tendido palabras de aliento, ánimos y una sonrisa que ofrecerme, gracias por aceptar sumarte a este equipo cuando más lo necesitaba. Gracias por tu bondad, por compartir tu conocimiento conmigo y claro gracias por las muchas video llamadas.

Dr. Abel Chávez– gracias por sembrar el fundamento de mi conocimiento adquirido en esta etapa de formación, especialmente con lo relacionado a *EIO-LCA*. Gracias por la hospitalidad, por tu grandísimo apoyo y guía brindada durante mi estancia en Western. Gracias por tu infinita paciencia y por las innumerables asesorías virtuales.

A los tres, **Gara, Cristina y Abel** gracias por darme la oportunidad de aprender de ustedes y por confiar en mi trabajo.

Dr. Hugo Aldana– gracias por tu buena disposición para aportar a este proyecto de tesis, por brindarme el espacio y la gran oportunidad de acercarme a tus alumnos y aprender de ellos.

Dra. Itzchel Nieto y Dra. Claudia Octaviano– gracias por recordarme una y otra vez lo importante que era llegar al final de este proceso de formación, son dos mujeres mexicanas que admiro mucho. Me siento honrada de poder contar con su ejemplo.

Dra. Eva Ramón– las palabras no alcanzarían para expresarte mi más profunda gratitud, tu dedicación a la ciencia y tus trascendentales aportaciones al beneficio de la humanidad han sido y seguirán siendo una enorme fuente de inspiración. Tienes mi total admiración. ¡GRACIAS!

A mi familia:

Mamá– Al igual que esta tesis, cada uno de mis logros te los dedico con todo mi amor. Tu maravilloso ejemplo de fortaleza, inteligencia, tenacidad y resiliencia femenina sin duda me han convertido en la mujer que hoy soy. Gracias por estar conmigo SIEMPRE, por tus mimos, por ser mi mejor compañera, amiga, cómplice y consejera. MAMÁ TE AMO POR SIEMPRE.

Papá– siento que las palabras de agradecimiento que pudiera escribirte se quedarían muy cortas para darte las gracias por todo el amor y apoyo incondicional que me das. Eres mi más grande ejemplo de ser humano integro, honrado, honorable, bondadoso y trabajador. Gracias por darme la mejor plataforma y herramientas para enfrentar la vida. TE AMO PAPÁ.

A mis hermanos; **Misael** gracias por las risas, por las largas pláticas y consejos de vida, gracias por acompañarme a las distintas embajadas/consulados una y otra vez, gracias por los deliciosos manjares que nos cocinas para compartir tiempo en familia. **Miguel** gracias también por las constantes risas, cariño y acompañamiento. Gracias por entender cuando no podría acompañarte a entrenar por quedarme en casa trabajando en la tesis, gracias por tus abrazos y palabras de consuelo cuando sentía que no lo iba a lograr. A los dos gracias por su amor y protección. Son dos seres inteligentes y maravillosos que quiero con todo mi corazón.

A mis amigas:

Gina– gracias infinitas por tus persistentes porras, consejos, palabras de ánimo y amor enviado desde Canadá a México. Eres una mujer con visión e ímpetu por llevar a México a su mejor versión, algo que comparto contigo, estoy muy orgullosa de ti. Gracias por tu hermandad y amistad. Te quiero mucho.

Monika– ¿o debiera decir Dra. Maciejewska? gracias por ser mi amiga y compañera durante todo este proceso formativo, haber hecho “juntas” el doctorado me hizo sentir siempre acompañada aún estado en distintos continentes. Gracias por tus constantes consejos, por compartirme tus vivencias y experiencias.

Laura– gracias por tu amistad de tantos años. Aun estando desde Australia me has dejado sentir tu cariño y tu compañía, eres una mujer muy valiente y tu ejemplo me llenó de valentía durante mis seis años lejos de casa.

RESUMEN

A nivel mundial la generación de energía es la principal causa antropogénica de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la cual en su mayoría sigue dependiendo de los combustibles fósiles. En el 2018, el 30% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial fueron causadas por el uso de carbón para la generación de electricidad (IEA, 2019). En el caso de México y sus estados esta situación no es distinta, pues la generación de energía, principalmente eléctrica, es la mayor causante de GEI. Bajo este contexto resulta ineludible la cuantificación y entendimiento de la huella de carbono causada por el consumo eléctrico tanto a nivel nacional como regional (estados, municipios o ciudades). La importancia de cuantificar la huella de carbono a nivel local radica en la necesidad de que los estados, municipios y ciudades deben sumar a la contabilidad nacional de emisiones, para el cumplimiento de las metas nacionales y compromisos internacionales adquiridos por México al ratificar el Acuerdo de París (SEMARNAT, 2019). Mientras que la relevancia de analizar la composición de dicha huella de carbono radica en comprender el origen de las emisiones con la finalidad de buscar acciones de mitigación a la medida de cada región y para cada uno de sus sectores económicos. En respuesta a estas dos necesidades, en la presente tesis se utiliza el análisis económico de ciclo de vida para cuantificar la huella de carbono eléctrica de ochenta sectores de la economía regional del estado de Puebla en México.

Sin embargo, no sólo la contabilidad de la huella de carbono es relevante al momento de pretender comprender los impactos ambientales causados por las actividades económicas de un país o región, también es primordial cuantificar y entender el flujo

de materiales e indicadores derivados de dicha cuantificación, pues los indicadores intensivos y extensivos del flujo de materiales pueden servir como una medida de la presión que la economía ejerce en el medio ambiente al explotar los recursos naturales y como una fuente potencial de contaminantes al aire, agua y suelo.

Bajo esta contextualización, en la presente tesis se toma como caso de estudio el estado de Puebla en México y se desarrolla en torno a las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es la huella de carbono generada dado el consumo eléctrico de México y Puebla en el 2013? ¿Cuáles son los sectores con mayor huella de carbono?
2. ¿Cómo la estructura económica de México y Puebla, y sus intercambios entre industrias influyen a la huella de carbono eléctrica de ambas regiones?
3. ¿Cómo influyen los cambios tecnológicos y de demanda final a la huella de carbono eléctrica de México y Puebla?
4. ¿Cómo el contexto macroeconómico de México impactó en el perfil biofísico de México y Puebla del 2004-2017?

Esta tesis doctoral está estructurada alrededor de tres capítulos medulares, 5, 6 y 7. En cada uno de estos capítulos se discute y presentan los resultados obtenidos del análisis cuantitativo derivado de la aplicación de tres metodologías; i) análisis económico de ciclo de vida con tablas insumo-producto, ii) análisis de descomposición estructural con tablas insumo-producto y iii) contabilidad y análisis de flujo de materiales, todos estos aplicados al caso de estudio del estado de Puebla en México. Del capítulo 5 se derivó un artículo académico enviado para publicación en una revista científica.

Tanto el capítulo 5 como el 6, se desarrollan en torno al análisis de la huella de carbono causada por el consumo de electricidad de los ochenta sectores industriales y comerciales de la economía mexicana, reportados en la matriz insumo-producto de la base de datos de EORA, para el año 2013. Es importante decir que la matriz insumo-producto más reciente de México encontrada en la base de datos de EORA es 2013 y que el primer inventario nacional de emisiones es el del 2015. Para el capítulo 5, se calculó el consumo eléctrico necesario para satisfacer la demanda intermedia y demanda final de la economía mexicana, con el uso del factor de emisiones eléctrico nacional se calculó la huella de carbono para cada uno de los ochenta sectores antes mencionados. Posteriormente se escaló la matriz de coeficientes técnicos nacional a la escala local del estado de Puebla, con dicho escalamiento junto con el de la demanda final del estado, fue posible estimar las emisiones directas (basadas en la producción) y las indirectas (basadas en el consumo) derivada del consumo eléctrico de los ochenta sectores escalados a la economía poblana.

Continuando con el análisis de la huella de carbono eléctrica, con el uso de la matriz insumo-producto, en el capítulo 6 se presentan los resultados del análisis de descomposición estructural. Este análisis tuvo como objetivo identificar el nivel de influencia que tuvieron las fluctuaciones en la demanda final y los cambios tecnológicos en la variación de la producción final de cada uno de los ochenta sectores estudiados, tanto en México como en Puebla, comparando el año 2008 con el 2013. También se estimaron los enlaces productivos para cada uno de los sectores. Al calcularse el nivel de influencia de la producción final y los enlaces productivos de cada sector, se genera el análisis de la influencia indirecta en la huella de carbono dado el consumo eléctrico de los ochenta sectores estudiados para la economía mexicana y poblana.

En el capítulo 7 se ofrece la perspectiva del metabolismo comunitario, usando la metodología de contabilidad de flujos de materiales, con la cual se han obtenido indicadores intensivos y extensivos del uso de materiales por parte de la economía mexicana y poblana durante el 2004 hasta el 2017. Dichos indicadores permiten determinar los perfiles metabólicos de la economía de México (país) y de Puebla (estado).

Finalmente es importante mencionar que todo el análisis planteado en esta tesis, usando como caso de estudio el estado de Puebla, puede ser fácilmente replicable para otros estados o regiones de México (o de otros países), siempre y cuando se cuente con la información necesaria para el desarrollo de las metodologías.

SUMMARY

Power generation is the main anthropogenic cause of greenhouse gas (GHG) emissions around the world, which mostly continues to depend on fossil fuels. In 2018 coal-fired electricity generation accounted for 30% of global CO₂ emissions (IEA, 2019). This situation is not different in the case of Mexico and its states, since the generation of energy, mainly electric, is the primary cause of greenhouse gas emissions. In this context, it is inexorable to quantify and understand the carbon footprint caused by electric usage from both the national and regional levels (states, municipalities, or cities). The importance of quantifying the carbon footprint at a regional level lies in the need for states, municipalities, and cities to add up to the national emissions accounting to comply with the national goals and international commitments acquired by Mexico through the Paris Agreement. The relevance of analyzing the carbon footprint's composition lies in understanding the origin of emissions to seek mitigating actions tailored for each region and for each of its economic sectors. In response to these two needs, this thesis uses the economic life cycle analysis to quantify the electrical carbon footprint of eighty sectors of the regional economy of the state of Puebla, Mexico.

However, not only the accounting of the carbon footprint is relevant when trying to understand the environmental impacts caused by the economic activities of a country or region. It is also essential to quantify and understand the flow of materials and indicators derived from such quantification since intensive and extensive material flow indicators can serve both as a measure for the pressure

exerted by the economy on the environment when exploiting natural resources, as well as a potential source of air, water, and soil contaminants.

Under this context, in this thesis, we take the state of Puebla, Mexico as a case study. It is developed around the following research questions:

1. What is the carbon footprint generated according to the electricity usage of Mexico and Puebla in 2013? Which are the sectors with the highest carbon footprint?
2. How do the economic structure of Mexico and Puebla and their inter-industrial interactions influence the electric carbon footprint of both regions?
3. How do technological changes and final demand influence Mexico and Puebla's electric carbon footprint?
4. How did the macro-economic context of Mexico impacts Mexico's and Puebla's biophysical profiles from 2004-2017?

This doctoral thesis is structured around three core chapters; 5, 6, and 7. In each of these chapters, the results obtained from the quantitative analysis derived from the application of three methodologies are discussed and presented: i) economic life cycle analysis with input-output tables, ii) structural decomposition analysis with input-output tables, and iii) material flow accounting and analysis; all of these applied to the case study of the state of Puebla in Mexico. An academic article derived from chapter 5 was sent for publication in a scientific journal.

Chapters 5 and 6 are developed around the analysis of the carbon footprint caused by electricity usage in the eighty industrial and commercial sectors of the Mexican economy, reported in the input-output table extracted from the EORA database for the year 2013. For chapter 5, it was calculated the needed electric usage for satisfying

the intermediate and final demand of the Mexican economy; the carbon footprint for each of the eighty sectors mentioned above was calculated by using the national electric emission factor. Subsequently, the national technical coefficients matrix was scaled to the regional scale of the state of Puebla; this scaling together with that of the state's final demand helped the estimation of the direct (production-based) and indirect (consumption-based) emissions derived from the electricity usage of the eighty sectors scaled to Puebla's economy.

Continuing with the analysis of the electric carbon footprint using the input-output table, chapter 6 presents the results of the structural decomposition analysis. The purpose of this analysis was to identify the level of influence that fluctuations in final demand and technological changes had in the variation of final production in each of the eighty studied sectors, both in Mexico and Puebla, comparing the years 2008 and 2013. Productive links were also estimated for each of the sectors. The analysis of the indirect influence on the carbon footprint given the electricity usage of the eighty sectors studied for the Mexican and Puebla economies was obtained by calculating the level of influence of the final production and the productive links of each sector.

Chapter 7 offers a prospect of community metabolism by using the material flow accounting methodology, through which intensive and extensive indicators of the use of materials by Mexico's and Puebla's economies have been obtained from 2004 to 2017. These indicators allow determining the metabolic profiles of Mexico's (country) and Puebla's (state) economies.

Finally, it is important to note that all the analysis proposed in this thesis using the state of Puebla as a case study, can easily be replicated for other states or regions of Mexico (or other countries) as long as the necessary information is available for the development of methodologies.

RESUM

A nivell mundial la generació d'energia és la principal causa antropogènica d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH), la qual en la seva majoria segueix dependent dels combustibles fòssils. En el 2018, el 30% de les emissions de CO₂ a nivell mundial van ser causades per l'ús de carbó per a la generació d'electricitat (IEA, 2019). En el cas de Mèxic i els seus estats aquesta situació no és diferent, ja que la generació d'energia, principalment elèctrica, és la major causant d'emissions de gasos d'efecte hivernacle. En aquest context resulta ineludible la quantificació i l'enteniment de la petjada de carboni causada pel consum eclèctic tant a nivell nacional com regional (estats, municipis o ciutats). La importància de quantificar la petjada de carboni a nivell regional rau en la necessitat que els estats, municipis i ciutats han de sumar a la comptabilitat nacional d'emissions, per al compliment de les metes nacionals i compromisos internacionals adquirits per Mèxic a l'ratificar l'Acord de París. Mentre que la rellevància d'analitzar la composició d'aquesta petjada de carboni rau en comprendre l'origen de les emissions amb la finalitat de buscar accions de mitigació a la mida de cada regió i per a cada un dels seus sectors econòmics. En resposta a aquestes dues necessitats, en aquesta tesi s'utilitza l'anàlisi econòmica de cicle de vida per quantificar la petjada de carboni elèctrica de vuitanta sectors de l'economia regional de l'estat de Puebla a Mèxic. No obstant això, no només la comptabilitat de la petjada de carboni és rellevant a l'hora de pretendre comprendre els impactes ambientals causats per les activitats econòmiques d'un país o regió. També és primordial quantificar i entendre el flux de materials i indicadors derivats d'aquesta quantificació, ja que els indicadors intensius i extensius del flux de materials poden servir com una mesura de la pressió

que l'economia exerceix en el medi ambient a l'explotar els recursos naturals i com una font potencial de contaminants a l'aire, aigua i sòl. Sota aquest context, en la present tesi es pren com a cas d'estudi l'estat de Puebla a Mèxic i es desenvolupa al voltant de les següents preguntes d'investigació:

1. Quina és la petjada de carboni generada donat el consum elèctric de Mèxic i Puebla l'any 2013? Quins són els sectors amb major petjada de carboni?
2. Com l'estructura econòmica de Mèxic i Puebla i els seus intercanvis inter-industrials influeixen a la petjada de carboni elèctrica de les dues regions?
3. Com influeixen els canvis tecnològic i de demanda final a la petjada de carboni elèctrica de Mèxic i Puebla?
4. Com el context macro-econòmic de Mèxic va impactar en el perfil biofísic de Mèxic i Puebla en el període 2004 - 2017?

Aquesta tesi doctoral està estructurada al voltant de tres capítols medul·lars; 5, 6 i 7. En cada un d'aquests capítols es discuteix i presenten els resultats obtinguts de l'anàlisi quantitativa derivada de l'aplicació de tres metodologies; i) anàlisi econòmica de cicle de vida amb taules input-producte, ii) anàlisi de descomposició estructural amb taules input-producte i iii) comptabilitat i anàlisi de flux de materials, tots aquests aplicats a el cas d'estudi de l'estat de Puebla a Mèxic. Del capítol 5 va derivar un article acadèmic enviat per publicació en una revista científica.

Tant el capítol 5 com el 6, es desenvolupen al voltant de l'anàlisi de la petjada de carboni causada pel consum d'electricitat dels vuitanta sector industrial i comercials de l'economia mexicana, reportats en la matriu input producte de la base de dades de EORA , per a l'any 2013. per al capítol 5, es calcular el consum elèctric necessari per satisfaci la demanda intermèdia i demanda final de l'economia mexicana, amb

l'ús de l'factor d'Emissions elèctric nacional es calcula la petjada de carboni per a cada un dels vuitanta Sectors abans esmentats. Posteriorment es esglaió la matriu de coeficients tècnics nacional a l'escala regional de l'estat de Puebla, amb DIT escalament juntament amb el de la demanda final de l'estat, va ser possible estimar les Emissions directes (basades en la producció) i les indirectes (basades en el consum) derivada de l'consum elèctric dels vuitanta Sectors escalats a l'economia poblana.

Continuant amb l'anàlisi de la petjada de carboni elèctrica, amb l'ús de la matriu input producte, en el capítol 6 es presenten els resultats de l'anàlisi de descomposició estructural. Aquesta anàlisi va tenir com a objectiu identificar el nivell d'influència que van tenir les fluctuacions en la demanda final i els canvis tecnològics en la variació de la producció final de cada un dels vuitanta sectors estudiats, tant a Mèxic com a Puebla, comparant l'any 2008 amb el 2013. També es van estimar els enllaços productius per a cada un dels sectors. Al calcular el nivell d'influència de la producció final i els enllaços productius de cada sector es genera l'anàlisi de la influència indirecta en la petjada de carboni donat el consum elèctric dels vuitanta sectors estudiats per a l'economia mexicana i poblana.

El capítol 7 ofereix la perspectiva del metabolisme comunitari, usant la metodologia de comptabilitat de fluxos de materials, amb la qual s'han obtingut indicadors intensius i extensius de l'ús de materials per part de l'economia mexicana i poblana des del 2004 fins al 2017. aquests indicadors permeten determinar els perfils metabòlics de l'economia de Mèxic (país) i de Puebla (estat). Finalment és important esmentar que tota l'anàlisi plantejada en aquesta tesi usant com a cas d'estudi l'estat de Puebla, pot ser fàcilment replicable per a altres estats o regions de Mèxic (o d'altres països) sempre que es compti amb la informació necessària per al desenvolupament de les metodologies.

ACRÓNIMOS

AP	Acuerdo de París
BANXICO	Banco de México
Buss	Sector de servicios de apoyo empresarial (por sus siglas en inglés, <i>business and support services</i>)
C&F	Sector de instituciones de crédito y el sector financiero (por sus siglas en inglés, <i>credit and finance</i>)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICC	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CND	Contribución Nacionalmente Determinada
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
COP	Conferencia de las Partes
DE	Extracción doméstica (por sus siglas en inglés, <i>domestic extraction</i>)
DMC	Consumo doméstico de materiales (por sus siglas en inglés, <i>domestic material consumption</i>)
DMI	Entrada doméstica de material (por sus siglas en inglés, <i>domestic material input</i>)
DPO	Producción doméstica procesada (por sus siglas en inglés, <i>domestic processed output</i>)
Edu	Servicios educativos (por sus siglas en inglés, <i>education</i>)
EIO	Análisis económico insumo-producto (por sus siglas en inglés, <i>economic input-output</i>)
EIO-LCA	Análisis económico del ciclo de vida del insumo-producto (por sus siglas en inglés, <i>economic input-output life cycle assesment</i>)
ENCC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
EUROSTAT	Oficina Estadística de la Unión Europea
EW-MFA	Análisis de flujo de materiales a nivel económico (por sus siglas en inglés, <i>economy-wide material flow analysis</i>)
EW-MFI	Indicadores de materiales para toda la economía (por sus siglas en inglés, <i>economy-wide material flow indicators</i>)
F&B	Sector de servicios de preparación de alimentos y bebidas (por sus siglas en inglés, <i>food and beverage</i>)

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FD	Factor de desacoplamiento
FE	Factor de emisiones
FLQ	Coeficientes de localización de Flegg
GEI	Gases de efecto invernadero
Gov	Sector gobierno (por sus siglas en inglés, <i>government</i>)
HdC	Huella de carbono
HDI	Índice de desarrollo humano (por sus siglas en inglés, <i>human development index</i>)
IEA	International Energy Agency
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información
INEGyCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero
INPC	Índice Nacional de Precios al Consumidor
ISO	Organización Internacional de Normalización
LCA	Análisis de ciclo de vida (por sus siglas en inglés, <i>life cycle analysis</i>)
LCGCC	Ley General de Cambio Climático
LQ	Coeficientes de localización (por sus siglas en inglés, <i>location quotients</i>)
Med	Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados (por sus siglas en inglés, <i>medical services</i>)
MEFA	Análisis de flujo de materiales y energía (por sus siglas en inglés, <i>material and energy flow analysis</i>)
MFA	Análisis de flujo de materiales (por sus siglas en inglés, <i>material flow analysis</i>)
MRV	Medición, reporte y verificación
MMTCO_{2e}	Millones de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PECC	Programa Especial de Cambio Climático
PIB	Producto interno bruto
PL	Enlaces productivos (por sus siglas en inglés, <i>productive linkages</i>)

PTB	Balanza física comercial (por sus siglas en inglés, <i>physical trade balance</i>)
RD	Relación de desacoplamiento
SDA	Análisis de descomposición estructural (por sus siglas en inglés, <i>structural decomposition analysis</i>)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SE	Secretaría de Economía
SINACC	Sistema Nacional de Cambio Climático
SOSTENIPRA	Sustainability and Environmental Prevention Research Group
Sto	Servicios de almacenamiento (por sus siglas en inglés, <i>storage</i>)
Trk	Sector de autobuses y camiones (por sus siglas en inglés, <i>trucking</i>)
WRI	World Resource Institute

PARTE I: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

1. Presentación de la tesis

1.1. Objetivo, preguntas de investigación y justificación

Objetivo principal:

Analizar, a través del uso de herramientas de ecología industrial y bajo un enfoque sistémico, la economía de México y Puebla, así como cuantificar su impacto al medio ambiente y uso de recursos naturales con la finalidad de identificar oportunidades de mejora en las políticas y acciones de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y conservación de recursos naturales en la búsqueda de alcanzar las metas y compromisos nacionales de mitigación y conservación.

Objetivos específicos:

1. Cuantificar y analizar el impacto ambiental en términos de huella de carbono dado el consumo eléctrico de las cadenas productivas de los sectores industriales y comerciales de México y Puebla, considerando la estructura económica e intercambios entre industrias de ambas regiones.
2. Identificar las principales causas que influyen a la huella de carbono eléctrica de las cadenas productivas de México y Puebla.
3. Analizar el perfil biofísico de México y Puebla a través de la identificación y cuantificación del flujo de materiales como resultado de la actividad económica de ambas regiones.

Preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es la huella de carbono generada dado el consumo eléctrico de México y Puebla en el 2013? ¿Cuáles son los sectores con mayor huella de carbono?
2. ¿Cómo la estructura económica de México y Puebla, así como sus intercambios entre industrias, influyen a la huella de carbono eléctrica de ambas regiones?
3. ¿Cómo influyen los cambios tecnológicos y de demanda final a la huella de carbono de México y Puebla?
4. ¿Cómo el contexto macro-económico de México impactó en el perfil biofísico de México y Puebla del 2004-2017?

1.2 Justificación

La motivación de aplicar herramientas de ecología industrial para estudiar los impactos de la economía poblana surge de haber identificado la necesidad de los gobiernos locales de medir, reportar y verificar, de una manera relativamente accesible pero concisa, los impactos ambientales derivados de sus actividades de extracción de recursos naturales, producción, consumo, acumulación de bienes y servicios traducidas a emisiones de gases de efecto invernadero. La necesidad de medir, reportar y verificar de manera concisa surge del compromiso que los países Parte del Acuerdo de París tienen de preparar y comunicar sus contribuciones nacionalmente determinadas (NDC) las cuales deben reflejar e integrar los esfuerzos nacionales y locales, realizados en cada país. Se sabe que México es un país no Anexo I en el acuerdo de París y a su vez pionero en Latinoamérica, por lo que consideramos que, al proponer metodologías accesibles de medición, éstas tendrían el potencial de ser replicadas (total o parcialmente) en todo México u en otros países de la región.

1.3 Estructura de la tesis

De acuerdo con lo explicado en el prefacio, la presente tesis doctoral está construida en torno a un núcleo formado por los tres capítulos en la sección de resultados mismos que son estudios cuantitativos basados en metodologías de ecología industrial. De este modo, su estructura es la siguiente:

El documento tiene cuatro partes. La primera parte abarca del capítulo 1 al 4 y consiste en una introducción al tema del proyecto de investigación, seguido del contexto de México y Puebla, y del marco teórico que permite al lector familiarizarse con los conceptos y metodología que en este trabajo se enmarca, así como un listado de los requerimientos de datos y sus fuentes.

La segunda parte comprende los tres capítulos con la aplicación cuantitativa de las herramientas de ecología industrial. El capítulo 5, “Huella de carbono con ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla”, se enfoca en la identificación de los sectores de la economía poblana con mayores emisiones de gases de efecto invernadero GEI dado su consumo eléctrico necesario para satisfacer la demanda final del estado. El capítulo 6, “Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto y análisis participativo de agentes relevantes en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México)”, está basado en los resultados del capítulo 5; a manera de continuación de este último, se analiza cuáles son las causas principales que influyeron a los cambios en la huella de carbono eléctrica de Puebla, comparando el año 2008 con el año 2013. Así mismo, se analizan los enlaces productivos de los 80 sectores de la economía poblana, con el uso de tablas insumo-producto (al igual que en el capítulo 5). Por último, en el capítulo 7, “Flujo de materiales, análisis de

intensidad de recursos y desacoplamiento: el caso de México y el estado de Puebla”, se cuantifica el flujo de materiales (biomasa, metales, minerales y combustibles fósiles) de México y Puebla del año 2004 al 2017 y se analizan los indicadores extensivos, intensivos y el desacoplamiento de ambas regiones.

En la tercera parte, compuesta por el capítulo 8 que está dedicada a la discusión de los resultados en su conjunto y recogiendo las conclusiones con una visión global del tema y tratando de dar respuesta a las preguntas de investigación. Finalmente, la cuarta parte cierra el documento con el capítulo 9 y 10 que incluyen las referencias, anexos y una sección de difusión del conocimiento asociada a esta tesis doctoral.

En la tabla 1.1 se sintetiza la relación entre las preguntas de investigación, con los objetivos específicos y los capítulos de esta tesis.

Tabla 1.1 Relación entre preguntas de investigación, objetivos específicos y capítulos

Pregunta	Objetivo específico	Capítulo
1. ¿Cuál es la huella de carbono generada dado el consumo eléctrico de México y Puebla en el 2013? ¿Cuáles son los sectores con mayor huella de carbono?	1	5
2. ¿Cómo la estructura económica de México y Puebla, así como sus intercambios entre industrias, influyen a la huella de carbono eléctrica de ambas regiones?	1	5
	2	6

3. ¿Cómo influyen los cambios tecnológicos y de demanda final a la huella de carbono de México y Puebla?	2	6
4. ¿Cómo el contexto macro-económico de México impactó en el perfil biofísico de México y Puebla del 2004-2017?	3	7

CAPÍTULO 2

2. Contexto general

2.1 Política ambiental y de cambio climático en México e importancia de los gobiernos locales

Tanto la mitigación como la adaptación global ante el cambio climático se han vuelto necesarias e inaplazables. La comunidad científica internacional ha manifestado la inminente necesidad de que todos los países mitiguen sus emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GEI)¹, evitando así el agravamiento de los efectos del cambio climático. El cambio climático representa, para todos los países del mundo, retos significativos, así como dificultades económicas, sociales y ambientales, las cuales impactan a su población, infraestructura, sistemas productivos y ecosistemas, por mencionar algunos. Bajo este contexto, México no es la excepción, se sabe que en México 480 municipios de un total de 2,457 (INECC, 2018a) son altamente vulnerables al cambio climático.

De este modo, en materia de cambio climático, es imprescindible que en México se realice una planeación a largo plazo, pero se actué de inmediato para mitigar GEI, así como para adaptar a la sociedad, ecosistemas, sistemas productivos e infraestructura a los impactos adversos por venir.

¹ Los GEI son el bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (SEMARNAT, 2018a)

En este sentido México creó su Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) la cuál es el instrumento nacional de planeación que precisa la visión de largo plazo y plantea una ruta de acción a diez, veinte y cuarenta años. Esta estrategia orienta la política nacional, estableciendo prioridades y definiendo el marco para identificar las prioridades a nivel federal y estatal. Al mismo tiempo la ENCC es una herramienta para el desarrollo sustentable, la cual aspira a que el país crezca de manera sostenible promoviendo el manejo sustentable y equitativo de los recursos naturales y el uso de energías limpias y renovables buscando así un desarrollo con bajas emisiones de GEI. Para alcanzar dicha visión la ENCC define los pilares de la política nacional de cambio climático que sostienen los ejes estratégicos en materia de mitigación y adaptación los cuales a su vez conducen al país, a sus estados y municipios hacia un aumento de sus capacidades de adaptación y a un desarrollo con bajas emisiones de GEI.

A continuación, la Figura 1 muestra la estructura general de la ENCC incluyendo los ejes estratégicos de adaptación al cambio climático (A1-A3) y del desarrollo bajo en emisiones (MI-M5) así como los pilares para la construcción de una política climática en México (P1-P6). Se puede decir que la presente tesis contribuye de manera indirecta a impulsar los dos ejes estratégicos del desarrollo bajo en emisiones M1 y M2, pues los capítulos 5 y 6 presentan los resultados derivados de la cuantificación de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla en México dada cierta estructura económica y enlaces productivos de los sectores industriales de la región, ofreciendo un método de cuantificación de emisiones accesible a nivel regional sugiriendo que las acciones de eficiencia energética y uso de energías limpias a nivel local son cruciales para lograr las metas de mitigación nacional. Así mismo, el capítulo 5 y 7 proponen métodos alternativos de medición tanto de emisiones como del uso y explotación de recursos naturales, respectivamente, los

cuales, de manera complementaria, pueden contribuir a las herramientas de medición ya existentes en el país, necesarias para cumplir con el pilar P5 de la ENCC.

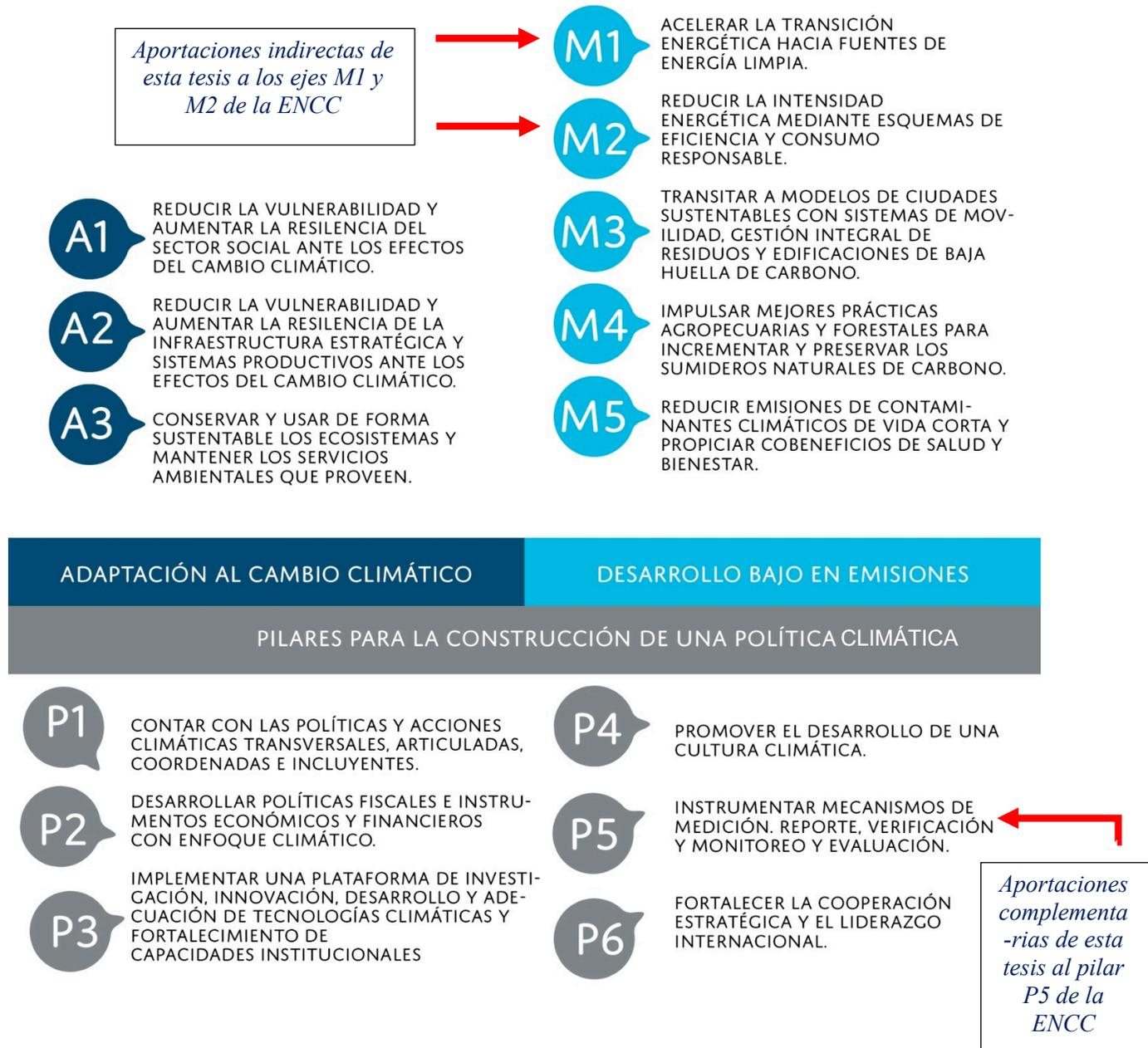


Figura 1. Estructura de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y aportaciones de esta tesis.

Fuente: Adaptación de SEMARNAT, 2013.

Para lograr los objetivos de mitigación y adaptación en México, es necesaria una política nacional robusta y coordinada, por lo que las líneas de acción planteadas en

la ENCC requieren la integración de esfuerzos de los tres órdenes de gobierno, es decir, la participación federal, estatal y municipal.

México se ha comprometido en a través de su Contribución Nacionalmente Determinada (CND) a mitigar un 30% de emisiones respecto a la línea base en 2020 y 50% en 2050 en relación con las emisiones del año 2000, este reto requiere de transformaciones estructurales significativas. A pesar del enorme reto, la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que entró en vigor en el 2012, es una muestra de la decisión del gobierno mexicano de enfrentar la complejidad del desafío.

Los gobiernos locales desempeñan un papel clave en la acción climática, ya que se estima que entre el 50% y 80% de las acciones de adaptación y mitigación ya se han implementado a nivel regional y local (Regions42D, 2016). Al mismo tiempo, una acción local efectiva requiere de políticas climáticas nacionales coordinadas. De este modo, los gobiernos nacionales tienen un papel crucial en el establecimiento e implementación de un marco de política climática nacional incluyente que transforme los compromisos globales en objetivos y metas nacionales robustas, las cuales comprendan a las regiones locales (estados, municipios y ciudades). Esto es esencial para evitar la desalineación de políticas y la distorsión de prioridades tanto en la escala federal como local. Aún existe escases de los datos de mitigación de GEI de estados, municipios y ciudades, o aún no se han reportado de manera comparable debido a una variedad de desafíos financieros, regulatorios y de capacidad. Identificar e informar las emisiones y mitigación de GEI a nivel local, así como los indicadores y puntos de referencia relevantes para la transición a economías bajas en carbono, es crucial para la rendición de cuentas y garantizar que los gobiernos nacionales estén en camino a alcanzar los objetivos nacionales que se han fijado para lograr el Acuerdo de París.

La LGCC de México, en su artículo 8 y 9, establecen que los gobiernos de estados y municipios (incluyendo a Puebla), deben elaborar e integrar la información de sus

fuentes emisoras de GEI, para ser incorporadas al Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI). Asimismo, tanto la ENCC como la LGCC contemplan la necesidad de implementar mecanismos de medición, reporte y verificación (MRV) de las metas de mitigación y al cambio climático.

Bajo este esquema, con la presente tesis y su metodología, se ofrece una alternativa accesible y complementaria a los instrumentos de medición ya existentes (como el antes mencionado INEGyCEI) de las emisiones de GEI de México de sus estados y municipios. Así mismo, proponemos un enfoque de análisis sistémico basado en herramientas de ecología industrial (ver sección 4.1), incluyendo análisis económico del ciclo de vida del insumo-producto (EIO-LCA por sus siglas en inglés, *economic input-output life cycle assessment*), análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés, *life cycle assessment*), análisis de descomposición estructural con insumo-producto (SDA-IO por sus siglas en inglés, *input-output structural decomposition analysis*) y el análisis de flujo de materiales (MFA por sus siglas en inglés, *material flow analysis*), con sus respectivas submetodologías necesarias para ser adaptadas al caso de México, especialmente al territorio y economía del estado de Puebla.

Es importante mencionar que, con el análisis realizado, a través del enfoque sistémico de comprensión de la economía física (uso de recursos), Puebla y cualquier estado de la república mexicana puede identificar cuáles son las formas más eficientes de cumplir con sus obligaciones de sumar a la CND de México. De este modo, la metodología propuesta sirve para cuantificar, entender y analizar el impacto ambiental en términos de emisiones y uso de recursos naturales a nivel local, tomando como caso de estudio el estado de Puebla. La presente metodología puede ser fácilmente replicable para cualquiera de los 32 estados de la República Mexicana u otros casos locales fuera de México, siempre y cuando exista la

información y datos básicos necesarios (para mayor detalle de los datos requeridos ver la sección 4 referente al marco teórico, metodología y datos requeridos).

CAPÍTULO 3

3. Contexto de México y Puebla

3.1 México ante el cambio climático, contexto internacional y marco regulatorio

México es un país particularmente vulnerable ante los impactos del cambio climático dadas sus características geográficas, sumado a esto, sus particularidades socioeconómicas y ambientales tienden a intensificar las amenazas. De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2018), el 20% de los municipios de México son altamente vulnerables ante el cambio climático.

3.1.1 Acuerdo de París y Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)

El Acuerdo de París (AP) es un instrumento que se derivó de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), específicamente se originó en la Conferencia de las Partes (COP 21) en diciembre del 2012. El AP busca integrar las propuestas de los países para combatir el cambio climático, así como apremiar y vigorizar las acciones e intervenciones necesarias para alcanzar un futuro sostenible con bajas emisiones de GEI. De este modo, el AP es el primer instrumento que logra que los países sumen esfuerzos para mitigar emisiones de GEI y adaptarse a los efectos del cambio climático.

Así, el objetivo primordial del AP es fortalecer la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, al mantener el aumento de la temperatura del planeta Tierra por debajo de los 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales en este siglo, y persistir en los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1.5 grados centígrados. Dada la situación descrita, el AP requiere que todos las Partes sumen esfuerzos y compromisos a través de sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC). Por ello, es obligación de todas las Partes informar periódicamente acerca de sus emisiones y sobre sus esfuerzos de instrumentación de política climática. Del mismo modo, plantea la generación de un inventario global cada cinco años para para informar sobre medidas individuales de cada país Parte, así como poder evaluar el progreso colectivo hacia el logro de un mismo propósito (UNFCC, 2019).

En el año 2015, México reportó en su Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) que el país emitió 700 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e), es decir, un incremento de 54% con respecto a las emisiones de 1990. Del total de estas emisiones, 64% correspondieron al consumo de combustibles fósiles, 10% a los sistemas de producción pecuaria, 8% a los procesos industriales, 7% al sector residuos, 6% a las emisiones fugitivas por extracción de petróleo, gas y minerías, y 5% a actividades agrícolas (INECC, 2015). De acuerdo con el WRI, en el 2017 México fue el 10º país con mayores contribuciones de emisiones de GEI a nivel global (WRI, 2017). En este contexto, México ratificó el AP en diciembre de 2016 comprometiéndose a reducir el 22% de sus emisiones de GEI al 2030 respecto a la línea base y el 51% de sus emisiones de carbono negro a través de su CND antes mencionada. Las reducciones de GEI están diferenciadas a nivel sectorial, de acuerdo con las siguientes metas: generación eléctrica 31%, residuos 28%, transporte 18%, residencial y

comercial 18%, petróleo y gas 14%, agricultura y ganadería 8%, e industria 5% (INECC, 2018b).

3.1.2 Participación y alianzas internacionales de México en materia de cambio climático, 2012-2020

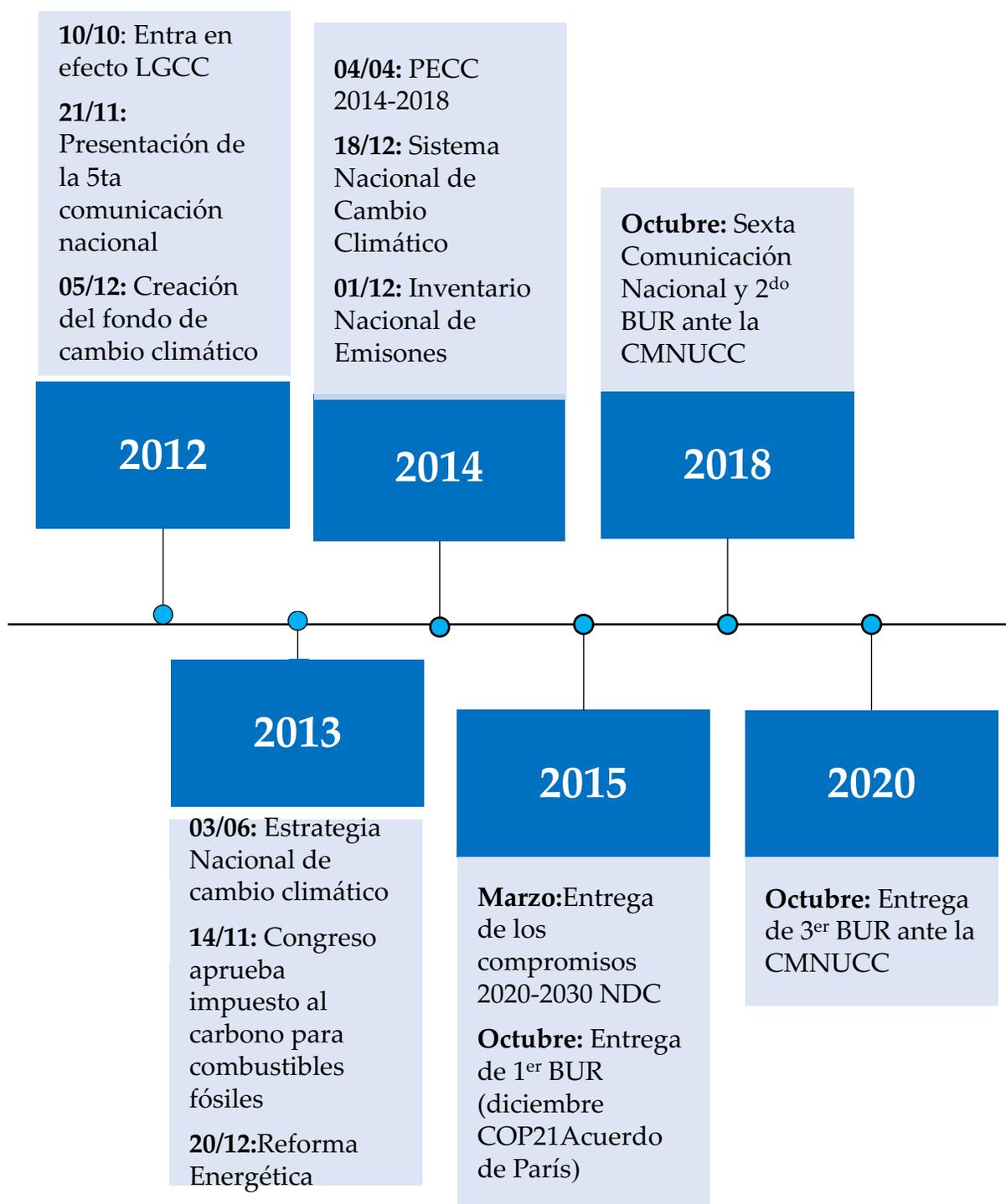


Figura 2. Línea del tiempo de la participación y alianzas internacionales de México en materia de cambio climático, 2012-2020. Adaptación de (SEMARNAT, 2018b)

Como muestra la figura 2, la Ley General de Cambio Climático (LGCC) fue aprobada por el congreso mexicano el 2012, marcando así las directrices para el desarrollo de una política climática nacional integral y organizada, así mismo, se presentó la quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). El 2013 fue un año crucial para la política ambiental en México ya que se instaló la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, así como el Consejo de Cambio Climático. Así mismo, se publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático y se presenta la iniciativa de la Reforma Energética, misma que tuvo tres objetivos principales: 1) Bajar los costos de los recibos de la electricidad y el gas. 2) La creación de nuevos empleos en el sector eléctrico y 3) Darles mayor libertad a las empresas nacionales. Petróleos Mexicanos y a Comisión Federal de Electricidad, en sus decisiones para que se modernicen y den mejores resultados (Diario Oficial de la Federación, 2013). Posteriormente, en el 2014, México lanzó su Programa Especial de Cambio Climático (PECC) para el período 2014-2018, el cual es un instrumento de planeación de política nacional de Cambio Climático fundado en un modelo de desarrollo sustentable inclusivo en mira hacia una economía baja en carbono (SEMARNAT, 2014). En el año 2015, México aprueba su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC), en diciembre de este mismo año, México ratificó el Acuerdo de París siendo así un país no Anexo I (IMCO, 2016). A finales de 2018 México presentó su Sexta Comunicación y el segundo reporte bienal (BUR II por sus siglas en inglés, *biennial report*) de actualización ante la CMNUCC (SEMARNAT, 2018b), de este modo, a finales del 2020 deberá preparar su tercer BUR.

3.1.3 Sector eléctrico en México

El sector eléctrico de México se ha transformado durante la última década. El principal cambio ha sido pasar de un modelo monopólico, al ser la Comisión Federal de Electricidad (CFE) la única empresa productora y comercializadora de la energía eléctrica en México, a un mercado de libre competencia de producción, gracias a la Reforma Energética de 2013 como lo muestra la figura 2. Ante un entorno económico internacional débil y al aumento de las necesidades de la población mexicana, este nuevo modelo responde a una economía en desarrollo con cada vez mayores retos para lograr la seguridad energética del país. La CFE, es una empresa del estado mexicano encargada de generar, distribuir, transmitir y comercializar la energía eléctrica en todo México, fue fundada en 1937 (CFE, 2020). Hoy en día la CFE continúa siendo la encargada de transmitir, distribuir y comercializar la energía eléctrica en todo el país, sin embargo, la participación en la producción por parte del sector privado ya está permitida (SENER, 2017b). Si bien la distribución de electricidad sigue siendo una atribución federal, la generación de energía con el uso de fuentes limpias sí es de injerencia local.

Respecto a la matriz energética de México, en la ENCC, se plantea que se tiene la meta nacional de descarbonizar la matriz de producción eléctrica, es decir, aumentar la participación de fuentes renovables en la producción de electricidad. Específicamente la meta es alcanzar el 35% de la generación eléctrica proveniente de fuentes limpias al 2030 y al menos el 50% de la generación de energía eléctrica al 2050 (SEMARNAT, 2013).

3.1.4 Política nacional de cambio climático e instrumentos regulatorios

3.1.4.1 *Sistema Nacional de Cambio Climático*

La LGCC dicta la creación del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC), con el objetivo de lograr una exitosa coordinación entre los distintos tres órdenes de gobierno (federación, estados y municipios) así como la cooperación entre los sectores público, privado y social. El SINACC propicia las sinergias necesarias para disminuir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia del país ante el cambio climático, así como fundar las acciones prioritarias de mitigación de GEI. Como se puede ver en la figura 3, el SINACC está integrado por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Consejo de Cambio Climático (C3), las 32 entidades federativas o estados (entre los cuales se encuentra Puebla), las asociaciones de autoridades municipales, y el Congreso de la Unión.



Figura 3. Sistema Nacional de Cambio Climático de México. Fuente: Adaptación de SEMARNAT (2013)

México ha expedido diversos instrumentos jurídicos, normativos y de política pública, así como en los arreglos institucionales necesarios para enfrentar el cambio climático en el país, mismos que son relevantes para contextualizar con más detalle la presente tesis, tales como:

- La Ley General de Cambio Climático (LGCC)
- La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

- La Ley de Transición Energética (LTE)

Se puede decir que estas tres leyes enmarcan el contexto de la relevancia, objetivo y justificación de la presente tesis doctoral.

3.1.4.2 Ley General de Cambio Climático

La LGCC es el principal instrumento de política pública con el que cuenta México para afrontar el cambio climático. Esta entró en vigor en 2012 y tiene como objetivo regular, fomentar y facilitar la instrumentación de la política pública nacional de cambio climático incorporándose a acciones de mitigación y adaptación. La LGCC, establece que los gobiernos locales, es decir, estados y municipios, deben elaborar e integrar la información de sus fuentes emisoras de GEI, para ser incorporadas al Inventario Nacional de Emisiones, así como integrar su respectivo inventario estatal de emisiones, conforme a los criterios e indicadores elaborados por la federación. Así mismo, dicta que es obligación de los estados generar su Plan de Acción Estatal de Cambio Climático (PEACC) así como desarrollar estrategias, programas y proyectos integrales de mitigación de GEI. Ente otras, la LGCC también menciona que en la formulación de la política nacional de cambio climático se deben observar los principios de sustentabilidad en el aprovechamiento de los ecosistemas y los recursos naturales que los integran (Diario Oficial de la Federación, 2012).

3.1.4.3 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La LGEEPA es el instrumento mexicano de política ambiental, promulgada en 1988 y cuyo objetivo es regular o el uso del suelo, así como las actividades productivas,

con el fin de proteger el medio ambiente y promover el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. De esta manera, establece un marco general sobre información y participación en asuntos ambientales y la responsabilidad por daño ambiental (Diario Oficial de la Federación, 2015b).

3.1.4.4 Ley de Transición Energética

El objeto de la LTE es regular el aprovechamiento sustentable de la energía en México, así como establecer las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos. Esta ley prevé el aumento progresivo de la participación de las energías limpias en la industria eléctrica con el fin de apoyar a la LGCC al cumplimiento las metas establecidas en materia de generación de energías limpias y de reducción de emisiones de GEI. También la LTE dicta que a la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) le corresponde brindar asesoría técnica en materia de aprovechamiento sustentable de la energía a los estados y municipios de México (Diario Oficial de la Federación, 2015a).

3.1.5 Puebla en el contexto de México

3.1.5.1 Economía de Puebla, tipología industrial, población y descripción general

Como se puede observar en la figura 4, Puebla es uno de los 32 estados de la República Mexicana. Se encuentra en el territorio mexicano centro-oriental (coordenadas 19 ° 00'13 "N 97 ° 53'18" O) y tiene un área total de 34,306 kilómetros

cuadrados (INEGI, 2013). El estado tiene una población total de 5,779,829 habitantes y una densidad de 158.8 habitantes/km², la cual se distribuye en 72% urbano y 28% rural; siguiendo la tendencia nacional de 78% y 22% respectivamente (INEGI, 2010).



Figura 4. Ubicación geográfica de Puebla (Enciclopedia Britannica, 2007)

Puebla está compuesto por 217 municipios (ver figura 5), agrupados en siete regiones socioeconómicas: I Huachinango, II Región Teziutlán, Ciudad de Serdán, Región III, IV Región San Pedro Cholula, Región V Puebla, Izúcar de Matamoros, Región VI y Región VII Tehuacán (INAFED, 2014).

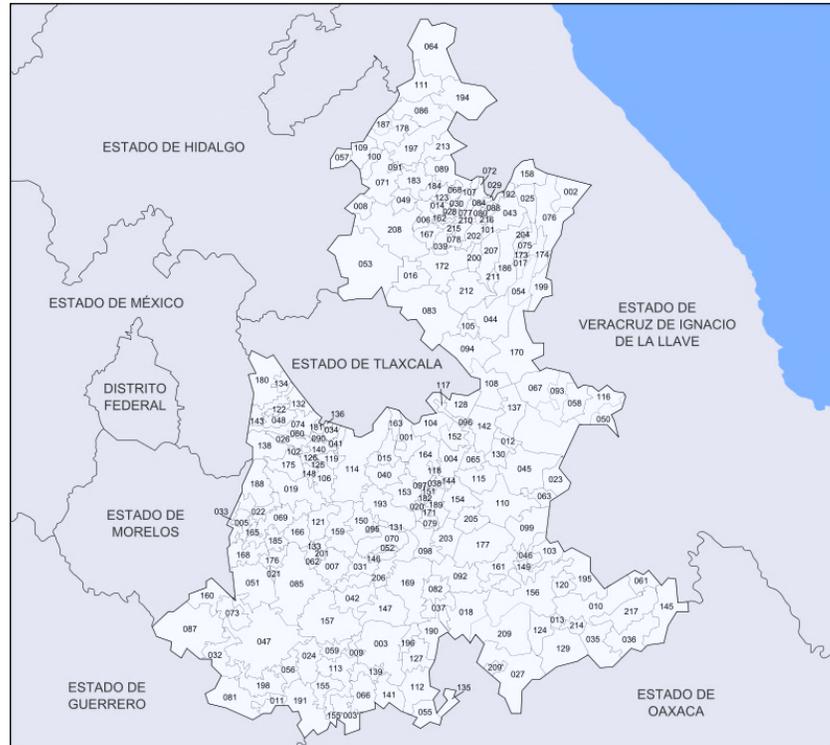


Figura 5. Mapa de los municipios del estado de Puebla en México (Battroid, 2011)

De acuerdo con estadísticas del Banco Mundial (2018), Puebla contribuyó con el 4% (US \$ 1,274 billones)² del PIB mexicano en el 2013 (INEGI, 2018), lo que lo convierte en el séptimo contribuyente más significativo a la economía mexicana (INEGI, 2014). En 2011, el PIB de Puebla fue generado principalmente por actividades terciarias (63%), seguido de las actividades secundarias (33%) y de las actividades de producción primaria (4%) (INEGI, 2011b)³. Según los datos de la Secretaría de

² Considerando el precio de cierre del dólar a 13.08 pesos al 31 de diciembre de 2013 de acuerdo con datos del Banco de México (BANXICO).

³ **Actividades primarias:** Son aquellas actividades que satisfacen una necesidad y requieren el uso de elementos o procesos naturales. Las cinco actividades principales son la agricultura, la ganadería, la pesca, la minería y la tala. **Actividades secundarias:** Son aquellas que transforman productos primarios en manufactura. **Actividades terciarias:** Son aquellas que se llevan a cabo para brindarnos diversos servicios y que son indispensables para la implementación de actividades de tipo primario y secundario.

Economía de México, las principales actividades productivas que se desempeñan en Puebla son: los servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles; el comercio de bienes y servicios; la fabricación de maquinaria y equipo; la construcción; y el transporte, correos y almacenamiento (Secretaría de Economía, 2016).

*3.1.5.2 Regulaciones e instrumentos que reflejan la relación
Puebla-México en el contexto del cambio climático*

Puebla es uno de los estados de México que cuenta con una ley de cambio climático, un programa de cambio climático en línea con el Mecanismo de Desarrollo Limpio de México y además cuenta con el fondo Estatal de Cambio Climático (INECC, 2020). Sin embargo, Puebla aún no ha desarrollado un programa estatal en materia de cambio climático (conocidos como PECC), ni ha desarrollado un inventario actualizado y desglosado de emisiones de GEI, a pesar de que la LGCC lo dicta; en consecuencia, en Puebla se debe confiar en los servicios nacionales de información de datos para el desarrollo de su política climática. A pesar de ello, en el primer semestre del 2020 el gobierno de Puebla inauguró la Agencia Estatal de Energía, la cual tiene como objetivo detonar el potencial de producción y acceso a energías limpias, que permitan a Puebla contribuir al desarrollo nacional y así como al cumplimiento de la CND (Gobierno de Puebla, 2020).

CAPÍTULO 4

4.1 Marco teórico y metodologías: Ecología industrial

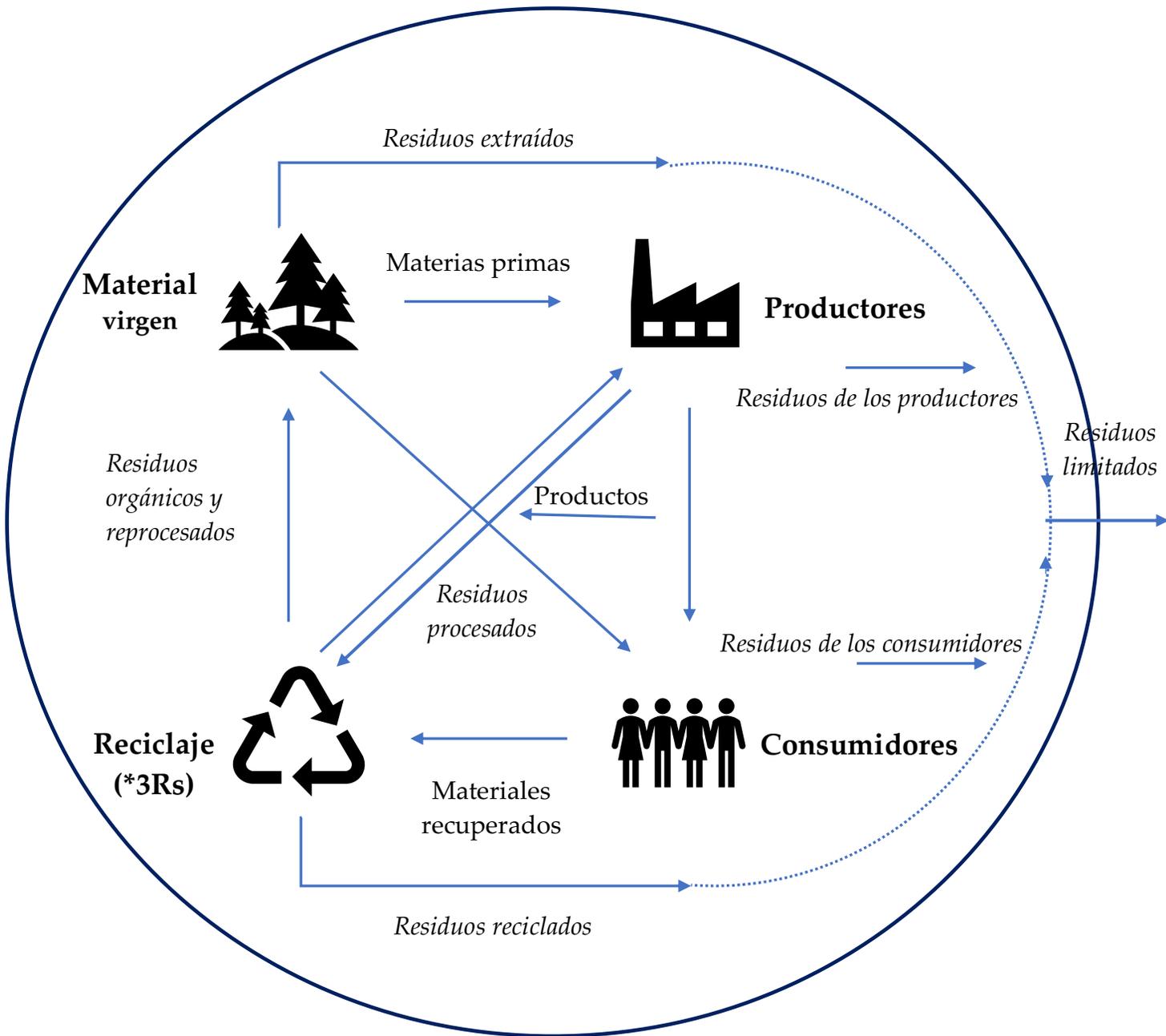
La ecología industrial es un campo de investigación multidisciplinario que estudia el metabolismo de recursos desde un marco sistémico, que incluye el análisis de sistemas, flujos y transformaciones de materiales y energía, analogías con sistemas naturales, entre otras. Robert Ayres, uno de los fundadores de la ecología industrial, define el concepto de metabolismo industrial como la rotación de material y energía de los sistemas industriales (productivos) usando como analogía el metabolismo biológico como "toda la colección integrada de procesos físicos que convierten las materias primas y la energía, más la mano de obra, en productos terminados y desechos" (Ayres, 1994). Así, la ecología industrial se apoya de varias herramientas como el análisis de flujo de materiales (MFA), los métodos del análisis de ciclo de vida, el costo del ciclo de vida (LCC), el ecodiseño y ecoeficiencia, por mencionar algunas. En este sentido, un contexto multidisciplinario es clave para la implementación de la ecología industrial (Garner & Gregory, 1995).

Con el fin de lograr un desarrollo sustentable, las regulaciones de producción y consumo, el comportamiento social, así como el diseño de productos y sus procesos deben estar interrelacionados para así implementar el enfoque de la ecología industrial en los sistemas industrializados (Frosch, 1992). Igualmente, Erkman (1997), afirmó que la ecología industrial es una visión sistémica e integral de todos

los elementos de la economía industrial y sus relaciones con la biosfera⁴. De igual modo, indica que es una ciencia relativamente nueva que hace hincapié en la esencia biofísica de las actividades humanas, es decir, los patrones complejos de los flujos de materiales dentro del sistema industrial, en contraste con los enfoques más comunes que consideran principalmente la economía en términos de unidades monetarias o flujos de energía. De esta forma, la ecología industrial considera la evolución a largo plazo de diversas tecnologías clave como el elemento crucial (pero no exclusivo) para la transición del sistema industrial insostenible a un ecosistema industrial viable. Como se ilustra en la figura 6, la ecología industrial envuelve desde la extracción de materias primas y recursos naturales, pasando por el proceso de producción, uso y consumo hasta llegar al desecho y depósito de residuos. En este sentido, en la presente tesis doctoral se describe la aplicación y uso de dos de las principales metodologías de análisis de la ecología industrial: EIO-LCA y el MFA, ambas enfocadas en los procesos económicos y antropogénicos⁵ del estado de Puebla en México. Así mismo, para medir el impacto ambiental de los procesos industriales de Puebla, se cuantificó la huella de carbono (HdC) derivada del consumo eléctrico de los sectores industriales y comerciales de la región.

⁴ La biosfera está definida como el sistema conformado por todos los seres vivos y ecosistemas del planeta Tierra y sus interacciones (CONABIO, 2020).

⁵ Antropogénico: De origen humano o derivado de la actividad del hombre, por lo que el cambio climático antropogénico se refiere a aquel del que se han recibido señales a partir de la segunda mitad del siglo XX (CICY, revisado en 2020).



*3Rs: reúso, recuperación y reciclaje de materiales

Figura 6. Conceptos básicos de la ecología Industrial. Fuente: Adaptación de Robert, 2004

Según Robert (2004), algunos principios de la ecología industrial son:

- Promover oportunidades para establecer asociaciones y compromisos con las comunidades y el gobierno para desarrollar una actitud más propensa a las prácticas industriales sostenibles.
- Apoyar a las políticas públicas e incentivos a la industria para impulsar la innovación, la colaboración y la comercialización de productos nuevos y mejorados usando excedente de energía y reutilizando materiales.

4.1.1 Análisis de ciclo de vida (LCA) con enfoque ambiental

El LCA es una herramienta de análisis que sirve para cuantificar los impactos ambientales de un bien, servicio, sistema o actividad humana, a los cuales llamaremos producto. Como su nombre manifiesta, este análisis evalúa todo el ciclo de vida del producto, incluyendo la extracción de materias primas o recursos naturales, pasando por el proceso de producción, el uso y consumo hasta llegar al reciclaje y la disposición final de dicho producto. El LCA considera todas las entradas (materiales, energía, recursos naturales) y salidas (emisiones de GEI, desechos sólidos y líquidos) relevantes que impactan al medio ambiente.

Durante las últimas décadas, el marco metodológico analítico del LCA ha ganado reconocimiento y ahora es un método extendido para el análisis ambiental de productos y sistemas. En 1997, la Organización Internacional de Normalización (ISO) publicó la primera versión de las normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006 mismas que define al LCA como:

"Una compilación y evaluación de las entradas, salidas y los posibles impactos ambientales de un sistema de productos a lo largo de su ciclo de vida" (ISO, 2006).

De igual forma, la mencionada norma explica que, para cuantificar los impactos ambientales, es necesario seguir las cuatro fases o pasos mostrados en la figura 7.

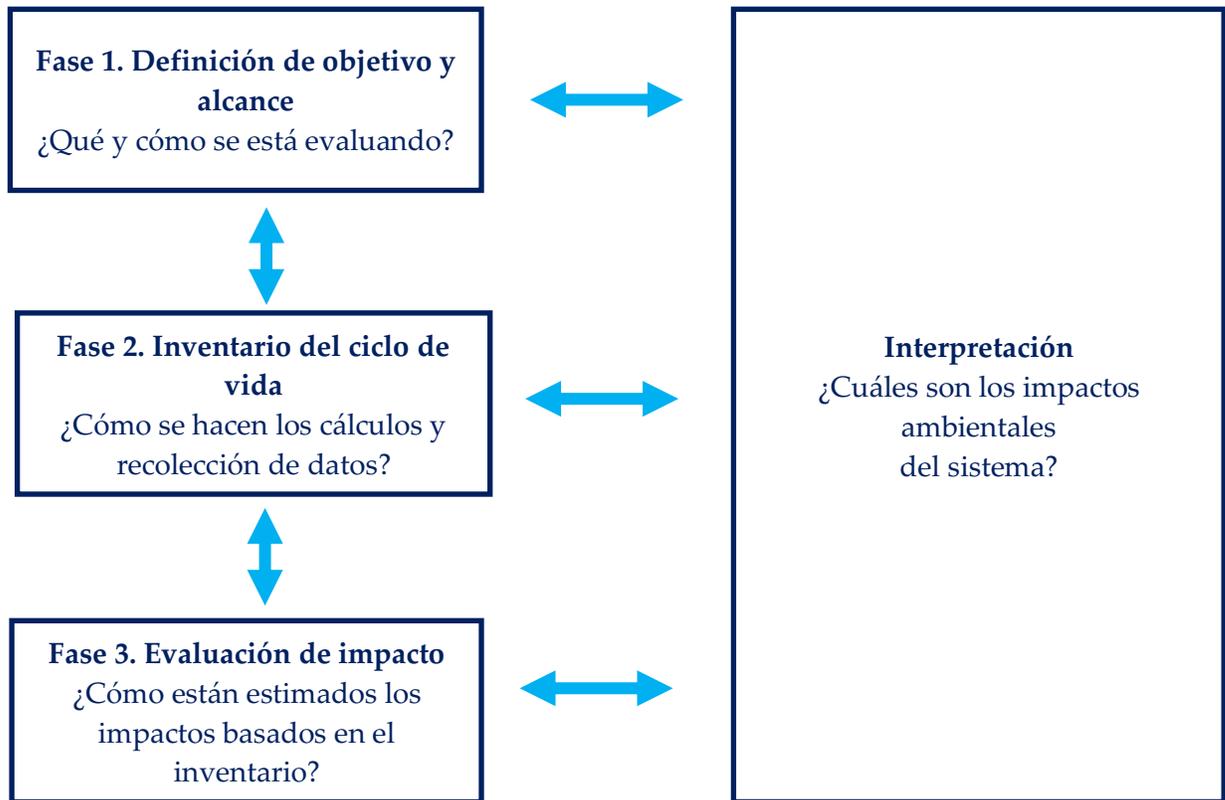


Figura 7. Principales pasos de la metodología análisis de ciclo de vida. Basada en ISO 14040:2006

Fase 1. Definición de objetivo y alcance:

En esta fase se establece el objetivo la justificación y aplicaciones del estudio de manera conjunta. Mientras que el alcance del estudio incluye toda la información relevante sobre la evaluación del bien o servicio a estudiar. Los elementos más importantes del alcance son la definición de la unidad funcional, que es la referencia a la cual se normalizan todas las entradas, salidas y los límites del sistema, estableciendo qué procesos de la unidad deben incluirse dentro del LCA.

Fase 2. Inventario del ciclo de vida:

En esta fase es donde se recaudan los datos acerca de la cantidad de materias primas, recursos naturales y energía usados. También se debe obtener información y datos acerca de tratamientos realizados, residuos y desechos generados, así como las emisiones al aire, agua y suelo. Estos datos de “entradas” y “salidas” deben expresarse por cada proceso unitario, y los datos pueden medirse o calcularse.

Fase 3. Evaluación de impacto:

En esta fase se calculan los posibles impactos ambientales del sistema, bien o servicio a través de un conjunto de categorías de impacto. Para hacerlo, la norma ISO 14040: 2006 define tres pasos necesarios:

- 1) La selección de modelos e indicadores de evaluación de impacto.
- 2) La clasificación de los indicadores de la evaluación de impacto.
- 3) La caracterización de cada elemento a través de los modelos de evaluación de impacto para obtener los resultados.

Fase 4. Interpretación:

Esta fase contiene la explicación de los resultados ambientales obtenidos durante las fases anteriores. Esta interpretación tiene como finalidad la identificación de puntos críticos en el ciclo de vida del bien, servicio o sistema estudiado. También durante la fase de interpretación se pueden aplicar el análisis de sensibilidad. Finalmente, con esta fase se obtienen las conclusiones, limitaciones y sugerencias de mejora del estudio.

Para el caso específico de México se han desarrollado algunos estudios de análisis de ciclo de vida, como por ejemplo la tesis doctoral “Análisis de la sustentabilidad

de la eoloelectricidad en México, considerando su ciclo de vida”, así como el proyecto “Una contribución al Inventario de Ciclo de Vida de la Producción de Diésel en México” por mencionar algunos (REMACV, 2020).

4.1.2 Análisis económico del ciclo de vida del insumo-producto (EIO-LCA)

El análisis económico insumo-producto (EIO por sus siglas en inglés, *economic input-output*), fue desarrollado por W.W. Leontief (1936) como el instrumento de interpretación de las interdependencias de los diversos sectores de la economía. Es decir, en el análisis de insumo-producto se considera a cualquier sistema económico como un complejo de industrias mutuamente interrelacionadas. Se considera que toda industria recibe materias primas (insumos) de las demás industrias del sistema (economía estudiada) y que, a su vez, suministra su producción a las demás industrias en forma de materias primas (las industrias extractivas, pongamos por caso), productos manufacturados y/o servicios. Se puede decir que en este análisis se construye un análisis genérico del equilibrio estático del contexto tecnológico de la producción total de una economía, durante el período de tiempo estudiado (generalmente un año).

El modelo está basado en las tablas de insumo-producto que se pueden definir como un conjunto integrado de matrices, que muestran el equilibrio entre la oferta y la demanda de bienes y servicios. Estas matrices proporcionan un análisis detallado del proceso de producción y del uso de los bienes y servicios que se producen en un país o región, o bien que se importan del resto del mundo, y del ingreso generado en dicha producción por las diversas actividades económicas (Schuschny, 2005). En la tabla 4.1 se muestra la estructura básica de una matriz insumo-producto. Es

importante mencionar que generalmente las tablas insumo-producto se expresan como productos por industria donde los sectores de producción de productos i están en las filas y los sectores de la industria j están en las columnas. Esta distinción es importante ya que los supuestos y definiciones de este modelo son que un producto es un bien o servicio básico que se produce ampliamente pero equivalentemente, por ejemplo, el maíz, de modo que todos los fabricantes de productos están bajo el supuesto de que utilizan la misma tecnología, mientras que las industrias, combinan varios insumos de productos o servicios básicos para generar un nuevo producto (Matthews, 2019).

Tabla 4.1. Matriz de interacciones interindustriales (Z) del modelo insumo-producto (IO)

	Insumos al sector				Producción intermedia (o)	Demanda final (y)	Producción total (x) *
Producción por sector	1	2	3	n			
1	Z ₁₁	Z ₁₁	Z ₁₁	Z _{1n}	O ₁	y ₁	X ₁
2	Z ₂₁	Z ₂₂	Z ₂₂	Z _{2n}	O ₂	y ₂	X ₂
3	Z ₃₁	Z ₃₂	Z ₃₃	Z _{3n}	O ₃	y ₃	X ₃
n	Z _{n1}	Z _{n2}	Z _{n3}	Z _{nn}	O ₄	y _n	X ₄
Insumos intermedios (i)	i ₁	i ₂	i ₃	i ₄			
Valor agregado (v)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄		PIB	
Producción total (x) *	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄			

Ejemplificación de la estructura de una tabla insumo-producto. Fuente: Adaptación de Matthews, 2019. *Nota: Es importante notar que la producción total en los modelos IO puede ser tanto la suma de las filas como de las columnas.

Cuadro 4.1. Ecuaciones básicas del modelo insumo-producto

En cualquier modelo insumo-producto, la producción total se puede representar por la suma en cada fila, para cada sector como en la ecuación 4.1.

$$x_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{in} + y_i \quad (4.1)$$

donde

x_i : es la producción total

y_i : es la demanda final compuesta por el consumo final (consumo de hogares, gobierno y creación de capital) más las exportaciones de la región; y

z_{ij} : son las transacciones entre industrias.

Las transacciones entre industrias (z_{ij}) pueden mostrarse como un porcentaje de la producción total de la industria o sector. Para hacerlo, se divide un flujo particular del sector i (fila) al sector j (columna), entre la producción total del sector j , como se muestra en la ecuación 4.2.

$$a_{ij} = z_{ij}/x_j \quad (4.2)$$

donde

a_{ij} : se conoce como el requisito directo o el coeficiente técnico. Este es un número sin unidades que describe los insumos que un sector j requiere del sector i por cada unidad producida.

Al sustituirse (4.2) en (4.1), es posible obtener el sistema de ecuaciones lineales necesario para el modelo insumo-producto. Obteniendo la ecuación 4.3:

$$x_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + y_i \quad (4.3)$$

Es importante notar que cada x_i (en el lado izquierdo de la ecuación 4.3) tiene un término correspondiente a la derecha de la ecuación 4.3. De este modo con la ecuación 4.3 para toda la economía tendríamos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + y_1 \\ x_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + y_2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ x_n &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + y_n \end{aligned} \quad (4.4)$$

De donde, se obtiene la siguiente expresión matricial:

$$\begin{aligned}
 x_1 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2 - \dots - a_{1n}x_n &= y_1 \\
 x_2 - a_{21}x_1 - a_{22}x_2 - \dots - a_{2n}x_n &= y_2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 x_n - a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - \dots - a_{nn}x_n &= y_n
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Agrupando términos semejantes:

$$\begin{aligned}
 (1 - a_{11})x_1 - a_{12}x_2 - \dots - a_{1n}x_n &= y_1 \\
 -a_{21}x_1 + (1 - a_{22})x_2 - \dots - a_{2n}x_n &= y_2 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 -a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - \dots + (1 - a_{nn})x_n &= y_n
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Así es como se puede escribir la ecuación 4.6 en forma de matriz,

$$\begin{bmatrix}
 (1 - a_{11}) & -a_{12} & \dots & -a_{1n} \\
 -a_{21} & (1 - a_{22}) & \dots & -a_{2n} \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 -a_{n1}x_1 & -a_{n2}x_2 & \dots & (1 - a_{nn})x_n
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x_1 \\
 x_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 x_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 y_1 \\
 y_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 y_n
 \end{bmatrix}
 \tag{4.7}$$

La ecuación 4.7 se puede escribir de manera compacta como:

$$(I - A)x = y \tag{4.8}$$

donde

I: es la matriz identidad

A: es la matriz ($n \times n$) de coeficientes técnicos

x: es un vector ($n \times 1$) de producción total

y: un vector ($n \times 1$) de demanda final

En nuestro análisis lo que interesa es calcular la producción total dada la demanda final, por lo tanto, si multiplicamos la inversa de (I-A) por ambos lados de la ecuación 4.8. Entonces obtenemos:

$$\begin{aligned}
 (I - A)^{-1} (I - A)x &= (I - A)^{-1} y \\
 x &= (I - A)^{-1} y
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

Donde $(I - A)^{-1}$ se conoce como la matriz de requisitos totales o matriz inversa de Leontief (L), la cual sirve para calcular los efectos indirectos de la demanda final en toda la economía a manera de "efecto dominó". En otras palabras, L es la expansión de una serie de potencias, por lo que la ecuación 4.9 también se puede expresar como:

$$x = (I + A + AA + A^2 A + A^3 A + A^4 A + A^n A) y \quad (4.10)$$

A partir de esta expresión podemos mostrar el efecto dominó o "niveles" que la demanda final tendrá a lo largo de una economía. Donde cada sumando de la serie se interpreta como las etapas sucesivas del proceso productivo hasta obtener el producto final .

Por lo tanto, la producción directa asociada con la producción de la demanda final es igual a la demanda final más la producción de primer nivel:

$$x_{\text{directa}} = (I + A) y$$

Además, la producción indirecta asociada con la producción necesaria para cubrir la demanda tiende a infinito*:

$$x_{\text{segundo nivel}} = A^2 y$$

$$x_{\text{tercer nivel}} = A^3 y$$

$$x_{\text{enésimo nivel}} = A^n y$$

**Debido a la circularidad de la economía los efectos indirectos tienden a infinito y cada nivel de análisis representa un incremento marginal menor sobre el total de los requerimientos indirectos.*

Fuente: Adaptación de Chávez, 2017 y Matthews, 2019

Una vez definido el LCA y EIO se puede explicar que el EIO-LCA estima los recursos naturales y energéticos necesarios para satisfacer las actividades económicas de un país o región y así calcular los impactos ambientales resultantes de dichas actividades. En otras palabras, el EIO-LCA es una técnica para realizar una evaluación de los impactos ambientales de los bienes, servicios o procesos durante todo su ciclo de vida considerando el proceso productivo y de consumo (final e intermedio) dada la producción de cierta economía (país o subregión).

Este método utiliza los datos acerca de las transacciones interindustriales, es decir, la compra y venta de materiales o servicios de una industria a otras industrias. También usa los datos de las emisiones ambientales directas de las industrias, para estimar las emisiones totales a lo largo de la cadena de suministro procedentes del LCA. De este modo, el EIO-LCA es útil para calcular la huella de carbono derivada de las transacciones interindustriales de una economía cualquiera, necesarias para satisfacer la demanda final de la región a estudiar.

La primera ventaja del enfoque EIO-LCA con respecto al LCA es que bajo este enfoque no se requiere delimitar la frontera del estudio, ya que por defecto el límite es toda la economía por estudiarse y sus efectos relacionados con la producción, incluidos todos los insumos de materiales y energía. La segunda ventaja es que con el uso del EIO-LCA se puede subsanar el error de truncamiento del LCA (Ward, Wenz, Steckel, & Minx, 2017). Y la tercera ventaja es que es relativamente rápido y económico de usarse, una vez se han conseguido todos los datos necesarios. Sin embargo, hay que considerar que con respecto al proceso de modelación de LCA conforme al ISO, antes explicado, los métodos de EIO-LCA son generalmente más útiles como una herramienta de detección en lugar de como el modelo central necesario para responder a los objetivos necesarios de la tarea de LCA, es decir, el modelo EIO-LCA sirve para identificar dónde se producen los mayores impactos en todo el sistema (Matthews, 2019).

Por otro lado, la principal diferencia entre un modelo EIO y un EIO-LCA es que el primero se enfoca en hacer un análisis detallado de la cadena de producción y consumo final y entre industrias producidos en cierto territorio, todo esto en términos económicos sin involucrar los impactos ambientales provocados por dicha producción y consumo. Mientras que el EIO-LCA hace uso de las ventajas de un EIO cuantificando el impacto ambiental de la economía estudiada. Es importante

diferenciar entre un análisis EIO-LCA (usada en este caso de estudio) y el uso del modelo híbrido LCA-IO. Este último incluyen un inventario de ciclo de vida (véase figura 7) para un producto o proceso de producción como una matriz, que se añade a la matriz insumo-producto. Esto no fue así para nuestro caso de estudio, siendo que para el caso de México y Puebla se realizó un análisis de impacto ambiental atribuido a los intercambios entre industrias dada la estructura de sus economías durante un año específico (2013).

El *Green Design Institute* afirma que:

“A menudo es útil desarrollar LCA híbridos que combinen la facilidad y la perspectiva amplia de EIO-LCA con la especificidad de la información para un solo producto o proceso de un LCA basado en procesos. Por ejemplo, uno podría usar técnicas de LCA basadas en procesos para modelar los impactos de los procesos de producción en una instalación dada, pero usar EIO-LCA para modelar los impactos de la cadena de suministro de la electricidad comprada por la instalación. Alternativamente, si se conocen datos específicos sobre una instalación, se podría desglosar un sector industrial dentro de un modelo EIO-LCA en dos sectores: uno que representa la instalación específica y otro que representa al resto de la industria.” (Green Design Institute. Carnegie Mellon University, 2016a)

Bajo este contexto, en esta tesis doctoral, el núcleo de los dos primeros capítulos de la sección de resultados; i) Huella de carbono con ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla y ii) Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto y análisis participativo de agentes relevantes en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México), está basado en el uso de la metodología EIO-LCA.

4.1.2.1 Insumo-producto regional, escalamiento con uso de coeficientes de localización (LQ)

El interés de construir modelos de insumo-producto regional, que consideran las particularidades de las economías de la región (en nuestro caso el estado de Puebla), existe desde las primeras aplicaciones del modelo a nivel nacional, presentándose así un interés en aplicar este enfoque a distintas escalas espaciales, primordialmente a nivel regional. Esto ha generado un conjunto de modelos insumo-producto regional (Asuad, 2019).

Sin embargo, la existencia de información regional y sus cuentas económicas para la construcción de las tablas insumo-producto regional es escasa y aunado al requerimiento significativo de recursos y tiempo para la recaudación de dicha información, se ha propiciado el uso de métodos indirectos regionales para la estimación de tablas insumo-producto. Algunos de estos métodos son:

A. Coeficientes de localización tradicional (LQ)

Estos se usan como medida de la capacidad de la industria i de la región a estudiar de cubrir los requerimientos de la industria regional. Como lo muestra la ecuación 4.11, los LQ miden la participación q_j^r de la región r , con respecto al total de la producción regional q_r , en comparación con una participación de q_j^N a nivel nacional, con respecto al total de la producción nacional.

$$LQ_j^r = \frac{q_j^r / q_r}{q_j^N / q^N} \quad (4.11)$$

donde:

LQ_j^r : coeficiente de localización del sector j en la región r

q_j^r : participación del producto q_j en a la producción total de la región r

q^r : producción total en la región r

q_j^N : participación del producto q_j en a la producción total nacional

q^N : producción total nacional

Los LQ mayores a 1 hacen que el sector sea considerado como una actividad especializada en la regional, es decir, que los requerimientos del producto j para satisfacer la demanda final de la región pueden ser satisfechos por la producción de la misma región, de lo contrario es necesario asumir que parte de los requerimientos deberán ser importados del resto del país, considerándose una región importadora. En este último caso, el coeficiente de localización debe multiplicarse por los coeficientes técnicos nacionales del siguiente modo:

$$a_{ij}^{rr} = LQ_j^r a_{ij}^N \quad (4.12)$$

De manera contraria, si la región es exportadora, es decir, que el coeficiente es mayor a uno, entonces los coeficientes técnicos regionales son iguales a los nacionales, lo cual se expresa así:

$$a_{ij}^{rr} = a_{ij}^N \quad (4.13)$$

En caso de no contar con los datos de producción por sector y totales, es posible calcular los coeficientes de localización con las estadísticas de empleos por sector y aplicar la formula 4.11. Éste fue el caso para el cálculo de los LQ del estado de Puebla para el 2013.

B. Coeficientes de localización reformulado por Flegg (FLQ)

Debido a que los LQ sobreestiman los multiplicadores de la región ya que no toman en cuenta el tamaño relativo de las compras y ventas regionales, Flegg et al. 1994 propusieron incorporar el tamaño económico de las regiones comparándolas con el país, es decir, que los FLQ se pueden expresar como una función de los coeficientes cruzados de localización industrial (CILQ, por sus siglas en inglés) multiplicándose por lambda (λ_r^∂) y por los coeficientes nacionales, del siguiente modo:

$$FLQ_{ij} = (CILQ)(\lambda_r^\partial)(a_{ij}) \quad (4.14)$$

donde

$$\lambda = \left\{ \log_2 \left[1 + \left(\frac{E_I^R}{E_i^n} \right) \right] \right\}^\partial, \quad 0 \leq \partial < 1 \quad (4.15)$$

y donde ∂ es un valor predeterminado de aproximadamente 0.3. La descripción más detallada sobre el exponente ∂ encontrada fue en Flegg et al. (1994), donde se afirma que:

“La inclusión del exponente ∂ en la fórmula introduce un elemento de flexibilidad, lo que significa que la asíntota inferior no tiene que estar limitada al valor arbitrario de $\log_2 2 \approx 0.693$. En cuanto a la elección del valor para ∂ , esto se considera un asunto empírico, que se decidirá sobre la base de estudios de casos que incluyan una comparación de encuestas basadas en coeficientes intrarregionales con los derivados a través de LQ de datos nacionales ”

Sin embargo, para el caso de Puebla no contamos con la base empírica suficiente como para poder usar este método. Además, según Asuad (2019), Bran (1997) criticó la metodología de Flegg, afirmando que los FLQ tienen una base teórica débil. También afirma que:

"...las críticas al modelo FLQ para regionalizar tablas insumo-producto se centran en la estimación de ∂ , porque existen dificultades inherentes para elegir un valor adecuado para esta variable, presentando una base estadística débil. Además, la estimación no permite considerar la congruencia de las identidades contables de la producción y el consumo regionales "

Dado este contexto y la falta de una base empírica robusta, para el escalamiento de la matriz de coeficientes directos de México a nivel Puebla, en esta tesis doctoral se usaron los coeficientes de localización tradicionales.

4.1.3 Análisis de descomposición estructural de insumo-producto

El análisis de descomposición estructural de insumo-producto (SDA-IO, por sus siglas en inglés) es un método conocido que ayuda a analizar dos o más conjuntos de datos económicos de insumo-producto cuando se trata de desglosar la cantidad de cambios de una economía en relación con las contribuciones hechas por sus diferentes componentes (Miller y Blair, 2009). En otras palabras, es un método estático comparativo basado en la comparación de tablas insumo-producto para descomponer el cambio experimentado por la producción de un sistema debido a variaciones causadas por factores exógenos o estructurales (Tarancón-Morán y Ramos-Carvajal, 2005). Al usar SDA-IO es posible analizar la contribución de las variaciones estructurales de numerosos factores, entre ellos: cambios en el empleo, valor agregado, uso de energía, producción bruta, tecnología, demanda final, estructura de producción, población, por mencionar algunos. En esta tesis doctoral, nos enfocamos en los cambios estructurales asociados con la tecnología y en la contribución de la demanda final al comparar la composición estructural de la

economía de Puebla en 2008 y la del 2013 que impactaron a la huella de carbono dado el consumo eléctrico de la región. La razón por la que se analizaron estos dos años es que en el 2008 fue el año de la recesión económica mundial (BBC- History Extra, 2019) y consideramos que habrá variaciones significativas en la composición estructural económica al comparar con 2013, el cuál fue un año de estabilidad económica en México.

Además, se analizó la composición estructural a escala nacional (México) en comparación con la composición estructural a escala regional (Puebla), los detalles de la metodología, discusión y resultados se encuentran en el capítulo 6 “Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto y análisis participativo de agentes relevantes en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México)”, en la sección de resultados.

Es importante aclarar que cuando hablamos de cambios estructurales asociados a la tecnología, nos referimos a un aumento en la eficiencia en la producción de un bien o servicio que resulta en un aumento de la producción, sin implicar un aumento en los insumos requeridos (Rip & Kemp, 1997). Mientras que, con los cambios en la demanda final, nos referimos a variaciones relacionadas con el consumo final (hogares, gobierno y capital) y las exportaciones de la región. Al momento de diseñar políticas enfocadas a la mitigación de GEI, es relevante tener en mente que las mejoras técnicas son más efectivas solo cuando aplican directamente al sector emisor, mientras que las políticas enfocadas a la demanda final son más apropiadas para mitigar las emisiones indirectas de los sectores (Piaggio, Alcántara, & Padilla, 2014).

La aplicación del SDA se ha utilizado previamente para identificar el origen de las variaciones en las emisiones de CO₂ de los Estados Unidos a partir de dos períodos; 1997- 2007 y 2007-2013, por Feng, et.al 2015. En su artículo, los autores evalúan seis factores relacionados a los cambios en las emisiones de los Estados Unidos. Estos

incluyen: volumen de consumo, crecimiento de la población, mezcla de combustible, patrones de consumo, intensidad energética y estructura de producción; concluyendo que de 1997 a 2007, la principal causa influyente de un aumento de las emisiones de los Estados Unidos fue el crecimiento en el volumen de consumo. Mientras que, de 2007 a 2013, las emisiones de los Estados Unidos disminuyeron como consecuencia de una reducción en todos los factores evaluados, excepto para el crecimiento de la población del 11%. El método SDA se puede usar para comparar no sólo dos o más períodos de la misma región (nación, estado o municipio) sino que también se puede usar para hacer un análisis interregional. Por ejemplo, Rueda-Cantuche, en 2006 realizó un SDA-IO para dos regiones españolas; Andalucía y Madrid usando una variación del procedimiento de Skolka, 1989 para el análisis estructural inter-temporal de una región, Rueda-Cantuche concluye que las diferencias del valor agregado entre las dos regiones son una consecuencia del factor comercio, mientras que las diferencias de las tasas de empleo son una consecuencia de las variaciones en la demanda final regional. Sin embargo, en este estudio no se hace un análisis de causas estructurales que influyeron a los impactos ambientales de Andalucía y Madrid durante el periodo estudiado, es decir, el mencionado estudio se centra en un puro análisis económico.

4.1.4 Análisis de enlaces productivos insumo-producto

El análisis de los enlaces productivos (PL por sus siglas en inglés, *productive linkages*) es un método basado en el modelo de insumo-producto de Leontief desarrollado por Chenery-Watanabe a partir de los coeficientes técnicos, y posteriormente por Rasmussen, a partir de los coeficientes totales de la matriz inversa de Leontief (Miller & Blair, 2009). Este análisis considera que la producción de un sector tiene dos

impactos económicos en otras industrias: enlaces hacia atrás y hacia delante. Los enlaces hacia atrás (de arrastre) son los efectos generados bajo el modelo Leontief, desde el enfoque de la demanda, que indica la interconexión (directa y total) de un sector con sus sectores “proveedores” de los cuales compra insumos. Mientras que los enlaces hacia adelante (de empuje) son los efectos generados bajo el modelo Ghosh, desde el enfoque de la oferta, que indica la interconexión (directa y total) de un sector con sus sectores "clientes o usuarios" a los que vende su producción (Miller & Blair, 2009).

Como se muestra en el cuadro 4.1 “Ecuaciones básicas del modelo insumo-producto”, con el modelo de Leontief es posible representar el efecto en cadena de la demanda final (Y) a través de la producción total de una economía (X). Considerando que:

$$\tilde{X} = \underbrace{u'(I + A)}_{\text{Impacto directo}} \hat{Y} + \underbrace{u'(A^2 + A^3 + \dots)}_{\text{Impacto indirecto}} \hat{Y} \quad (4.16)$$

donde

\tilde{X} : refleja la producción directa e indirecta generada por la expansión de la demanda final,

u' : un vector columna unitario,

\hat{Y} : es el matriz que resulta de diagonalizar el vector de la demanda final,

y el resto de las variables han sido definidas anteriormente.

La ecuación 4.16 ilustra los impactos directos e indirectos que tiene el valor agregado total a través de la economía estudiada. De esta forma, los enlaces directos hacia atrás son aquellos relacionados con los requisitos directos obtenidos expresados en la matriz de coeficientes técnicos (A_{ij}), representado por el primer sumando a la

derecha de la igualdad. Mientras que el segundo sumando muestra la producción indirectamente necesaria para satisfacer la demanda final de los distintos sectores.

De manera similar, al usar el modelo Ghosh, es posible representar el efecto en cadena del valor agregado (V) a través de la producción total de una economía (X). Así, los enlaces directos son aquellos relacionados con los coeficientes de distribución directa expresados en la matriz de coeficientes de distribución directa (B_{ij}). Mientras que los enlaces directos totales consideran los coeficientes de distribución directos e indirectos, y estos se obtienen con la matriz de Ghosh.

$$\tilde{X} = \underset{\text{Impacto directo}}{\hat{V}(I+B)u} + \underset{\text{Impacto indirecto}}{\hat{V}(B^2 + B^3 + \dots)u} \quad (4.17)$$

donde

\tilde{X} : refleja el impacto directo e indirecto en toda la economía que provoca la expansión de la producción de cada uno de los sectores,

\hat{V} : es el matriz que resulta de diagonalizar el vector del valor agregado,

u : es un vector fila unitario,

y el resto de las variables han sido definidas anteriormente.

Es importante mencionar que los análisis SDA y PL de Puebla que se realizaron para esta tesis doctoral están enmarcados en el contexto de la huella de carbono dado el consumo eléctrico de Puebla y México. En otras palabras, se analiza cómo los cambios estructurales de la economía de Puebla y los vínculos productivos influyeron en los cambios en la huella de carbono eléctrica de Puebla en 2008 y 2013.

4.1.5 Huella de carbono

A pesar del uso común de esta herramienta, la literatura indaga acerca de la ausencia de una definición clara que sea generalmente aceptada (Wiedmann & Minx, 2008). La HdC, se puede definir como un indicador de impacto ambiental que representa la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción y consumo de bienes y servicios, es decir, derivados de actividades antropogénicas (Peandey, Agrawal, & Pandey, 2010). Esta es considerada como una de las herramientas más importantes para la cuantificación de las emisiones de GEI. (Klemeš, 2014). Los países y sus subregiones (estados y municipios en el caso de México) contabilizan su huella de carbono a través de sus inventarios de emisiones de GEI.

Es importante mencionar que en la presente tesis se estima la huella de carbono causada por el uso de electricidad de 80 sectores de la economía poblana, dicho uso de electricidad se asume que fue causado por la demanda final (consumo de hogares, gobierno y creación de capital más las exportaciones) de la región. De ahora en adelante nos referiremos a esta huella de carbono como “huella de carbono eléctrica”.

4.1.6 Metabolismo socioeconómico y comunitario

Todas las economías dependen del uso de materiales para crecer y aumentar su bienestar. Sin embargo, la explotación desmedida de los recursos naturales ejerce presiones sobre los ecosistemas haciéndolos cada vez menos resistentes a los impactos del cambio climático, además en un contexto donde la disponibilidad de los recursos es finita y limitada, el suministro futuro está comprometido. Así mismo,

todos los productos que se consumen en las economías tienen un historial o cadena de flujo de materiales y energía que comienza con la extracción de materias primas pasando por el procesamiento, la fabricación, el envasado, el embalaje y el transporte a los puntos de distribución y venta para llegar a la etapa de consumo final, posible reutilización y reciclaje para finalmente terminar con la disposición final, misma que generalmente causa descargas (sólidas, líquidas o gaseosas) al medio ambiente. Se sabe que todas las etapas de esta cadena de materiales tienen un impacto en el medio ambiente: ya sea por su extracción, acumulación o por la liberación de emisiones y desechos.

En este sentido, el metabolismo socioeconómico (Fischer-Kowalski, 1998) considera a las economías como sistemas donde los materiales y la energía se transforman en bienes y servicios para el consumo humano, así como desechos, calor disipado y otras emisiones que se descargan en el medio ambiente. Al usar y procesar materiales y energía, estos sistemas se están metabolizando, de ahí el término metabolismo socioeconómico.

El metabolismo urbano es una herramienta de la ecología industrial que sirve para modelar y evaluar los procesos de las ciudades, para obtener una mejor comprensión de los flujos de materiales y energía asociados con dichas comunidades urbanas (Chávez et al., 2018). A pesar de que el término más comúnmente utilizado es el de “metabolismo urbano”, algunos autores usan la nomenclatura para referirse a todas las comunidades, tanto rurales como urbanas, por lo que algunos académicos han comenzado a articular el concepto de metabolismo comunitario (Chávez, 2017).

4.1.6.1 Análisis de flujo de materiales (MFA)

El análisis de flujo de materiales a nivel económico (EW-MFA por sus siglas en inglés, *economy-wide material flow analysis*) puede definirse como el estudio de los flujos físicos de recursos naturales o materiales, dentro, a través y fuera de una economía. La contabilidad del flujo de materiales analiza la relación entre los cambios ambientales y los flujos de materiales causados por las actividades humanas, considerando materiales sólidos, gaseosos y líquidos, excluyendo los flujos de agua y aire (Weisz & Haas, 2006). El objetivo principal del método EW-MFA es explicar la interacción entre la economía doméstica y el entorno natural en términos de unidades físicas (toneladas) de flujos de recursos (Eurostat, 2019). Por lo tanto, el MFA ayuda a identificar la productividad y el uso eficiente/ineficiente de los recursos naturales.

Los indicadores de materiales para toda la economía (EW-MFI por sus siglas en inglés, *economy-wide material flow indicators*) son medidas cuantitativas cuyo objetivo es informar sobre las características de los flujos de materiales y los recursos materiales utilizados en una economía. Estos ayudan a medir el progreso con la productividad de los recursos y el uso de materiales al proporcionar información sobre la eficiencia económica y la efectividad ambiental de los materiales en las cadenas de producción y consumo hasta la disposición final.

La contabilidad de flujo de materiales y energía (MEFA por sus siglas en inglés, *material and energy flow analysis*) se ha vuelto el enfoque estándar en la contabilidad ambiental, así como el modo de reportar acerca de los flujos de materiales y energía relacionados con las actividades económicas de países y sus subregiones. Esta metodología establece un vínculo entre los flujos físicos y las variables monetarias y

socioeconómicas como el producto interno bruto (PIB)⁶ o la población de la región a estudiar. Al contabilizar los insumos materiales y acumulación de materiales de una economía, al igual que la transferencia de productos o desechos a otras economías o al medio ambiente, este marco metodológico proporciona una imagen empírica de la dimensión física de un sistema económico, generalmente expresado en toneladas como se puede observar en la figura 8 (Gonzalez-Martinez, 2008).

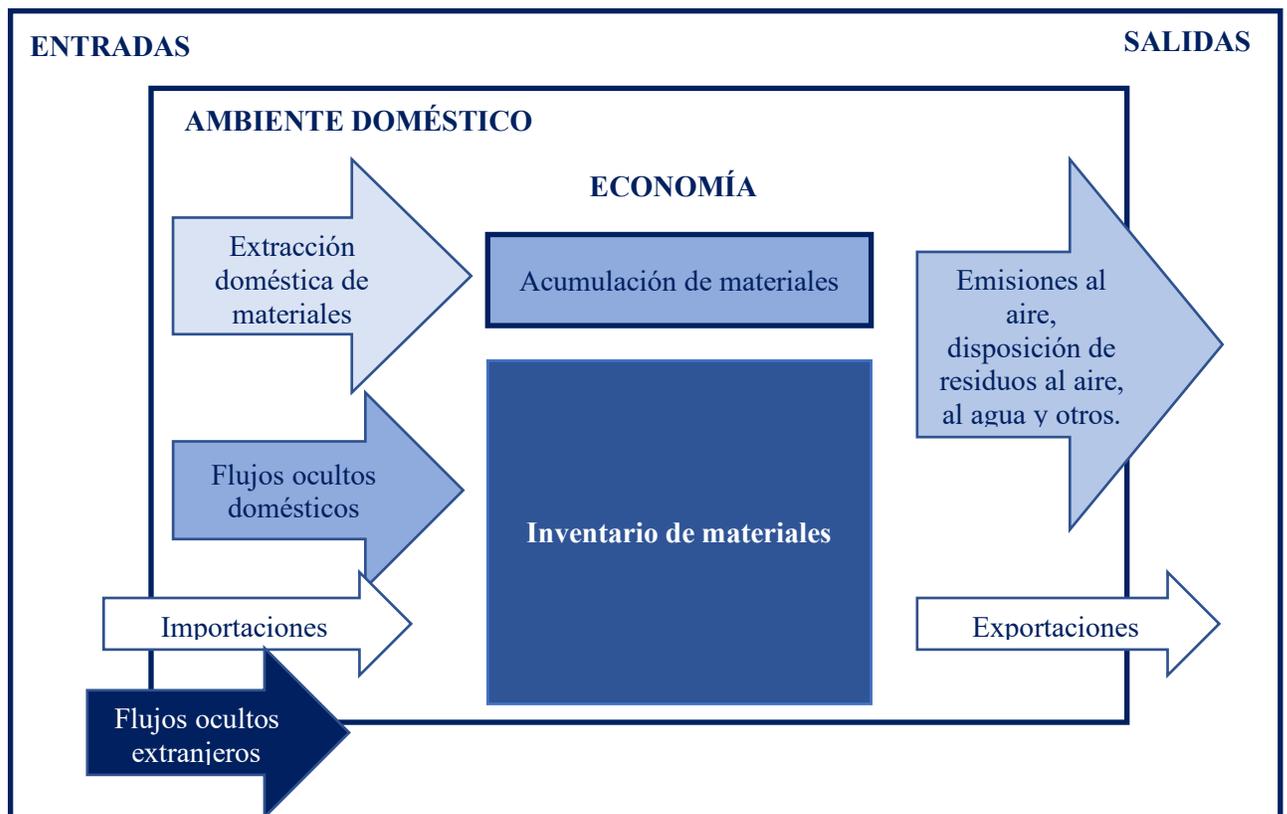


Figura 8. Dimensiones físicas de un sistema económico. Fuente: Adaptación de Eutostat 2001

⁶ El PIB es la sumatoria del valor de todos los bienes, servicios e inversiones que se producen en el país durante un año. Es una forma de medir el crecimiento económico de un país (BANXICO, 2020).

La OECD en su informe "Medición de flujos de materiales y productividad de recursos" explica la importancia de los indicadores de MFA para cuantificar y monitorear la productividad e intensidad de los materiales, así como el desacoplamiento de una economía (OECD, 2008). Del mismo modo, Weisz y Haas (2006) expone que cuando se usa el EW-MFA, es posible distinguir entre dos tipos de indicadores: extensivos e intensivos.

Los indicadores extensivos son aquellos que brindan información sobre una propiedad que varía directamente con el tamaño del sistema, lo que se denomina propiedad extensa (por ejemplo, volumen, masa) (OECD, 2008). En el caso de EW-MFA, los indicadores extensivos fundamentales son la extracción de material doméstico (DME, *domestic material extraction*), la entrada doméstica de material (DMI, *domestic material input*), el consumo doméstico de material (DMC, *domestic material consumption*) y la balanza física comercial (PTB *physical trade balance*), todos abreviados por sus siglas en inglés.

Mientras que los indicadores intensivos se refieren a aquellos que brindan información sobre propiedades que son independientes del tamaño del sistema considerado (por ejemplo, temperatura, presión o densidad) (OECD, 2008). En el caso del EW-MFA, algunos indicadores intensivos se pueden clasificar en tres enfoques: indicadores productivos, indicadores de intensidad e indicadores de desacoplamiento, los cuales se explican a continuación (OECD, 2008):

- **Indicadores productivos:** reflejan la efectividad del material en relación con la cantidad de producción para uno o más insumos utilizados. Por ejemplo, PIB/DMC y PIB/ DMI.

- **Indicadores intensivos:** reflejan el número de recursos naturales o materiales utilizados por unidad de PIB. Estos indicadores son los inversos de los indicadores de productividad, DMC/PIB y DMI/PIB.
- **Indicadores de desacoplamiento:** describen el nivel de acoplamiento o desacoplamiento entre el crecimiento económico y el uso de los recursos naturales.

El desacoplamiento, en este contexto, se refiere a la posibilidad de crecimiento económico al tiempo que disminuyen las cargas ambientales y el consumo de recursos (Tachibana, Hirota, Naohiro, & Koichi, 2008).

Para comparaciones de diferentes escalas geográficas (país, estado, municipio), se utilizan los indicadores intensivos de flujo de material para así compensar las diferencias de tamaño. Con respecto al análisis de desacoplamiento, es esencial diferenciar entre desacoplamiento absoluto y relativo. El desacoplamiento relativo se refiere a una disminución de la intensidad ecológica por unidad de producto económico o PIB. Sin embargo, no necesariamente disminuyen en términos absolutos. La condición en que los impactos de los recursos disminuyen en términos absolutos se denomina desacoplamiento absoluto (Jackson, 2009).

4.2 Datos necesarios para esta tesis y su metodología

A continuación, en la tabla 4.2 se muestran los datos que fueron esenciales para la aplicación de las metodologías propuestas por capítulo, y las fuentes de datos donde fue obtenida dicha información.

Tabla 4.2 Datos necesarios para el desarrollo de esta tesis

Número de capítulo	Título	Datos necesarios	Fuente
Capítulo 5	Huella de carbono con ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla	Tabla insumo-producto de México	EORA (EORA-MRIO, 2014)
		Datos complementarios a la tabla insumo-producto de México	OECD Tablas Insumo-Producto base de datos (OECD, 2017)
		Estadísticas de consumo eléctrico en México	International Energy Agency (IEA, 2018)
		Estadísticas de producción de energía en México	Secretaría de Energía (SENER) y Comisión Reguladora de Energía (CRE)
		Inventario Nacional de Emisiones	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2013)
		Estadísticas de empleo en Puebla y México (Censo económico 2014)	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
		Estadísticas de consumo de hogares en México	Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

		Estadísticas socioeconómicas	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
Capítulo 6	Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto y análisis participativo de agentes relevantes en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México)	Tabla Insumo- Producto de México	EORA (EORA-MRIO, 2014)
		Factor de emisiones de la matriz eléctrica de México al 2008 y 2013	Secretaría de Energía (SENER)
		Estadísticas de exportaciones de Pueblas	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
		Estadísticas de consumo de hogares en México	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
Capítulo 7	Flujo de materiales, análisis de intensidad de recursos y desacoplamiento: el caso de México y el estado de Puebla	Estadísticas de extracción doméstica nacional en toneladas	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y Secretaría de Economía (SE)
		Estadísticas de importaciones y exportaciones nacionales en toneladas	
		Estadísticas socioeconómicas de México y Puebla	

Estadísticas de producción de alimentos en México	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)
Estadísticas de producción de hidrocarburos en México	Petróleos Mexicanos PEMEX
Estadísticas del índice de desarrollo humano de México (HDI)	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP)

Como se puede ver en la tabla 4.2 las fuentes usadas para la obtención de datos son fuentes oficiales y fidedignas, con la finalidad de mantener la certeza y robustez de nuestros resultados. En el caso del capítulo 5 y 6, fue necesario complementar los datos de la matriz insumo-producto de México ofrecida por EORA con datos de la matriz publicada por la OECD, esta última no despliega los sectores de la economía mexicana en ochenta sectores, pero fue posible comparar las cifras de algunas industrias.

Específicamente para el capítulo 5, fue necesario también hacer una calibración al sector de generación de electricidad, para lo cual se hizo un análisis comparativo (*benchmarking*) de la cantidad total de electricidad consumida y producida en México reportada por diferentes fuentes como el *World Resources Institute* (WRI), la *International Energy Agency* (IEA), la Secretaría de Energía (SENER), entre otras. Mientras la recolección de datos acerca de la cantidad de empleados en cada uno de los ochenta sectores de la economía en México y Puebla, necesarios para elaborar los LQ de Puebla, fue un proceso (periodo de 4 meses) exhaustivo de recolección de

datos procedentes principalmente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social.

Para el capítulo 7 la recolección de datos, principalmente de la balanza comercial de mercancías de México la cual, fue obtenida del INEGI, quien reporta las exportaciones e importaciones de mercancías, que cumplen con la normatividad aduanera establecida por el Servicio de Administración Tributaria (SAT). Otras fuentes como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) así como Petróleos Mexicanos fueron usadas para obtener cifras de producción de alimentos e hidrocarburos en México. Por otro lado, para el escalamiento de los datos de México a la escala de Puebla, los diversos indicadores de escalamiento (*proxys*) en su mayoría fueron obtenidos del INEGI y de la Secretaría de Economía (SE).

PARTE II: RESULTADOS

CAPÍTULO 5

5.1 Huella de carbono del ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla

En este capítulo mostramos los detalles metodológicos y los resultados del proceso de cálculo de la huella de carbono del consumo de electricidad del estado de Puebla, utilizando la combinación de EIO-LCA con LQ. Distinguimos las emisiones directas e indirectas, y separamos las emisiones indirectas asociadas con el consumo final de las relacionadas con la demanda intermedia, identificando así a los sectores productivos de la región con mayores emisiones directas e indirectas. Así mismo, mostramos la estimación de las emisiones asociadas a las importaciones de la región todo en términos de la huella de carbono derivada del consumo eléctrico.

Una contribución relevante de la aplicación de EIO-LCA y LQ es que, para estimar la huella de carbono relacionada con el consumo de electricidad de un estado mexicano, el método sugerido en este capítulo puede representar una forma alternativa de estimar las emisiones locales de manera accesible con relativamente pocas fuentes de datos necesarias.

Es relevante mencionar que, para el sector de suministro de energía eléctrica, las emisiones de GEI pueden cuantificarse en función de los combustibles fósiles quemados dentro del país o región (estado, municipio o ciudad) durante la generación de electricidad, estas son denominadas emisiones directas o basadas en la producción. Las emisiones del sector suministro de energía eléctrica también

pueden cuantificarse en función de la electricidad consumida dentro del país o región, necesaria para satisfacer la demanda, así como las importaciones y exportaciones de electricidad. Cuando las emisiones se cuantifican sobre la base de la demanda de electricidad, las emisiones se denominan emisiones basadas en el consumo. Ambos tipos de estimaciones son útiles para comprender a detalle el sector de suministro de energía eléctrica, incluyendo las fuentes (sectores) de la demanda. Las estimaciones basadas en el consumo son particularmente útiles para el análisis de acciones de mitigación de GEI al considerar las implicaciones de las acciones que podrían reducir la demanda de las centrales eléctricas, tanto dentro como fuera de la región estudiada, como por ejemplo la eficiencia de la electricidad o las medidas de energía renovable.

La descripción de las limitaciones de los resultados del capítulo 5, en el cual se explican los cálculos de la huella de carbono (así como las de los capítulos 6 y 7) están descritas en la sección de cierre y conclusiones.

5.2 Detalles específicos de la metodología

Para cuantificar la huella de carbono del uso de electricidad en México y Puebla, estudiamos las emisiones asociadas con el sector “Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica” (PGT&S por sus siglas en inglés, *power generation, transmission and supply*) con el uso de la tabla insumo-producto de México. Ya que Puebla no cuenta con su propia tabla insumo-producto utilizamos los coeficientes de localización de empleo para escalar la matriz de coeficientes directos de México a Puebla. La Tabla 5.1 resume las fuentes de datos primarias utilizadas.

Tabla 5.1. Fuentes de datos análisis de huella de carbono eléctrica con insumo-producto

Datos	Fuente
Tablas insumo-producto de México	EORA (EORA-MRIO, 2014)
Datos complementarios de la tabla insumo-producto de México	OECD Input-Output Tables database (OECD, 2017)
Estadísticas de consumo eléctrico en México	International Energy Agency (IEA, 2018)
Misceláneo	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
Estadísticas de producción de energía en México	Secretaría de Energía (SENER) y Comisión Reguladora de Energía (CRE).
Inventario Nacional de Emisiones	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2013)
Misceláneo	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

Una fuente esencial de información para los estudios EIO-LCA es la base de datos EORA. Dicha base de datos cuenta con tablas insumo-producto para 187 países desde 1990 a 2013 (Lenzen, Moran, Kenemoto, & Geschke, 2013). Sin embargo, EORA (todavía) no proporciona información MRIO a nivel de subnacional.

Calibración de la tabla insumo-producto de México y el uso de electricidad.

En resumen, los pasos que se siguieron para la calibración mencionada anteriormente fueron:

1. Transformación del vector PGT&S de '000 USD a kilovatios-hora (kWh) utilizando la tarifa pagada por los sectores industrial y comercial por kWh: US \$ 0.11/kWh para industrias pesadas, US\$ 0.17/kWh para sectores de servicios y US \$0.14/kWh (tarifa promedio) para el resto de los sectores (Sistema de Información Energética, 2018).
2. Calculamos la participación de los 80 sectores analizados en el consumo final de electricidad en México.
3. Calculamos nuevamente el vector de consumo de electricidad con los datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2017) sobre el uso total de electricidad en México.
4. Sustituimos el nuevo vector en la matriz de transacciones mexicanas reemplazando el vector original.

Una vez que transformamos de '000USD a kWh el vector de consumo de PGT&S de cada uno de los 80 sectores analizados (reportados en la tabla insumo-producto de EORA), observamos que las cantidades obtenidas eran dos órdenes de magnitud mayores que las reportadas por entidades mexicanas oficiales tales como la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Por lo tanto, fue necesario realizar el proceso de calibración que se describe a continuación:

Las cantidades obtenidas (en kWh) después de la calibración se compararon con las cantidades informadas por la International Energy Agency (IEA) y el *World Resource Intitute* (WRI) sobre la electricidad consumida por los sectores industrial y comercial en México. El consumo total de electricidad de los 80 sectores analizados, después de la calibración, resultó en 0.41% del original obtenido sin calibración. En otras

palabras, obtuvimos un consumo mexicano total de 48,452 mil millones de kWh antes de calibrar y 197.38 mil millones de kWh después de calibrar.

La participación (en %) en el consumo nacional total por sector se mantuvo constante, independientemente del consumo total (kWh) antes o después de la calibración. Sin embargo, las diferencias antes y después de la calibración en las emisiones resultantes son notables. Las emisiones totales de Puebla sin calibración resultaron en 2,852 MMT CO_{2e}, que es incluso más alto que las emisiones nacionales totales reportadas en el inventario nacional de emisiones de 2013 –668 MMT CO_{2e} (INECC, 2013).

Mientras que la suma de las emisiones directas de los 80 sectores analizados después de la calibración dio como resultado 15 MMT de CO_{2e}, que representa el 3% del total de las emisiones nacionales de CO_{2e} causadas por el uso de electricidad industrial y comercial en México, mientras que, para Puebla, representó 63% del total de emisiones industriales. Ese 3% puede atribuirse al 4% (INEGI, 2018) con el que la economía de Puebla contribuye al PIB mexicano y al hecho de que Puebla consume alrededor del 4% de la energía nacional (Sistema de Información Energética, 2018). Por lo tanto, los resultados obtenidos nos permiten decir que nuestro proceso de calibración es válido.

[Proceso de cálculos para estimar la huella de carbono eléctrica de Puebla con tablas insumo-producto y coeficientes de localización \(escalamiento a nivel Puebla\).](#)

Estimamos los coeficientes de localización (LQ) de acuerdo con el proceso descrito por Miller y Blair (2009) utilizando las estadísticas de empleo nacionales y estatales del Banco de Información Económica de México (INEGI, 2018) y aplicando la ecuación 5.1. Posteriormente usamos los coeficientes obtenidos para reducir y

escalar la matriz de coeficientes técnicos de México (A^M) a los de Puebla (A^P) siguiendo las ecuaciones (5.2) y (5.3).

$$LQ_i^P = \frac{E_i^P/E^P}{E_i^M/E^M} \quad (5.1)$$

$$a_{ij}^P = a_{ij}^P (LQ_i^P, a_{ij}^M) \quad (5.2)$$

$$a_{ij}^P = \begin{cases} a_{ij}^M LQ_i^P & \text{if } LQ_i^P < 1 \\ a_{ij}^M & \text{if } LQ_i^P \geq 1 \end{cases} \quad (5.3)$$

donde

LQ_i^P : se refiere a los factores del cociente de localización de Puebla,

E_i^P y E^P : son el número de empleos en el sector i y número de empleos totales en Puebla, respectivamente, y

E_i^M y E^M : son el número de empleos en el sector i y número de empleos total en México, respectivamente.

Las estadísticas de empleo del INEGI de Puebla se agregaron de 114 sectores económicos a 80 siguiendo el Sistema de Clasificación de la Industria de América del Norte (NAICS) (United States Census Bureau, 2017) para que pudiéramos calcular cada uno de los LQ de empleo que corresponden a los 80 sectores registrados en la tabla de EORA México.

Según lo sugerido por Miller y Blair (2009), los LQ inferiores a uno se multiplicaron por la fila correspondiente de (A^M) para obtener la matriz de coeficientes técnicos (A^P) de Puebla.

Para cada región (tanto México como Puebla), la matriz inversa de Leontief (L) se calculó de la siguiente manera:

$$L^R = (I - A^R)^{-1} \quad \forall R \in \{P, M\} \quad (5.4)$$

donde

L^R : es la matriz inversa de Leontief ($\$/_{TO}/\$/_{FD}$)⁷,

A^R : es la matriz de coeficientes técnicos de cada región,

I : es una matriz de identidad,

P : hace referencia al estado de Puebla y

M : hace referencia a México.

El consumo final de Puebla y^P se extrapoló utilizando las estadísticas de consumo de los hogares de Puebla (ENGASTO) (INEGI, 2013), lo que permitió escalar el consumo final nacional.

Con la matriz inversa regional de Leontief de Puebla (L^P) y el consumo final de Puebla (y^P), calculamos el vector de producción total (x^P), como se muestra en la ecuación 5.5.

$$x^P = L^P y^P \quad (5.5)$$

donde

x^P : es el vector de producción total de la región ($\$/_{US_{TO}}$) y

y^P : es el vector de consumo final de la región ($\$/_{US_{FD}}$).

Perspectivas de producción y consumo de la huella de carbono.

El factor de emisión de electricidad mexicano (e) — 0.47 kgCO_{2e} / kWh — se calculó teniendo en cuenta la combinación de fuentes de energía primaria para México reportada por Santoyo-Castelazo et al. (2011) e información sobre la mezcla nacional de la producción eléctrica (Center for Energy & Geology, 2013), como se muestra en la Tabla 5.2 y se supuso que esta mezcla es constante en todo el país, es decir, que

⁷ TO- producción total por sus siglas en inglés, *total output*” y FD- demanda final, por sus siglas en inglés, *final demand*.

para el estado de Puebla se asume que tiene el mismo factor eléctrico de emisiones que el nacional.

Tabla 5.2 Mezcla energética de México y cálculo del factor eléctrico de emisiones 2013

Fuente de energía	Mezcla energética*	Factor eléctrico de emisiones(e)	
		Factor directo por tipo de fuente de energía** (kgCO ₂ e)	kgCO ₂ e/ kWh
Gas natural	50%	0.42	0.21
Petróleo	16%	0.81	0.13
Hidráulica	14%	0	0
Carbón	13%	0.99	0.13
Eólica y Geotérmica	3%	0	0
Nuclear	3%	0	0
Diésel	1%	0.72	0
TOTAL	100%	-	0.47

* (Center for Energy & Geology, 2013), ** (Santoyo-Castelazo et al., 2011)

El vector de intensidades de emisión directas relacionadas el consumo de electricidad de cada sector de la economía mexicana (**b**) resultó de:

$$b_j = \frac{z_{PGT\&S,j}}{x_j} \frac{e}{p_j} \quad (5.6)$$

donde

b_j: es el elemento *j* del vector de coeficiente de emisión **b** (KgCO₂e / \$ US_{T0}),

z (PGT & S, j): es el elemento j del vector de transacción interindustrial para el sector PGT & S (\$ US),

x_j : es el elemento j de la fila de salida total (\$US),

e : es el factor de emisión de electricidad (kgCO_{2e}/kWh), y

p_j : es el elemento j del vector del precio de la electricidad (\$US/kWh).

Para cada región (R), desde la perspectiva de producción, el vector de emisión directa (d) se calculó de la siguiente manera:

$$d^R = b \hat{x}^R \quad \forall R \in \{P, M\} \quad (5.7)$$

donde d^R es el vector de emisiones directas para cada región y b es el vector de impacto eléctrico nacional, calculado previamente en la ecuación 5.6.

Desde una perspectiva de consumo, obtuvimos las emisiones totales (o la huella de carbono, CF, por sus siglas en inglés) causadas por el consumo final de cada región:

$$CF^R = \hat{b} L^R \hat{Y}^R \quad \forall R \in \{P, M\} \quad (5.8)$$

donde

\hat{b} : es la matriz diagonal de impacto eléctrico nacional,

L^R : es la matriz inversa Leontief de cada región, y

\hat{Y}^R : es la matriz diagonal de consumo final de cada región.

Las emisiones del enfoque de consumo se pueden dividir en dos fracciones: i) emisiones emitidas por cada sector para satisfacer su propia demanda final (conocidas como emisiones de demanda final) y ii) emisiones que resultan de la producción/consumos intermedios, a los que nos referimos como emisiones intermedias.

Para determinar el componente de transacción intermedia del CF, calculamos una matriz inversa de Leontief modificada para cada región:

$$\mathbf{L}^{R_{mod}} = \mathbf{L}^R - \mathbf{I} \quad \forall \mathbf{R} \in \{\mathbf{P}, \mathbf{M}\} \quad (5.9)$$

donde \mathbf{I} es una matriz de identidad y $\mathbf{L}^{R_{mod}}$ es la matriz inversa de Leontief modificada, que reemplazó a \mathbf{L}^R en la ecuación 5.8 para obtener la matriz de emisión intermedia \mathbf{I}_{nd}^R , como se muestra en la ecuación 5.10.

$$\mathbf{I}_{nd}^R = \widehat{\mathbf{b}}^M \mathbf{L}_{mod}^R \widehat{\mathbf{y}}^R \quad \forall \mathbf{R} \in \{\mathbf{P}, \mathbf{M}\} \quad (5.10)$$

Finalmente, el componente de demanda final de la huella de carbono ($\mathbf{fd}_{CO_2e}^R$) se calculó como en la ecuación 5.11:

$$\mathbf{fd}_{CO_2e}^R = \mathbf{CF}^R - \mathbf{I}_{nd}^R \quad \forall \mathbf{R} \in \{\mathbf{P}, \mathbf{M}\} \quad (5.11)$$

Emisiones por comercio internacional

Para evaluar la parte nacional e internacional de la huella de carbono de México y Puebla, cuantificamos las emisiones asociadas a las importaciones del resto del mundo. Para ello calculamos la matriz de transacciones de importación de México (\mathbf{Z}_{imp}^M) de la siguiente manera:

$$\mathbf{Z}_{imp}^M = \widehat{\mathbf{im}}^M \mathbf{Z}^M \quad (5.12)$$

donde

$\widehat{\mathbf{im}}^M$: es la diagonal del vector de importaciones de México y

\mathbf{Z}^M : es la matriz de transacciones interindustriales de México.

Luego escalamos A_{imp}^M a la A_{imp}^P usando nuevamente los LQ (ecuaciones (5.1) a (5.3)).

5.2 Resultados y discusión

Coeficientes de localización (LQ) de empleo de Puebla 2013

En la tabla 5.3 se muestran los datos necesarios para la obtención de los 80 factores de localización de Puebla en 2013, basados en estadísticas de empleo y usando la ecuación 5.1.

Tabla 5.3. Coeficientes de localización de Puebla 2013

Actividad económica	México		Puebla		Coeficiente de localización
	Personal ocupado total	E_i^N/E^N	Personal ocupado total	E_i^R/E^R	
TOTAL, NACIONAL	21,738,998		888,583		
Agricultura	189,310	0.0087	1,227	0.0014	0.16
Ganado	21,428	0.0010	485	0.0005	0.55
Planificación forestal	3,273	0.0002	126	0.0001	0.94
Pesca, caza y captura	159,694	0.0073	314	0.0004	0.05
Servicios relacionados con la agricultura y la silvicultura	6,871	0.0003	203	0.0002	0.72

PARTE II: RESULTADOS

Extracción de petróleo y gas	53,581	0.0025	815	0.0009	0.37
Extracción de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas	105,724	0.0049	9,100	0.0102	2.11
Servicios relacionados con la minería	7,243	0.0003	85	0.0001	0.29
Generación, transmisión y suministro de energía	96,693	0.0044	3,425	0.0039	0.87
Suministro de agua y gas al consumidor final (a través de una tubería)	124,236	0.0057	2,090	0.0024	0.41
Edificio	291,558	0.0134	9,639	0.0108	0.81
Construcción de obras de ingeniería civil o trabajos pesados	216,515	0.0100	6,343	0.0071	0.72
Trabajos de construcción especializados	61,783	0.0028	1,883	0.0021	0.75
Industria de alimentos	878,695	0.0404	47,438	0.0534	1.32

PARTE II: RESULTADOS

Industria de bebidas y tabaco	168,532	0.0078	6,331	0.0071	0.92
Fabricación de insumos textiles	104,898	0.0048	22,050	0.0248	5.14
Fabricación de textiles, excepto prendas de vestir	69,655	0.0032	5,271	0.0059	1.85
Manufactura de ropa	301,094	0.0139	34,529	0.0389	2.81
Fabricación de cuero y materiales sustitutos, excepto prendas de vestir	153,065	0.0070	1,541	0.0017	0.25
Industria de la madera	76,860	0.0035	4,045	0.0046	1.29
Industria del papel	109,102	0.0050	3,537	0.0040	0.79
Imprentas e industrias relacionadas	127,332	0.0059	4,152	0.0047	0.80
Fabricación de petróleo y carbón	37,356	0.0017	107	0.0001	0.07
Industria química	258,828	0.0119	6,900	0.0078	0.65
Plásticos y caucho	297,036	0.0137	12,688	0.0143	1.05
Fabricación de productos hechos de minerales no metálicos	213,690	0.0098	18,858	0.0212	2.16

PARTE II: RESULTADOS

Industrias básicas del metal	98,945	0.0046	1,767	0.0020	0.44
Productos metálicos fabricados	391,526	0.0180	16,168	0.0182	1.01
Fabricación de maquinaria y equipo	127,829	0.0059	2,592	0.0029	0.50
Fabricación de computadoras, equipos de comunicación, medición y otros equipos, componentes electrónicos y accesorios	300,544	0.0138	214	0.0002	0.02
Fabricación de equipos de generación eléctrica, electrodomésticos y accesorios	195,387	0.0090	549	0.0006	0.07
Fabricación de equipos de transporte	777,900	0.0358	40,172	0.0452	1.26
Fabricación de muebles y	159,611	0.0073	5,901	0.0066	0.90

PARTE II: RESULTADOS

productos relacionados					
Otras industrias manufactureras	225,547	0.0104	5,353	0.0060	0.58
Comercio	6,389,648	0.2939	300,829	0.3385	1.15
Transporte aéreo	31,821	0.0015	13	0.0000	0.01
Transporte ferroviario	14,857	0.0007	254	0.0003	0.42
Transporte de agua	10,822	0.0005	48	0.0001	0.11
Camionaje	225,283	0.0104	5,897	0.0066	0.64
Transporte terrestre de pasajeros excepto por ferrocarril	262,472	0.0121	12,058	0.0136	1.12
Tubería	6,474	0.0003	60	0.0001	0.23
Transporte turístico	7,951	0.0004	105	0.0001	0.32
Servicios relacionados con el transporte	127,718	0.0059	1,830	0.0021	0.35
Servicios postales	19,906	0.0009	568	0.0006	0.70
Servicios de mensajería y paquetería	42,962	0.0020	478	0.0005	0.27
Servicios de almacenaje	22,067	0.0010	201	0.0002	0.22

PARTE II: RESULTADOS

Edición de publicaciones y software, excepto a través de Internet	48,158	0.0022	1,053	0.0012	0.53
Industria del cine y video, y la industria del sonido	40,909	0.0019	1,103	0.0012	0.66
Radio y televisión, excepto a través de Internet	50,238	0.0023	647	0.0007	0.32
Creación y difusión de contenido sólo a través de Internet	82,172	0.0038	2,932	0.0033	0.87
Otras telecomunicaciones	16,750	0.0008	760	0.0009	1.11
Proveedores de acceso a Internet, servicios de búsqueda en la red y servicios de procesamiento de información	14,498	0.0007	184	0.0002	0.31
Otros servicios de información	5,522	0.0003	144	0.0002	0.64
Banca central	3,302	0.0002	47	0.0001	0.35

PARTE II: RESULTADOS

Instituciones de crédito e intermediación financiera	370,319	0.0170	4,575	0.0051	0.30
Actividades de intercambio comercial e inversión financiera	18,333	0.0008	281	0.0003	0.37
Fianzas, seguros y pensiones	86,822	0.0040	730	0.0008	0.21
Servicios inmobiliarios	154,317	0.0071	6,547	0.0074	1.04
Servicios de alquiler de bienes personales	96,717	0.0044	4,119	0.0046	1.04
Servicios de alquiler de marcas, patentes y franquicias	936	0.0000	100	0.0001	2.61
Profesional, científico y técnico	606,396	0.0279	17,548	0.0197	0.71
Gestión de empresas y emprendimientos	42,758	0.0020	47	0.0001	0.03
Servicios de apoyo a empresas	1,692,193	0.0778	39,236	0.0442	0.57

PARTE II: RESULTADOS

Gestión de residuos y servicios de remediación	22,192	0.0010	918	0.0010	1.01
Servicios educativos	759,871	0.0350	40,700	0.0458	1.31
Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados	309,414	0.0142	13,225	0.0149	1.05
Hospitales	120,441	0.0055	4,343	0.0049	0.88
Hogares asistenciales y asistencia sanitaria	22,110	0.0010	3,832	0.0043	4.24
Otros servicios sociales	162,182	0.0075	4,811	0.0054	0.73
Servicios artísticos y deportivos, y servicios relacionados	38,329	0.0018	3,150	0.0035	2.01
Museos, sitios históricos, jardines botánicos y similares.	7,023	0.0003	573	0.0006	2.00
Servicios de entretenimiento en instalaciones recreativas y otras	186,227	0.0086	6,555	0.0074	0.86

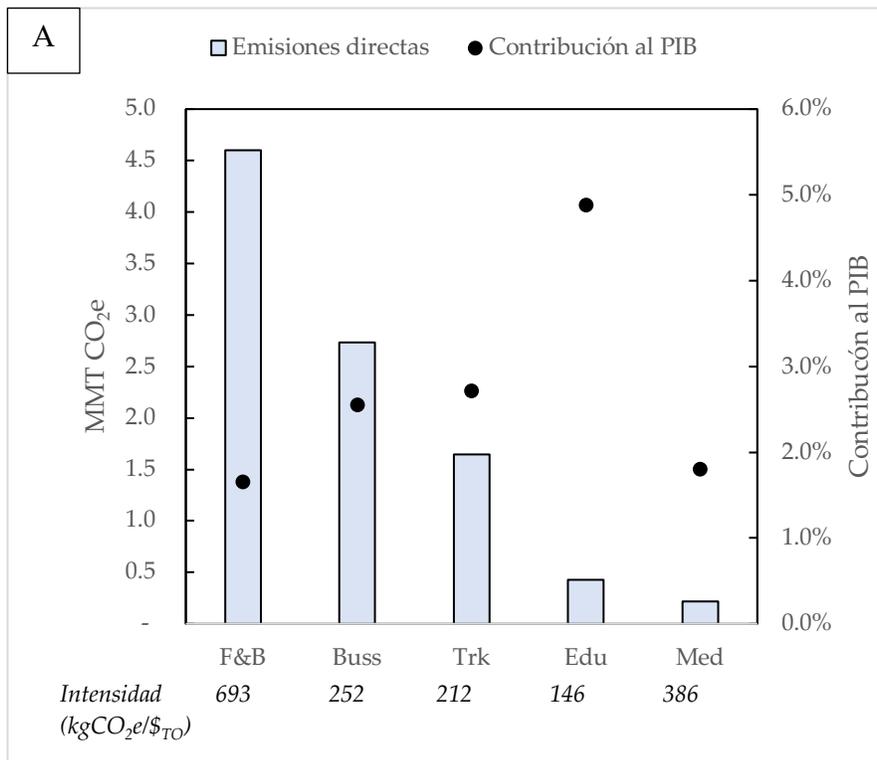
instalaciones recreativas					
Servicios de alojamiento temporal	363,528	0.0167	8,465	0.0095	0.57
Servicios de preparación de alimentos y bebidas	1,579,909	0.0727	66,368	0.0747	1.03
Servicios de reparación y mantenimiento	768,006	0.0353	35,419	0.0399	1.13
Servicios personales	381,975	0.0176	18,309	0.0206	1.17
Asociaciones y organizaciones	114,129	0.0052	3,623	0.0041	0.78
Hogares privados	319,959	0.0147	60,100	0.0676	4.60
Actividades del gobierno	837,610	0.0385	34,788	0.0391	1.02
Reexportaciones	-	-	-	-	0.01

Emissiones directas (perspectiva de la producción)

El uso de electricidad en México por parte del sector industrial y comercial emitió un total de 151 MMT CO_{2e} para 2013, de las cuales 10.21 millones (8%) fueron generadas en Puebla, donde estas emisiones representaron aproximadamente el 43%

(según nuestros cálculos) de las emisiones de la industria derivadas de su consumo energético.

La figura 9.A muestra los cinco sectores con mayor contribución de emisiones directas a la huella de carbono de Puebla dado su consumo eléctrico, se puede observar que no necesariamente aquellos sectores con mayor huella de carbono son los sectores con mayor aportación al PIB estatal. De manera similar, la figura 9.B muestra los cinco sectores con mayores emisiones indirectas, las cuales están compuestas por emisiones intermedias más emisiones de la demanda final.



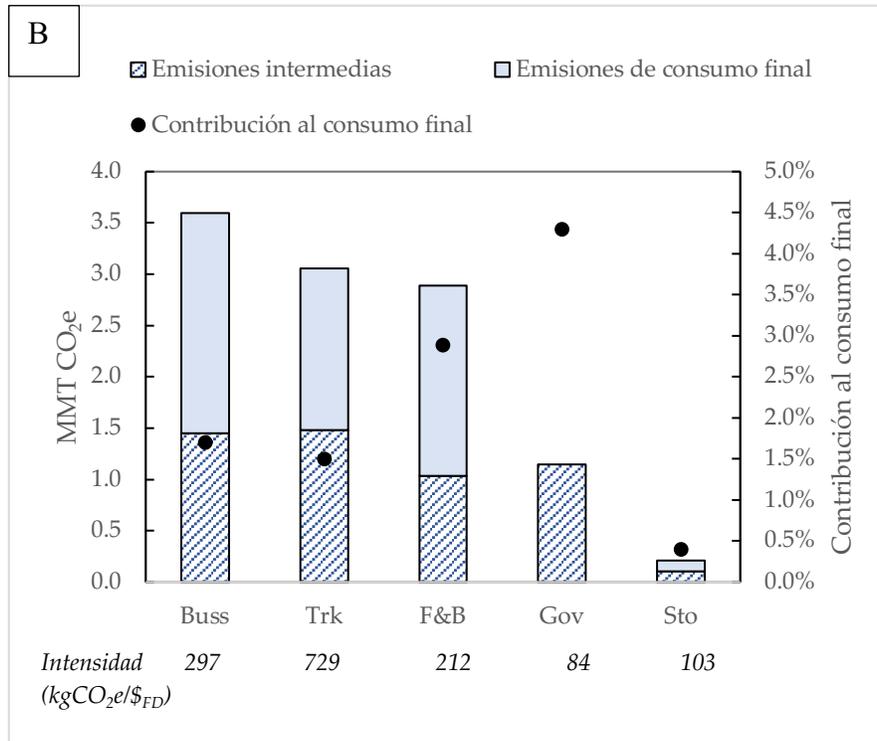


Figura 9. Cinco sectores con mayores emisiones directas e indirectas, dado su consumo eléctrico en Puebla durante el 2013. Sectores: Servicios de apoyo a empresas (Buss), Servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B), Camiones (Trk), Servicios educativos (Edu), Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados (Med), Gobierno (Gov) y Servicios de almacenamiento (Sto).

El sector de mayores emisiones directas de Puebla fue el de servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B por sus siglas en inglés, *food and beverage*), con 4.60 MMT de emisiones de CO₂e (45% del total de emisiones directas de Puebla relacionadas con el uso de electricidad), mientras que este sector contribuyó con menos del 2% del PIB. El segundo mayor contribuyente, fue el sector de servicios de apoyo empresarial (Buss, por sus siglas en inglés, *business and support services*) el cual emitió 2.73 MMT de CO₂e (23% de las emisiones directas de Puebla), mostrando también una baja contribución del PIB del 3%. En este caso, esta discrepancia se debe a sus altos factores de intensidad de emisión, es decir 693 y 252 kgCO₂e/\$_{TO}, respectivamente. Dichos factores de intensidad podrían mejorarse con el uso de

tecnologías más eficientes que contribuyan a disminuir su consumo de electricidad durante su producción.

En contraste, los sectores con mayores contribuciones al PIB de Puebla, como los sectores de comercio y el de servicios inmobiliarios, que en conjunto representaron el 25% del PIB (ver Tabla 5.4), no fueron los sectores con mayores emisiones directas ya que juntos emitieron menos del 0.05% del total de emisiones directas, esto se debe a sus bajos factores de intensidad. De este modo, se puede decir que las estrategias y políticas de mitigación para reducir las emisiones de CO₂e en Puebla serán más efectivas si apuntan a promover las tecnologías de eficiencia energética en aquellos sectores con mayores factores de intensidad.

Tabla 5.4. Sectores con mayor contribución al PIB de Puebla

	Contribución al PIB	Emisiones directas en MMT CO₂e (% de las emisiones directas totales)	Valor de intensidad kgCO₂e/\$_{TO}
Comercio	15%	6.45E-05 (0.0004%)	0.0011
Servicios inmobiliarios	10%	5.15E-6 (0%)	0.0003
Servicios educativos	5%	7.78E-01 (5.15%)	146
Construcción	5%	3.87E-03 (0.0257%)	3.22
Industria de alimentos	4%	7.93E-06 (0.0001%)	0.0009
TOTAL	38%	7.82E-01 (5.18%)	-

Emisiones indirectas (perspectiva de consumo)

A nivel de Puebla, los sectores de autobuses y camiones (Trk, por sus siglas en inglés, *trucking*) son los que más contribuyeron a las emisiones indirectas de CO_{2e}, con 3.59 y 3.05 MMT CO_{2e}, respectivamente, como se muestra en la figura 9.B. Los tres sectores con mayores emisiones indirectas de Puebla siguen un patrón similar con respecto a la proporción de emisiones atribuibles al consumo final. El 60% de las emisiones indirectas del sector Buss fueron causadas por su consumo final. Esto parece sorprendentemente alto para un sector que brinda servicios a otras empresas, pero es comparable a la contribución del 65% del consumo final en el sector F&B y a la contribución del consumo final de aproximadamente el 50% en los sectores Trk y servicios de almacenamiento (Sto, por sus siglas en inglés, *storage*). En el caso de las emisiones indirectas en Puebla los resultados parecen sugerir que las estrategias de mitigación de emisiones serán más eficientes si apuntan a reducir el consumo final o los factores de intensidad de demanda final reflejados en la figura 9.B, en lugar de enfocarse en transformar cadenas de suministro completas.

Los sectores gobierno (Gov, por sus siglas en inglés, *government*) y Sto se encuentran entre los cinco principales emisores indirectos, pero no dentro de los cinco mayores emisores directos, lo que demuestra que en materia de emisiones estos dos sectores tienen una gran influencia de sus sectores proveedores y que la mayoría de sus emisiones fueron consecuencia de la intensidad eléctrica sus proveedores. De hecho, las instituciones de crédito y el sector financiero (C&F, por sus siglas en inglés, *credit and finance*), así como el sector Trk, resultaron ser los principales proveedores del sector Gov, mismos que tienen valores de intensidad relativamente altos: 198 y 212 kgCO_{2e}/\$_{TO}, respectivamente. En este sentido, las estrategias de mitigación destinadas a disminuir el consumo de electricidad de los proveedores del gobierno

deberían centrarse en las cadenas productivas de sus proveedores y no tanto en el sector en sí.

Verificamos el lugar de los emisores indirectos más altos de Puebla dentro de la estructura económica de México. Entre los cinco principales sectores emisores indirectos de Puebla, F&B, Trk y Buss coinciden con los tres principales emisores indirectos en México.

Comparación entre México y Puebla

En la figura 10.A se muestra el comportamiento de los cinco sectores con mayores emisiones de Puebla en comparación con su comportamiento en México, lo cual no significa que dichos sectores sean los emisores más altos a nivel nacional. En la figura 10.A se puede observar que las emisiones directas de F&B de Puebla representaron el 17% de las emisiones directas de F&B de México, mientras que las emisiones directas de Buss y Trk de Puebla representaron el 4% de las emisiones directas de México de sus respectivos sectores.

Al analizar el sector F&B, en la figura 10.B, se puede observar que sus emisiones indirectas son mucho más altas en México que en Puebla, esto podría atribuirse principalmente a sus requisitos indirectos, que en su mayoría provienen del sector de "extracción de petróleo y gas" a nivel nacional (de acuerdo con la matriz inversa de Leontief de México del 2013), este último tiene un factor de intensidad de 613 $\text{KgCO}_2\text{e} / \$_{\text{T0}}$. Mientras que, a nivel de Puebla, los insumos del sector F&B principalmente provienen del sector Gov, que tiene un valor de intensidad de 84 $\text{KgCO}_2\text{e} / \$_{\text{T0}}$. Por lo tanto, se puede decir que la diferencia de la clasificación de los emisores más altos entre México y Puebla se debe a la matriz inversa de Leontief de cada región.

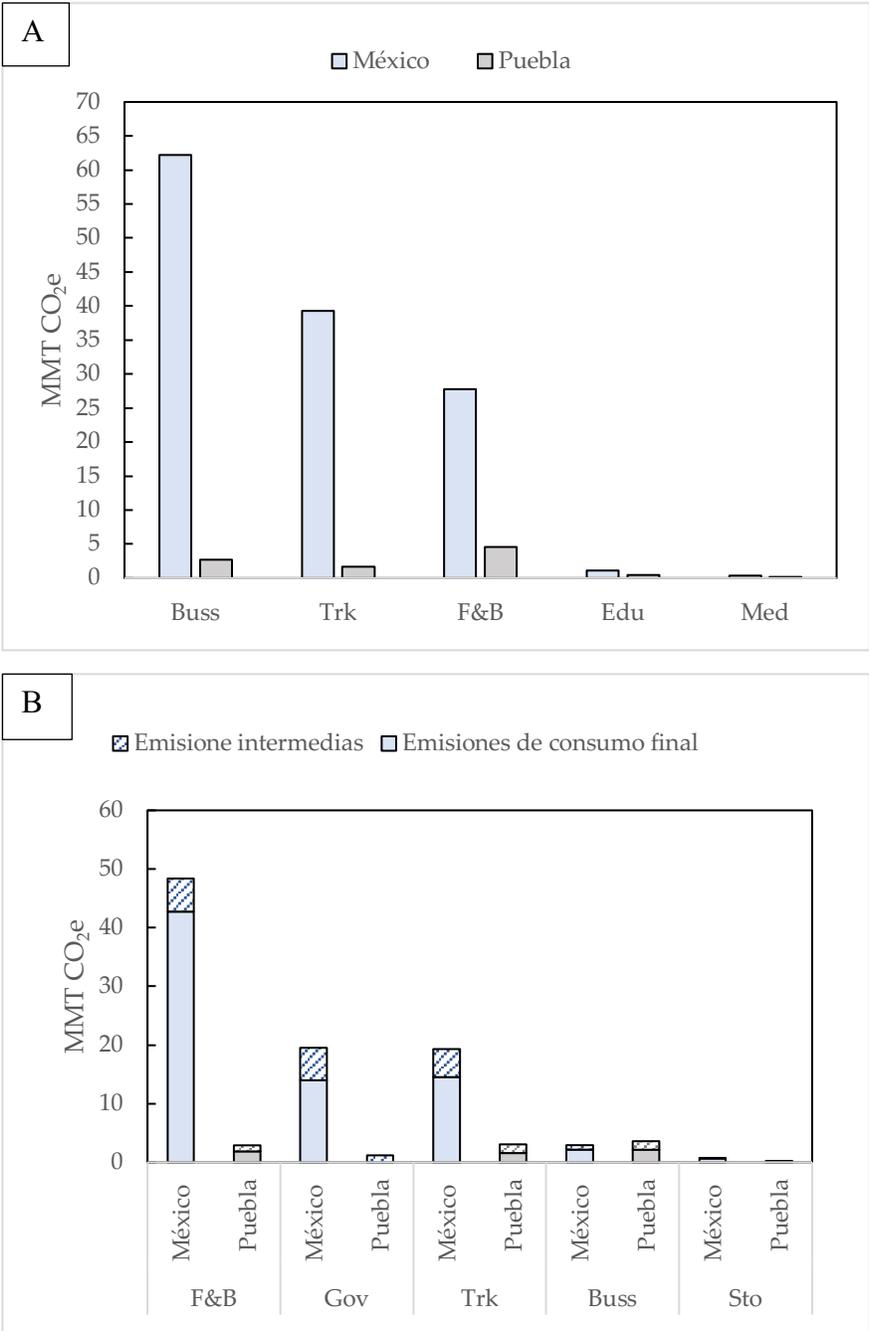


Figura 10. Cinco sectores con mayores emisiones de Puebla comparación entre México y Puebla

Emisiones asociadas a las importaciones

La figura 11.A muestra las emisiones indirectas totales de México y Puebla y las emisiones *upstream* o emisiones externalizadas asociadas con las importaciones de Puebla y México. En resumen, las emisiones relacionadas con las importaciones representan el 74% de las emisiones totales de México (151 MMT CO_{2e}), mientras que, en Puebla, las emisiones relacionadas con las importaciones son casi las mismas que las emisiones debidas a la producción industrial nacional (aproximadamente 10 MMT CO_{2e}). Una interpretación clave en términos de seguridad energética es que Puebla depende menos que México en general de los insumos del exterior. La figura 11.B brinda más detalles sobre las emisiones relacionadas con las importaciones de los cinco principales sectores emisores de Puebla y México. Se puede ver que las emisiones asociadas con las importaciones en México superan las emisiones totales en la mayoría de los sectores, excepto los sectores Gov y F&B en todo México. Por el contrario, en Puebla la diferencia entre las emisiones indirectas y aquellas asociadas con las importaciones no es tan notable.

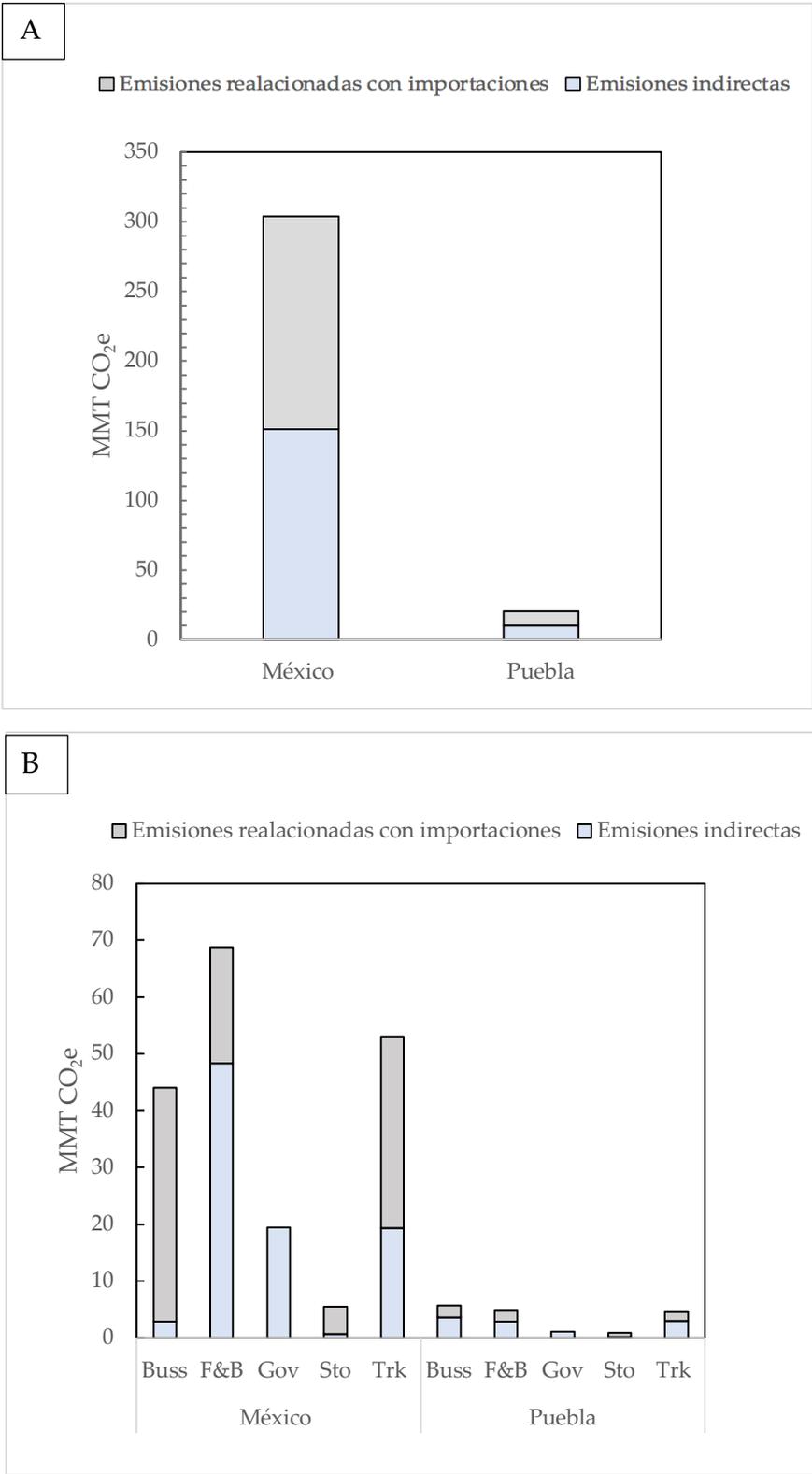


Figura 11. Emisiones relacionadas con importaciones, emisiones directas e indirectas

Las estrategias de mitigación de GEI dirigidas a la generación de energía y el uso de electricidad a menudo se basan en descarbonizar la matriz energética, pero una inspección más cercana de las emisiones directas e indirectas (basadas en la producción y en el consumo, respectivamente) señala que dichas estrategias debieran ser complementadas con acciones hechas a la medida para cada sector y región. La Secretaría de Energía SENER (2017) afirma que para 2024, México tendrá que generar el 35% de su electricidad a partir de recursos renovables. Sobre la base de la tasa actual renovable de aproximadamente 21% (SENER, 2017a), esta descarbonización de la combinación de electricidad daría como resultado la reducción del factor de emisión de 0.47 kgCO_{2e}/kWh a 0.41 kgCO_{2e}/kWh, ver tabla 5.5.

Tabla 5.5. Cálculo del factor eléctrico de emisiones de México con 35% renovables

Fuente de energía	Mezcla eléctrica	Factor eléctrico de emisiones(e)	
		Factor directo por tipo de fuente de energía (kgCO _{2e})	kgCO _{2e} /kWh
Renovables *	35%	0	0
Petróleo	16%	0.81	0.13
Gas natural	35%	0.42	0.15
Carbón	13%	0.99	0.13
Diésel	1%	0.72	0.1
TOTAL	100%	-	0.41

**hidráulica, eólica, geotérmica y nuclear*

Suponiendo que el resto de las variables permanecen constantes, las emisiones totales del uso de electricidad industrial y comercial disminuirían 13%, de 10.21 MMT CO_{2e} a 8.89 MMT CO_{2e}. Por el contrario, reducir el factor de intensidad del sector F&B resultaría en ahorros de emisiones más significativos. Un estudio preciso de cómo se podría reducir el factor de intensidad de 693 kgCO_{2e} /\$_{TO} mejorando los procesos con tecnologías más eficientes está más allá del alcance de este estudio, pero se puede determinar una aproximación de lo que es posible usando la Carnegie Mellon EIO- Herramienta en línea de LCA (Green Design Institute. Carnegie Mellon University, 2016b) la cual reporta que para el sector F&B el factor de intensidad en EE. UU fue de 250 kgCO_{2e} /\$_{TO} para F&B.

Entonces suponiendo que en México se redujera el factor de intensidad del sector F&B de 693 a 250 kgCO_{2e} /\$_{TO} podría conducir a una reducción del 31% de las emisiones totales de Puebla de 10.21 MMT CO_{2e} a 7.05 MMT CO_{2e}. Se puede decir que nuestros resultados muestran que desde un análisis de la huella de carbono eléctrica basado en la producción, el factor más influyente en las emisiones directas de CO_{2e} es la tecnología utilizada por cada industria, representada aquí por el vector de intensidad. De manera similar, desde la perspectiva del consumo, los factores de intensidad también tienen un papel importante cuando se evalúa la huella de carbono. Sin embargo, este enfoque también nos permitió identificar otras posibles líneas de acción como promover la innovación tecnológica a través de incentivos fiscales, así como establecer costos que incluyan las externalidades negativas.

Los resultados muestran la medida de mitigación de generar el 35% de la electricidad mexicana con fuentes renovables para 2024, por sí sola no será suficiente para lograr el objetivo de mitigación de reducciones de 22% para 2030 y 50% para 2050 de las emisiones nacionales de GEI respecto a la línea base (SEMARNAT, 2015).

En consecuencia, las políticas complementarias, como las propuestas anteriormente, serán clave para lograr las metas de mitigación. Así mismo, los resultados muestran que las políticas centradas en mitigar la huella de carbono eléctrica a nivel nacional pueden no ser siempre exactamente las mismas que las que se debieran aplicar a nivel regional, para cada sector de la economía. En resumen, con la metodología y el análisis propuestos, es posible identificar aquellos sectores que i) consumen la mayor cantidad de electricidad a nivel nacional y regional y ii) la eficiencia eléctrica de cada sector económico a lo largo de sus cadenas de producción, tanto a nivel nacional como regional. Por lo tanto, la información resultante puede significar insumos relevantes para el diseño de la política climática en diferentes niveles (nacional, estatal o municipal) y para diseñar acciones de mitigación de acuerdo con las características y necesidades de cada sector. Así la metodología propuesta tiene tres ventajas principales; primero, se puede lograr con pocos recursos ya que hay muchas regiones que tienen buenas bases de datos de entrada-salida. En segundo lugar, el método ayuda a identificar qué sectores son los emisores directos más altos y necesitan mejoras tecnológicas, y qué demanda final de los sectores genera más emisiones y requiere otros tipos de acciones de mitigación, incluidas las importaciones. Y tercero, el método ayuda a evaluar la eficiencia de las políticas de descarbonización de la mezcla energética para elegir objetivos de mitigación asertivos.

CAPÍTULO 6

6.1 Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México).

Cuando se buscan estrategias y políticas de mitigación eficientes y acertadas, identificar y comprender las variables influyentes (*drivers*) de la huella de carbono de una región se vuelve tan relevante como cuantificarla. Por lo tanto, en este capítulo, aplicamos el análisis de descomposición estructural y el análisis de enlaces productivos a la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla comparando los resultados del 2008 y 2013. Analizamos la composición estructural de la economía poblana e identificamos los vínculos hacia adelante y hacia atrás de cada uno de los 80 sectores económicos de Puebla (según la matriz insumo-producto de EORA de México escalada a Puebla). Así mismo, analizamos cómo dicha composición estructural y los cambios en variables, como la innovación tecnológica y la demanda final de la región, influyeron en la huella de carbono de la electricidad de Puebla. A través del análisis de descomposición estructural, encontramos que los cambios en la producción total de Puebla estaban más influenciados por las variaciones de la demanda final de Puebla que las variaciones tecnológicas ocurridas entre 2008 y 2013. Mientras que, con el análisis de enlaces productivos, identificamos que los sectores con mayor avance en los vínculos fueron aquellos con la mayor huella de carbono. Finalmente, demostramos que la combinación del análisis de

descomposición estructural con el análisis de enlaces productivos es un método útil y complementario para analizar la huella de carbono del ciclo de vida cuando se usan tablas de entrada-salida.

6.2 Detalles de la metodología

Huella de carbono eléctrica de Puebla 2008

Obtuvimos la huella de carbono eléctrica de Puebla en 2008, utilizando exactamente la misma metodología en el capítulo 5 “Huella de carbono con ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla, 2013”. En este caso, usamos las tablas insumo-producto mexicanas de EORA y asumimos que el factor de emisión de electricidad de 2008 fue el mismo que en 2013. Este supuesto realizado por dos razones; i) el factor de emisión eléctrico nacional tuvo una minúscula variación (de 0.46 aumento a 0.49) del 2008 al 2013 (Programa GEI México, 2013) y ii) en nuestro objetivo en este capítulo es comparar como la estructura económica y la influencia de los vínculos productivos impactaron la huella de carbono de la electricidad, es decir, que en este capítulo el objetivo no es cuantificar los efectos de reducir el factor de emisión ya que esta discusión se abordó en el capítulo 5.

Análisis de descomposición estructural inter-temporal (Puebla 2008 versus 2013)

Tanto para el año 2008 como el 2013 fue necesario escalar la matriz de coeficientes técnicos de México A_{ij}^M a la matriz de coeficientes técnicos de Puebla A_{ij}^P con el uso de los coeficientes de localización (LQ) de empleo, como se explica en el capítulo 5 y de acuerdo con lo explicado por Miller & Blair (2009). Además, la demanda final nacional (consumo final más exportaciones) se escaló con el uso de estadísticas

oficiales de consumo de los hogares regionales (INEGI, 2013). Dado que se contaba con las estadísticas de empleo y consumo de hogares sólo de 2013, fue necesario asumir que las estadísticas laborales de 2008 fueron los mismos de 2013 y que la estructura de la demanda final de Puebla de 2008 fue la misma que 2013.

Luego aplicamos la ecuación 6.1 al estudio de caso de Puebla. Utilizando los subíndices $_{08}$ y $_{13}$ para distinguir los dos años analizados, 2008 y 2013, respectivamente, y aplicamos la metodología de análisis de descomposición estructural insumo-producto explicado por Miller & Blair (2009). Para comparar la estructura económica de Puebla de 2008 versus 2013, utilizamos las siguientes ecuaciones:

Sabiendo que:

$$X_{08} = L_{08} Y_{08} \quad \text{y que} \quad X_{13} = L_{13} Y_{13} \quad (6.1)$$

donde

X_{08} y X_{13} : son el vector de producción total de Puebla de 2008 y 2013, respectivamente ($\$US_{TO}$);

L_{08} y L_{13} : son la matriz inversa Leontief de Puebla de 2008 y 2013, respectivamente ($\$_{TO} / \$_{FD}$); y

Y y Y_{13} : son el vector de demanda final de Puebla de 2008 y 2013, respectivamente ($\$US_{FD}$).

Después, aplicando la ecuación 6.2, como lo explica Miller & Blair (2009), fue posible obtener la contribución del cambio tecnológico entre industrias y la contribución de los cambios en la demanda final y la producción total.

$$Dx = (1/2) \underbrace{(DL)}_{\text{Cambio tecnológico}} (y_{08} + y_{13}) + (1/2) \underbrace{(L_{08} + L_{13})}_{\text{Cambio en la demanda final}} (Dy) \quad (6.2)$$

Cambio tecnológico

Cambio en la demanda final

donde

Dx : es la variación observada en el vector de producción total de Puebla entre 2008 y 2013 (***x*₁₃ - *x*₀₈**);

DL: es la variación observada en la matriz inversa Leontief de Puebla entre 2008 y 2013 (***L*₁₃ - *L*₀₈**); y

Dy: es la variación observada en el vector de demanda final de Puebla entre 2008 y 2013 (***y*₁₃ - *y*₀₈**);

Análisis de enlaces productivos

a. Enlaces hacia atrás:

Al usar el modelo Leontief (enfoque de demanda), primero escalamos la matriz de coeficientes técnicos mexicanos (***A*^{*M*}_{*ij*}**) a la matriz de coeficientes técnicos de Puebla (***A*^{*P*}_{*ij*}**) con el uso de LQ de Puebla como lo explica Miller & Blair (2009).

Posteriormente procedimos a calcular la matriz inversa de Leontief de Puebla (***Lp***). Para continuar calculando los enlaces productivos directos hacia atrás con el uso de la ecuación 6.3 y los enlaces productivos totales hacia atrás con el uso de la ecuación 6.4.

$$BL(d)j = \sum_{i=1}^n aijp \quad (6.3)$$

$$BL(t)j = \sum_{i=1}^n lijp \quad (6.4)$$

donde

en la ecuación 6.3

BL(d)j: es el enlace directo hacia atrás del sector *j*-ésimo;

a_{ij}^P : es el coeficiente técnico del sector ij de Puebla; y

j es la j -ésima columna de la matriz de coeficientes técnicos de Puebla (\mathbf{A}^P_{ij})

Y en la ecuación 6.4

$BL(t)j$: es el enlace total hacia atrás del sector j -ésimo;

l_{ij}^P : es el coeficiente de la matriz inversa de Leontief del sector ij de Puebla; y

j : es la j -ésima columna de la matriz inversa de Leontief de Puebla (\mathbf{L}^P_{ij})

b. Enlaces hacia adelante:

Al usar el modelo Ghosh (enfoque de oferta), primero fue necesario escalar la matriz de coeficientes de distribución mexicana (\mathbf{B}^M_{ij}) a la matriz de coeficientes de distribución de Puebla (\mathbf{B}^P_{ij}) con el uso de LQ de Puebla como lo explica Miller & Blair (2009). Posteriormente, procedemos a calcular la matriz inversa Ghosh de Puebla (Gp). Para continuar calculando los enlaces directos hacia adelante usando la ecuación 6.5 y los enlaces totales hacia adelante con la ecuación 6.6.

$$FL(d)j = \sum_{i=1}^n b_{ij}p \quad (6.5)$$

$$FL(t)j = \sum_{i=1}^n g_{ij}p \quad (6.6)$$

donde

en la ecuación 6.5

$FL(d)j$: es el enlace directo hacia adelante del sector j -ésimo;

b_{ij}^P : es el coeficiente de distribución del sector ij de Puebla; y

i es la i -ésima fila de la matriz de coeficientes de distribución de Puebla (\mathbf{B}^P_{ij})

Y en la ecuación 6.6

$FL(t)j$: es el enlace total hacia adelante del sector j -ésimo;

g_{ij}^P : es el coeficiente de la matriz de Ghosh del sector ij de Puebla; y

i es la i -ésima fila de la matriz inversa de Leontief de Puebla (G_{ij}^P)

De la ecuación 6.3-6.6, n es el número total de sectores (en este estudio de caso es 80).

Después de estimar los vínculos totales y directos hacia atrás y hacia adelante con el uso de los índices de mediciones de Rasmussen, clasificamos los 80 sectores económicos de Puebla en las cuatro categorías que se muestran en la Tabla 6.1 y luego, con el uso de los índices de mediciones de Chenery-Watanabe, clasificamos los indicadores económicos de Puebla por sectores en las categorías que se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.1. Clasificación de sectores según Rasmussen

	BL<1	BL>1
FL<1	Independiente: Sectores que consumen una pequeña cantidad de insumos intermedios y asignan su producción a consumidores de demanda final.	Arrastre: Sectores que tienen un alto consumo intermedio y son en su mayoría proveedores de los consumidores de demanda final.
FL>1	Proveedor: sectores que tienen una baja demanda de insumos, pero suministran muchos insumos a otros sectores.	Clave: Sectores que son fuertes demandantes y proveedores de insumos intermedios.

Fuente: Adaptación de Boundi Charki (2016)

Tabla 6.2 Clasificación de sectores según Chenery-Watanabe

	BL<1	BL>1
FL<1	IV. No manufacturero/ demanda final: Sectores que no compran cantidades significativas de otros sectores, ni venden sus productos a otros sectores en una cantidad significativa.	III. Manufacturero demanda final: Sectores que consumen grandes cantidades de insumos de otros sectores, y la mayor parte de su producción va directamente a los consumidores de demanda final.
FL>1	I. No manufacturero/cadena de suministro: Sectores que venden una cantidad significativa de su producción a otros sectores, pero no consumen grandes cantidades de insumos.	II Manufacturero/cadena de suministro: Sectores que consumen grandes cantidades de insumos y venden su producción a otros sectores.

Fuente: Adaptación de Schuschny (2005)

6.3 Resultados y discusión

Las emisiones directas totales de Puebla debido a su consumo de electricidad fueron de 11.66 y 15.07 MMT CO₂e en 2008 y 2013 respectivamente, a diferencia del capítulo 5 para el cálculo de la huella de carbono eléctrica, en este capítulo sí se incluyeron las exportaciones para calcular la demanda final, es decir, usamos la sumatoria del consumo final más exportaciones para obtener el total de la demanda final de cada sector.

La figura 12 muestra los cinco sectores que tuvieron la mayor contribución a la huella de carbono eléctrica de Puebla en 2008 y la Figura 13 muestra los cinco

sectores que tuvieron la mayor contribución a la huella de carbono eléctrica de Puebla durante el 2013. Se puede observar que aquellos sectores con las emisiones más altas en 2008 no fueron los mismos que en 2013. Se presenta que hay un crecimiento de más del 100% en la huella de carbono eléctrica del sector F&B, esto pudo deberse a una expansión significativa del sector. De acuerdo con el censo económico 2014 de la industria restaurantera de México, en Puebla esta industria tuvo una tasa de crecimiento del 6.4% entre el 2008 y 2013, mientras que su tasa de crecimiento poblacional fue del 1.4% esto refleja una rápida expansión del sector durante el período estudiado (INEGI, 2014a).

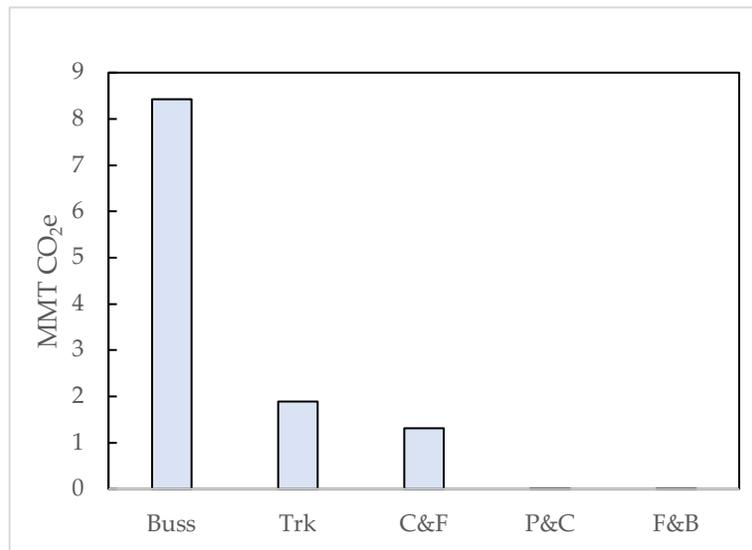


Figura 12. Sectores con mayores emisiones directas de Puebla, 2008. Emisiones directas (barras) en MMT CO₂e. Sectores: Servicios de apoyo a empresas (Buss), Camiones (Trk), Instituciones de crédito e intercambio de intermediación financiera (C&F), Fabricación de petróleo y carbón (P&C), Servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B).

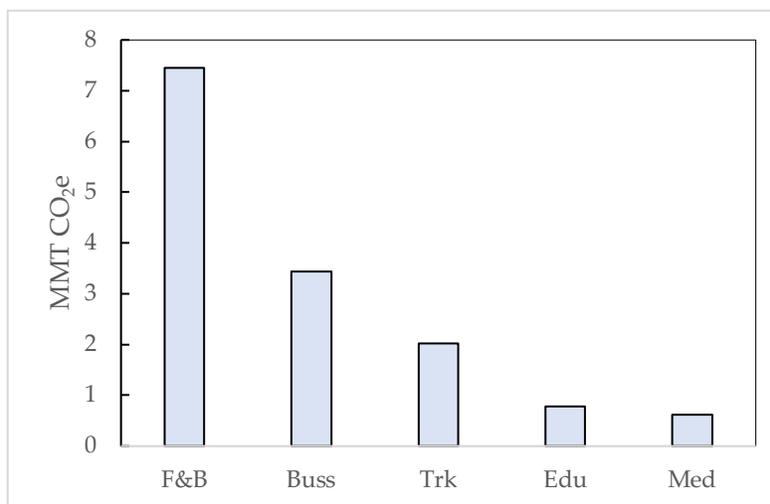


Figura 13. Sectores con mayores emisiones directas de Puebla, 2013. Emisiones directas (barras) en MMT CO₂e. Sectores: Servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B), Servicios de apoyo a empresas (Buss), Camiones (Trk), Servicios educativos (Edu), Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados (Med).

Análisis de descomposición estructural

Nuestro objetivo en este capítulo es comparar los cambios estructurales y la influencia de los vínculos productivos sobre la huella de carbono de la electricidad, mas no cuantificar los efectos de la reducción del factor de emisión. Por lo tanto, supusimos que el factor de emisión de electricidad de 2008 era el mismo que 2013 (0.47 kgCO₂e/kWh).

La figura 14 muestra como en los siete sectores graficados más del 60% del cambio en su producción total está influenciado por los cambios en la demanda final; más allá de los cambios tecnológicos en cada uno de estos, esto puede ser atribuido a todos estos sectores, con excepción del sector Trk, son sectores prestadores de servicios.

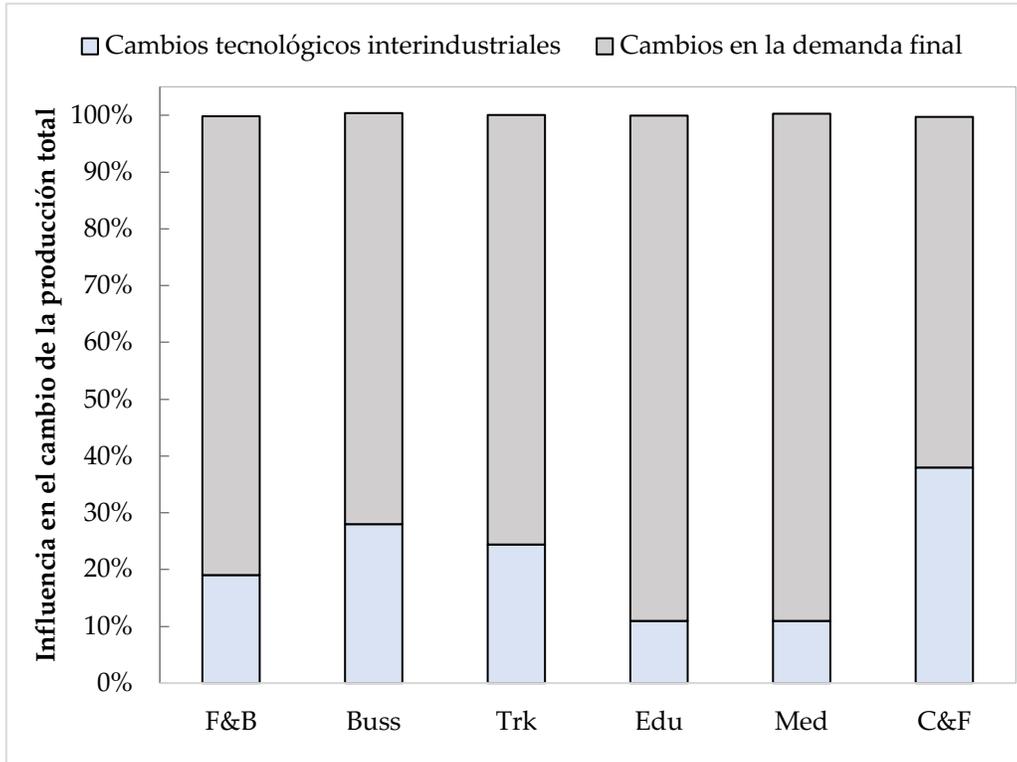


Figura 14. Cambio en la producción total entre 2008 y 2013 de los emisores más altos de Puebla. Contribución de cambio de demanda final (barras grises), contribución de cambio tecnológico (barras azules), que en conjunto conforman el cambio total de producción (100%).

Sectores: Servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B), Servicios de apoyo a negocios (Buss), Camiones (Trk), Servicios educativos (Edu), Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados (Med), Instituciones de crédito e intermediación financiera (C&F), Fabricación de petróleo y carbón (P&C).

Análisis de enlaces productivos

Las figuras 15 y 16 muestran los vínculos directos y totales hacia adelante y hacia atrás de los seis sectores graficados anteriormente en la figura 14, con el objetivo de identificar las variaciones de esos sectores comparando el año 2008 con el 2013. Teniendo en cuenta que los vínculos directos son aquellos relacionados con los requisitos directos y la distribución de cada sector (ver ecuaciones 1 y 2) la Figura 15.A. muestra los enlaces directos hacia adelante y hacia atrás de los sectores con emisiones directas de CO₂e más altas en Puebla debido al uso de electricidad durante 2008. Mientras que la Figura 16.A muestra lo mismo, pero para 2013. Según el "índice" de clasificación de Rasmussen, en la sexta y octava columna de la tabla 6.3 se muestra la clasificación de cada uno de los sectores de la economía poblana, para los dos años estudiados. Por otro lado, las figuras 15.B y 16.B muestran los enlaces totales hacia adelante y hacia atrás de los siete sectores estudiados en este capítulo. Según el "índice" de clasificación de Chenery-Watanabe, la séptima y novena columna de la tabla 6.3 muestran la clasificación de cada uno de los sectores de la economía poblana.

Se puede observar que el sector Buss y Trk fueron los sectores con los enlaces directos y totales más altos. Según el índice de clasificación de Rasmussen, el sector Buss, en 2008, era un "proveedor", lo que significa que tenía una baja demanda de insumos directos, pero suministraba muchos insumos directamente a otros sectores. Mientras que según la clasificación de Chenery-Watanabe, este sector fue un "manufacturero/cadena de suministro", lo que sugiere que este sector compre cantidades significativas de insumos totales y venda sus servicios a otros sectores. El sector Trk, según las clasificaciones de Rasmussen, en 2008, teniendo características similares al sector Buss, siendo un sector de "proveedor" y "fabricante/cadena de suministro".

El sector F&B en 2008 fue un sector "clave" y "fabricante/ cadena de suministro", lo que significa que fue un fuerte proveedor y demandante de insumos intermedios. Pero en 2013 pasó de ser clave a sector proveedor, lo que sugiere que su demanda de insumos directos disminuyó. Los sectores Edu y Med tuvieron un comportamiento similar en 2008 y 2013. Ambas industrias fueron sectores de "arrastre" y "manufacturero/demanda final", lo que significa que eran sectores con alto consumo intermedio y en su mayoría proveedores de grupos de demanda final. En otras palabras, estos fueron sectores que compraron a otros sectores grandes cantidades de insumos, pero la mayoría de su producción fue consumida por individuos y no como insumos de otros sectores.

Por otro lado, los sectores C&F y P&C, de 2013, pueden clasificarse como sectores "independientes" y "no manufacturero/cadena de suministro" lo que sugiere que ambos sectores consumieron una pequeña cantidad de insumos intermedios y pueden considerarse como sectores intermedios de producción primaria.

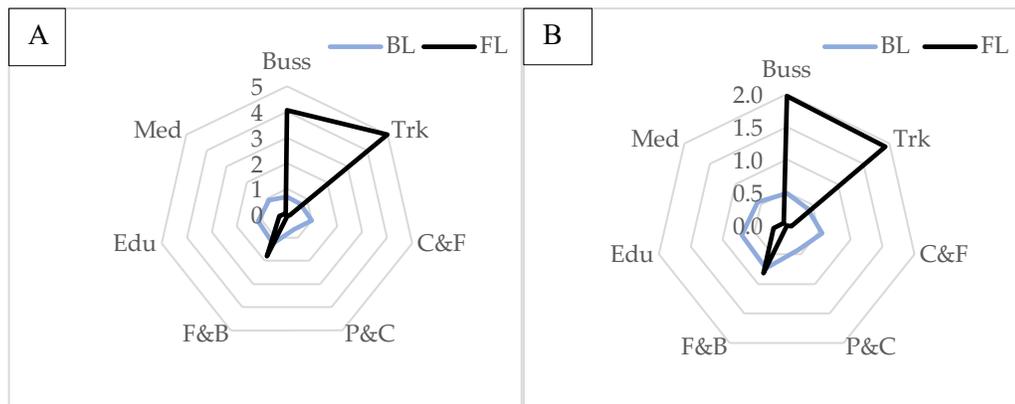


Figura 15. Enlaces productivos de los emisores más altos de Puebla durante el 2008.

15.A. Muestra los enlaces hacia atrás y hacia delante directos de Puebla.

15.B. Muestra los enlaces hacia atrás y hacia adelante totales de Puebla.

Sectores: Servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B), Servicios de apoyo comercial (Buss), Camiones (Trk), Servicios educativos (Edu), Servicios médicos ambulatorios y servicios

*relacionados (Med), Instituciones de crédito e intercambio de intermediación financiera (C&F),
Fabricación de petróleo y carbón (P&C).*

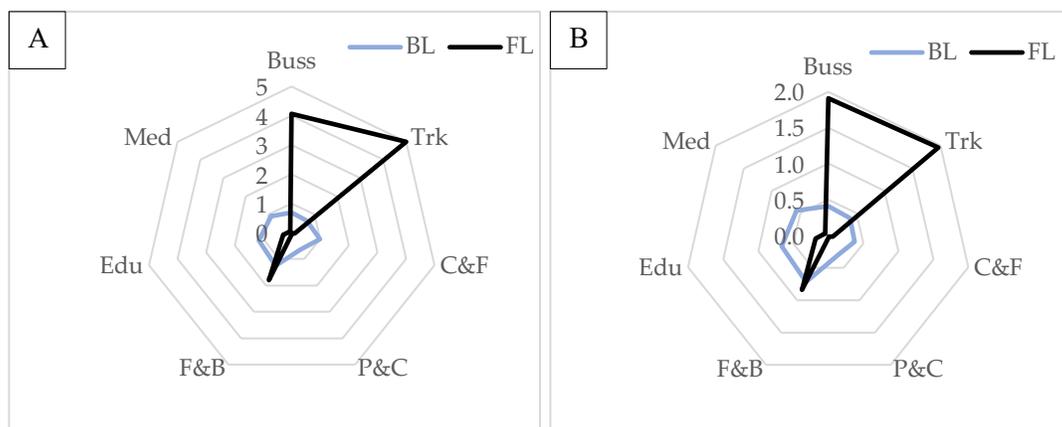


Figura 16. Enlaces productivos de los emisores más altos de Puebla durante 2013.

16.A. Muestra los vínculos hacia atrás y hacia adelante directos de Puebla.

16.B. Total de enlaces hacia atrás y hacia adelante totales de Puebla.

Sectores: Servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B), Servicios de apoyo comercial (Buss), Camiones (Trk), Servicios educativos (Edu), Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados (Med), Instituciones de crédito e intercambio de intermediación financiera (C&F), Fabricación de petróleo y carbón (P&C).

Se puede decir que la huella de carbono eléctrica de Puebla aumentó en un 30% del 2008 al 2013. Nuestros resultados de SDA sugieren que el aumento de CO_{2e} podría ser una consecuencia, primero, de los cambios en la demanda final de la región, y segundo, de las variaciones tecnológicas aplicadas en cada uno de los sectores de estudios. Del mismo modo, los cambios presentados en los enlaces productivos pudieron haber influido en el aumento de la huella de carbono eléctrica. Esto puede ser más obvio cuando el cambio de producción total de los sectores depende principalmente del cambio de demanda final (como los seis sectores en la figura 14). Es interesante ver que el sector Buss y Trk fueron los sectores con las emisiones de

CO_{2e} más altas en 2008. Al mismo tiempo, fueron los sectores con los enlaces directos y totales más altos. Podría significar que esos sectores fueron proveedores de otras industrias al mismo tiempo que sus cambios en la producción total dependieron principalmente de las variaciones de la demanda final, según nuestra APS. Por lo tanto, el impacto de mitigar el CO_{2e} en los procesos de producción de estos sectores podría tener un efecto de mitigación de reenvío en aquellos sectores que consumen los servicios de Buss y Trk como insumos. Para sectores como F&B que se comportan como "clave" y "fabricación/cadena de suministro", sus estrategias de mitigación deben centrarse en ambos influyentes; las innovaciones tecnológicas que utilizan como fabricantes y en la demanda final. Lo más probable es que los cambios en la demanda final estuvieran directamente influenciados por el crecimiento de la población y el consumo. Por otro lado, para sectores como C&F y P&C, que se clasificaron como "independientes" y "no manufactureros/cadena de suministro", puede ser posible que una combinación de estrategias de mitigación como las mejoras tecnológicas (es decir, maquinaria de ahorro eléctrico) en conjunto con campañas de consumo responsable dirigidas a los consumidores finales pueda ser una opción para sectores que entren dentro de esta clasificación.

De este modo podemos decir que, a través del análisis de descomposición estructural, encontramos que los cambios en la producción total de Puebla fueron más influenciados por las variaciones de la demanda final de Puebla que las variaciones tecnológicas ocurridas entre 2008 y 2013. Mientras que, con el análisis de enlaces productivos, identificamos que los sectores con mayor avance en los vínculos fueron aquellos con la mayor huella de carbono. Finalmente, demostramos que la combinación del análisis de descomposición estructural con el análisis de enlaces productivos es un método útil y complementario para analizar la huella de carbono del ciclo de vida cuando se usan tablas de entrada-salida.

A continuación, en la tabla 6.3 se muestran los resultados del análisis de descomposición estructural y de enlaces productivos para los 80 sectores de la economía poblana, analizados.

Tabla 6.3. Resultados análisis de descomposición estructural y enlaces productivos por sector 2008 y 2013

Sector	Emisiones directas (MMT CO ₂ e)		SDA (Influencia en el cambio de la producción total %)		Clasificación de enlaces productivos			
	2008	2013	2008 a 2013		2008	2013		
			<i>Cambios en la demanda final</i>	<i>Cambios tecnológicos</i>	<i>Directos (Rasmussen)</i>	<i>Totales (Chenery- Watanabe)</i>	<i>Directos (Rasmussen)</i>	<i>Totales (Chenery- Watanabe)</i>
Agricultura	2.66E-05	3.22E-04	89%	11%	Independiente	IV	Independiente	IV
Ganado	1.33E-05	1.12E-05	72%	28%	Independiente	IV	Independiente	IV
Planificación forestal	4.64E-05	8.93E-04	94%	6%	Independiente	IV	Proveedor	I
Pesca, caza y captura	5.82E-05	3.55E-06	99%	1%	Arrastre	III	Arrastre	III
Servicios relacionados con la	3.60E-05	1.09E-04	90%	10%	Arrastre	III	Arrastre	III

agricultura y la silvicultura								
Extracción de petróleo y gas	4.83E-05	2.14E-09	86%	14%	Independiente	IV	Independiente	I
Extracción de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas	1.28E-04	2.27E-04	97%	3%	Arrastre	II	Proveedor	II
Servicios relacionados con la minería	1.85E-05	3.51E-05	72%	28%	Independiente	III	Independiente	III
Generación, transmisión y suministro de energía	1.27E-05	3.87E-03	98%	2%	Independiente	IV	Independiente	IV

Suministro de agua y gas al consumidor final (a través de una tubería)	4.19E-05	2.30E-06	100%	0%	Independiente	III	Independiente	III
Edificio	5.25E-05	2.73E-09	78%	22%	Proveedor	I	Proveedor	I
Construcción de obras de ingeniería civil o trabajos pesados.	1.86E-04	1.90E-01	95%	5%	Independiente	III	Independiente	II
Trabajos de construcción especializados	7.06E-06	1.01E-05	72%	28%	Arrastre	III	Arrastre	III
Industria de alimentos	9.35E-06	1.20E-02	82%	18%	Independiente	I	Independiente	I
Industria de bebidas y tabaco	1.32E+00	2.31E-01	62%	38%	Independiente	III	Independiente	III
Fabricación de insumos textiles	4.10E-04	5.38E-04	71%	29%	Arrastre	II	Clave	II

Fabricación de textiles, excepto prendas de vestir	7.41E-04	7.78E-01	89%	11%	Arrastre	III	Arrastre	III
Manufactura de ropa	6.27E-05	7.73E-05	100%	0%	Arrastre	III	Arrastre	III
Fabricación de cuero y materiales sustitutos, excepto prendas de vestir	1.83E-05	6.66E-06	97%	3%	Independiente	III	Independiente	III
Industria de la madera	1.14E-05	5.43E-04	96%	4%	Proveedor	I	Proveedor	I
Industria del papel	1.58E-05	5.19E-05	85%	15%	Arrastre	II	Independiente	III
Imprentas e industrias relacionadas	3.66E-06	3.74E-06	98%	2%	Independiente	III	Independiente	III
Fabricación de petróleo y carbón	3.40E-05	7.93E-06	92%	8%	Proveedor	I	Proveedor	I
Industria química	2.62E-04	6.14E-06	95%	5%	Arrastre	III	Arrastre	III

Plásticos y caucho	4.04E-06	1.03E-09	99%	1%	Arrastre	II	Arrastre	III
Fabricación de productos hechos de minerales no metálicos	6.67E-05	1.55E-04	100%	0%	Independiente	III	Arrastre	III
Industrias básicas del metal	3.14E-04	1.07E-04	98%	2%	Independiente	II	Independiente	II
Productos metálicos fabricados	1.29E-04	3.59E-06	85%	15%	Arrastre	III	Arrastre	III
Fabricación de maquinaria y equipo	3.37E-05	2.54E-04	87%	13%	Independiente	I	Independiente	IV
Fabricación de computadoras, equipos de comunicación, medición y otros equipos,	1.04E-06	3.68E-03	51%	49%	Independiente	III	Independiente	IV

componentes electrónicos y accesorios								
Fabricación de equipos de generación eléctrica, y electrodomésticos y accesorios	6.84E-06	3.76E-10	68%	32%	Independiente	IV	Independiente	IV
Fabricación de equipos de transporte	4.27E-06	1.04E-09	91%	9%	Independiente	IV	Independiente	IV
Fabricación de muebles y productos relacionados	5.45E-04	2.78E-10	96%	4%	Independiente	III	Independiente	III
Otras industrias manufactureras	1.42E-05	6.48E-05	85%	15%	Independiente	III	Independiente	III
Comercio	4.24E-05	3.69E-04	93%	7%	Independiente	IV	Independiente	IV

Transporte aéreo	1.03E-02	5.41E-02	53%	47%	Independiente	IV	Independiente	IV
Transporte ferroviario	7.41E-05	3.04E-03	73%	27%	Proveedor	II	Proveedor	II
Transporte de agua	4.73E-05	4.87E-03	93%	7%	Proveedor	II	Proveedor	I
Camionaje	8.11E-05	5.51E-05	99%	1%	Independiente	II	Independiente	II
Transporte terrestre de pasajeros excepto por ferrocarril	3.57E-05	5.51E-03	88%	12%	Proveedor	I	Proveedor	I
Tubería	3.14E-05	1.75E-05	87%	13%	Arrastre	II	Clave	II
Transporte turístico	4.80E-05	3.22E-06	100%	0%	Arrastre	III	Arrastre	III
Servicios relacionados con el transporte	7.19E-07	2.48E-05	80%	20%	Arrastre	III	Arrastre	III
Servicios postales	2.16E-05	3.83E-04	84%	16%	Independiente	I	Independiente	I
Servicios de mensajería y paquetería	1.59E-04	3.07E-06	100%	0%	Arrastre	III	Arrastre	III

Servicios de almacenaje	5.43E-05	4.17E-04	83%	17%	Proveedor	I	Proveedor	I
Edición de publicaciones y software, excepto a través de Internet	5.76E-04	6.23E-01	89%	11%	Arrastre	III	Arrastre	III
Industria del cine y video, y la industria del sonido	1.48E-05	5.36E-09	80%	20%	Proveedor	II	Proveedor	I
Radio y televisión, excepto a través de Internet	1.11E-04	1.24E-04	99%	1%	Arrastre	III	Arrastre	III
Creación y difusión de contenido solo a través de Internet	5.85E-05	5.96E-02	84%	16%	Independiente	IV	Independiente	IV
Otras telecomunicaciones	2.31E-05	1.69E-05	67%	33%	Arrastre	III	Arrastre	III

Proveedores de acceso a Internet, servicios de búsqueda en la red y servicios de procesamiento de información	2.42E-05	6.06E-03	87%	13%	Proveedor	I	Proveedor	I
Otros servicios de información	1.73E-05	1.45E-05	98%	2%	Arrastre	III	Arrastre	III
Banca central	6.56E-05	5.55E-09	100%	0%	Independiente	IV	Independiente	IV
Instituciones de crédito e intermediación financiera	3.04E-04	5.68E-05	90%	10%	Clave	II	Proveedor	II
Actividades de intercambio comercial e inversión financiera	1.48E-07	2.49E-09	100%	0%	Independiente	IV	Independiente	IV

Fianzas, seguros y pensiones	9.82E-09	9.01E-04	81%	19%	Proveedor	II	Proveedor	I
Servicios inmobiliarios	1.12E-05	3.07E-05	95%	5%	Independiente	IV	Independiente	IV
Servicios de alquiler de bienes personales	6.92E-05	4.42E-06	91%	9%	Independiente	IV	Independiente	III
Servicios de alquiler de marcas, patentes y franquicias	1.36E-05	5.15E-06	98%	2%	Clave	II	Proveedor	II
Profesional, científico y técnico	5.55E-12	3.29E-09	72%	28%	Independiente	IV	Independiente	IV
Gestión de empresas y emprendimientos	2.08E-07	3.40E-02	85%	15%	Proveedor	I	Proveedor	I
Servicios de apoyo a empresas	1.81E-05	1.96E-04	89%	11%	Clave	II	Clave	II

Gestión de residuos y servicios de remediación	7.44E-05	1.22E-03	91%	9%	Proveedor	II	Proveedor	II
Servicios educativos	4.87E-03	7.45E+00	81%	19%	Clave	II	Clave	II
Servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados	1.02E-06	3.03E-05	100%	0%	Independiente	IV	Independiente	III
Hospitales	8.34E-07	1.35E-03	61%	39%	Arrastre	III	Arrastre	III
Hogares asistenciales y asistencia sanitaria	8.19E-05	1.63E-06	100%	0%	Arrastre	III	Arrastre	III
Otros servicios sociales	4.31E-05	2.43E-05	87%	13%	Clave	II	Arrastre	II
Servicios artísticos y deportivos, y	8.61E-06	1.56E-01	59%	41%	Arrastre	III	Arrastre	II

servicios relacionados								
Museos, sitios históricos, jardines botánicos y similares	8.43E+00	3.44E+00	72%	28%	Proveedor	II	Proveedor	II
Servicios de entretenimiento en instalaciones recreativas y otras instalaciones recreativas	8.60E-05	5.97E-10	90%	10%	Arrastre	II	Arrastre	II
Servicios de alojamiento temporal	6.65E-06	6.43E-05	90%	10%	Clave	II	Clave	II
Servicios de preparación de	2.70E-04	1.60E-06	100%	0%	Independiente	III	Independiente	III

alimentos y bebidas								
Servicios de reparación y mantenimiento	1.96E-04	6.45E-05	96%	4%	Proveedor	I	Proveedor	I
Servicios personales	1.63E-04	4.48E-05	86%	14%	Arrastre	II	Arrastre	III
Asociaciones y organizaciones	1.90E+00	2.02E+00	76%	24%	Proveedor	II	Proveedor	II
Hogares privados	3.61E-04	5.17E-06	96%	4%	Arrastre	III	Arrastre	III
Actividades del gobierno	1.22E-03	1.56E-09	69%	31%	Arrastre	III	Proveedor	III
Reexportaciones	5.45E-06	2.47E-06	98%	2%	Independiente	IV	Independiente	IV

Nota: Aquellos sectores que tuvieron cambios bajo la clasificación de enlaces productivos fueron resaltados en negrita.

CAPÍTULO 7

7.1 Flujo de materiales, análisis de intensidad de recursos y desacoplamiento: el caso de México y el estado de Puebla del 2004-2017.

En esta sección, se presenta un análisis de flujo de material de la economía de México y del estado Puebla. En este proceso se calcularon los indicadores extensivos; extracción doméstica de materiales (DME), entrada directa de materiales (DMI), consumo doméstico de materiales (DMC) y el balance físico del comercio (PTB) del 2004 al 2017. Para hacer dichos cálculos nos apegamos al marco de Eurostat (2013). Así mismo, se estimaron algunos indicadores intensivos con la finalidad de comparar el desempeño de México y Puebla respecto al uso de materiales y recursos naturales. Finalmente, se realizó un análisis de desacoplamiento para la economía mexicana. Para poder cuantificar los flujos de material de Puebla, utilizamos un enfoque de arriba hacia abajo, es decir, primero se recopilaron datos nacionales para posteriormente escalarlos a nivel Puebla con el uso de diversos factores de escalamiento económicos, geográficos y demográficos, principalmente obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), como por ejemplo el porcentaje de la participación del estado de Puebla en el PIB, las importaciones, exportaciones nacionales.

7.2 Detalles de la metodología

Indicadores extensivos

Los datos necesarios para calcular los indicadores extensivos del análisis de flujo de materiales de México y Puebla se recopilaron de bases de datos internacionales y nacionales para abarcar los flujos de materiales directos de la extracción doméstica (DE), importaciones, exportaciones, consumo de material doméstico (DMC) y producción doméstica procesada (DPO). Algunos de las fuentes de datos fueron la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el Instituto Mexicano del Servicio Estadístico (INEGI), los anuarios oficiales mexicanos, las estadísticas de la Balanza Comercial de Mercancías de México y los inventarios mexicanos de emisiones de gases de efecto invernadero de los años estudiados. También se usaron datos del Banco Mundial y programa de desarrollo de Naciones Unidas, entre otros. Específicamente los datos del DME de México fueron directamente obtenidos de la base de datos de OECD (2019). Los datos de extracción nacional, importaciones y exportaciones se agregaron en cuatro grupos de materiales principales: biomasa, minerales metálicos, minerales no metálicos y materiales de energía fósiles (combustibles), los cuales están integrados como se muestra en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Composición de grupos de materiales del MFA

Material	Descripción
Biomasa	Compuesta por alimentos y maderas
Maderas	Madera cosechada y productos comercializados esencialmente de madera (papel, muebles, etc.)
Alimentos	Cultivos alimentarios (por ejemplo, cereales, raíces, cultivos azucareros y oleaginosos, frutas, verduras), cultivos forrajeros (incluido el pastoreo), animales salvajes (esencialmente capturas marinas), pequeñas cantidades de biomasa no comestible (por ejemplo, fibras, caucho) y productos afines, incluyendo ganado
Materiales de energía fósil	Carbón, petróleo crudo, gas natural y turba, así como productos manufacturados predominantemente hechos de combustibles fósiles (por ejemplo, plásticos, caucho sintético)
Minerales	Compuesto por minerales de construcción y minerales no metálicos
Minerales de construcción	Comprenden mármol, granito, arenisca, pórfido, basalto, otras piedras ornamentales o de construcción (excluyendo la pizarra); tiza y dolomita; arena y grava; arcillas y caolín; caliza y yeso (primarios o procesados)
Otros minerales no metálicos	Minerales industriales no metálicos, ya sean primarios o procesados (por ejemplo, sales, arsénico, potasa, rocas de fosfato, sulfatos, asbesto)
Metales	Minerales metálicos, metales y productos hechos principalmente de metales como hierro, acero, oro, plata y bronce

Indicadores intensivos y el desacoplamiento

Los indicadores intensivos, como su nombre lo indica, miden la propiedad intensiva de los materiales, la cual es independiente del tamaño del sistema. Para el caso de México y Puebla se estimaron la intensidad del DMC, dividiendo su valor anual entre el PIB del año correspondiente en billones de USD.

Tabla 7.2. Intensidad del DMC y DMC per cápita de México y Puebla 2004-2017

		México													
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
DMC intensidad	DMC	1.28	1.18	1.11	1.04	0.98	1.16	1.03	0.93	0.99	0.96	0.92	1.04	1.16	1.10
	DMC per cápita	9.57	9.75	10.10	10.05	9.85	9.25	9.57	9.48	10.13	10.25	10.08	10.01	10.10	10.29
		Puebla													
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
DMC intensidad	DMC	1.31	1.17	1.13	1.06	0.99	1.15	1.05	0.96	1.03	1.00	0.96	1.02	1.13	1.07
	DMC per cápita	6.21	5.92	6.38	6.24	5.99	5.59	6.01	6.06	6.47	6.30	6.26	5.77	5.75	5.79

También calculamos el factor de desacoplamiento anual de la economía mexicana basados en la metodología propuesta por Gupta (2015), tal como se muestra en la Ecuación 7.1:

$$RD = \frac{EP_f/EF_f}{EP_i/EF_i} \quad (7.1)$$

donde

RD: es la relación de desacoplamiento

EP_f, EP_i : son la presión ambiental del año final e inicial, en este caso el DMC

EF_f, EF_i: la fuerza de impulso económica del año final e inicial, en este caso el índice de desarrollo humano (HDI por sus siglas en inglés, *human development index*).

Es importante mencionar que comúnmente se utiliza el PIB como la fuerza de impulso económica, sin embargo, para nuestro caso de estudio, decidimos usar el HDI ya que este índice no sólo contempla de riqueza de un país, sino que también incluye la esperanza de vida, así como la tasa de alfabetización de adultos y la duración de la educación obligatoria, haciéndolo un indicador más completo que mide la mejora en las condiciones de vida de los habitantes de los países a través de un incremento de la capacidad para cubrir sus necesidades básicas (PNUD, 2002).

Posteriormente usamos la relación de desacoplamiento (RD) para derivar un factor de desacoplamiento (FD) anual, como se muestra en la ecuación 7.2.

$$FD = 1 - RD \quad (7.2)$$

Si el FD es negativo o cero, significa la ausencia de desacoplamiento, si tiene un valor positivo significa que ha ocurrido desacoplamiento en el caso de ese indicador ambiental particular. El FD no indica si el desacoplamiento es absoluto o relativo, pero esto se puede inferir en función de la tasa de crecimiento del EP. En este sentido, el desacoplamiento es absoluto cuando la tasa de crecimiento del EP es negativa o cero, y es relativo cuando la tasa de crecimiento del EP es positiva pero menor que la del EF (Gupta, 2015).

7.3 Resultados y discusión

Indicadores extensivos

Los resultados generales de MFA de México se resumen en la tabla 7.3 y los de Puebla de manera más desagregada en la tabla 7.4. La variación y las tendencias a través de los años de cada componente se muestran, en las figuras 17 a la 21. Los resultados tabulados en general indican el dominio de las importaciones y exportaciones en el MFA del estado de Puebla, dada su ubicación geográfica, densidad de población y otros factores socioeconómicos y políticos.

Tabla 7.3. Análisis de flujo de materiales de México en millones de toneladas métricas (MMT)

Indicador	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Extracción doméstica (DE)	956	994	1020	1024	1005	964	987	1017	969	1001	1001	1006	1019	1031
Importaciones (I)	103	95	111	108	109	89	116	120	157	151	125	133	134	135
Exportaciones (E)	161	153	154	147	136	119	132	136	132	142	137	138	135	132
Entrada directa de material (DMI)	1060	1089	1132	1133	1114	1053	1104	1138	1127	1152	1126	1139	1153	1166
Consumo directo de material (DMC)	1001	1034	1086	1097	1092	1041	1092	1097	1188	1218	1213	1220	1246	1269

Extracción doméstica per cápita (DME PC)	9.15	9.37	9.49	9.38	9.07	8.57	8.65	8.79	8.27	8.42	8.32	8.26	8.26	8.26
Consumo directo de material per cápita (DMC PC)	9.57	9.75	10.1	10.05	9.85	9.25	9.57	9.48	10.13	10.25	10.08	10.01	10.1	10.29
Entrada directa de material (DMI PC)	10.14	10.27	10.52	10.38	10.05	9.36	9.67	9.83	9.61	9.69	9.36	9.35	9.35	9.35

Tabla 7.4. Análisis de flujo de materiales de Puebla en millones de toneladas métricas (MMT)

Indicador	Material	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
DE	TOTAL	35.36	34.83	36.5	36.08	35.07	33.46	34.96	35.71	37.11	36.89	37.97	37.63	37.75	38.5
	Biomasa	11.35	10.61	11.26	11.3	11.27	10.75	11.51	11.13	11.45	11.49	11.91	11.8	11.78	11.94
	Maderas	0.92	0.88	0.89	0.88	0.87	0.85	0.86	0.87	0.87	0.83	0.85	0.83	0.82	0.82
	Alimentos	10.43	9.73	10.37	10.42	10.4	9.9	10.65	10.26	10.58	10.66	11.06	10.97	10.96	11.12
	Materiales de energía fósil	7.78	7.39	7.56	7.1	6.43	6.09	6.19	6.31	6.1	5.77	5.63	5.17	4.98	4.87
	Minerales	11.96	12.31	13.47	12.98	12.68	11.33	10.94	10.75	11.18	10.93	11.37	11.39	11.48	11.76
	Minerales de construcción	11.21	11.54	12.74	12.27	11.92	10.65	10.17	9.93	10.24	9.99	10.42	10.44	10.53	10.79
	Otros minerales no metálicos	0.75	0.78	0.74	0.71	0.76	0.68	0.78	0.83	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.97
	Metales	4.27	4.51	4.21	4.7	4.68	5.29	6.33	7.51	8.38	8.71	9.06	9.26	9.51	9.92

PARTE II: RESULTADOS

<i>I</i>	TOTAL	4.04	3.85	4.54	4.44	4.38	3.74	4.96	4.73	6.13	5.88	4.89	4.65	4.69	4.6
	Biomasa	1.81	1.9	2.21	2.28	2.08	1.82	2.39	2.12	2.17	2.24	2.28	2.3	2.34	2.38
	Maderas	0.44	0.46	0.55	0.62	0.56	0.39	0.45	0.46	0.47	0.5	0.52	0.52	0.53	0.54
	Alimentos	1.38	1.44	1.65	1.66	1.52	1.43	1.94	1.66	1.71	1.74	1.76	1.78	1.81	1.84
	Materiales de energía fósil	1.08	1	1.11	1.11	1.2	1.32	1.4	1.53	1.59	1.4	1.51	1.33	1.42	1.39
	Minerales	0.29	0.21	0.28	0.27	0.21	0.14	0.21	0.4	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23
	Minerales de construcción	0.06	0.06	0.13	0.06	0.06	0.04	0.06	0.21	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09
	Otros minerales no metálicos	0.23	0.16	0.15	0.21	0.15	0.1	0.14	0.18	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
	Metales	0.86	0.73	0.94	0.78	0.89	0.46	0.95	0.67	2.14	2.02	0.88	0.79	0.69	0.6
	<i>E</i>	TOTAL	5.51	5.96	5.36	5.21	5.15	4.79	4.64	4.35	4.18	4.22	4.05	6.04	5.96
Biomasa		0.53	0.61	0.54	0.65	0.73	0.65	0.6	0.58	0.6	0.59	0.59	0.89	0.92	0.95
Maderas		0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
Alimentos		0.5	0.58	0.49	0.61	0.67	0.62	0.57	0.55	0.57	0.55	0.56	0.84	0.86	0.89

<i>DMI</i>	Materiales de energía fósil	3.54	3.88	3.54	3.2	2.94	2.91	2.76	2.43	2.22	2.07	2.01	3.03	2.92	2.85
	Minerales	0.93	0.93	0.79	0.83	0.94	0.79	0.67	0.65	0.68	0.74	0.81	1.2	1.22	1.26
	Minerales de construcción	0.51	0.61	0.53	0.54	0.61	0.46	0.38	0.36	0.38	0.43	0.47	0.7	0.71	0.73
	Otros minerales no metálicos	0.41	0.32	0.26	0.29	0.33	0.32	0.3	0.29	0.3	0.3	0.34	0.5	0.51	0.53
	Metales	0.5	0.53	0.49	0.52	0.54	0.44	0.61	0.69	0.67	0.82	0.64	0.92	0.9	0.89
	TOTAL	39.4	38.68	41.04	40.52	39.45	37.2	39.92	40.43	43.24	42.78	42.86	42.28	42.44	43.1
	Biomasa	13.16	12.51	13.47	13.58	13.35	12.57	13.9	13.25	13.62	13.74	14.18	14.11	14.12	14.32
	Maderas	1.36	1.34	1.45	1.5	1.43	1.24	1.31	1.33	1.34	1.33	1.37	1.35	1.35	1.36
	Alimentos	11.8	11.17	12.02	12.08	11.92	11.33	12.59	11.93	12.28	12.4	12.81	12.76	12.77	12.96
	Materiales de energía fósil	8.85	8.4	8.67	8.21	7.63	7.41	7.59	7.84	7.69	7.16	7.14	6.5	6.4	6.26

DMC	Minerales	12.24	12.53	13.75	13.25	12.9	11.47	11.15	11.15	11.42	11.15	11.6	11.62	11.71	11.99
	Minerales de construcción	11.27	11.59	12.86	12.33	11.98	10.69	10.23	10.14	10.32	10.06	10.5	10.53	10.62	10.88
	Otros minerales no metálicos	0.98	0.93	0.89	0.92	0.91	0.77	0.92	1.01	1.1	1.09	1.1	1.1	1.1	1.12
	Metales	5.13	5.25	5.15	5.48	5.57	5.75	7.28	8.18	10.52	10.73	9.94	10.05	10.21	10.52
	TOTAL	33.89	32.72	35.67	35.31	34.3	32.4	35.28	36.09	39.06	38.56	38.82	36.23	36.48	37.16
	Biomasa	12.63	11.9	12.93	12.93	12.62	11.92	13.31	12.67	13.02	13.15	13.59	13.21	13.2	13.38
	Maderas	1.32	1.3	1.4	1.46	1.37	1.21	1.29	1.29	1.3	1.3	1.33	1.3	1.3	1.31
	Alimentos	11.3	10.6	11.53	11.47	11.25	10.71	12.02	11.38	11.71	11.85	12.26	11.92	11.9	12.07
	Materiales de energía fósil	5.31	4.52	5.13	5.01	4.69	4.51	4.83	5.42	5.47	5.09	5.14	3.47	3.48	3.41
	Minerales	11.32	11.59	12.96	12.42	11.96	10.68	10.47	10.51	10.73	10.41	10.79	10.42	10.49	10.74

<i>DME PC</i>	Minerales de construcción	10.75	10.98	12.33	11.79	11.37	10.23	9.85	9.78	9.93	9.63	10.03	9.83	9.91	10.15
	Otros minerales no metálicos	0.56	0.61	0.63	0.63	0.58	0.45	0.62	0.72	0.8	0.78	0.76	0.59	0.58	0.59
	Metales	4.63	4.71	4.65	4.96	5.03	5.3	6.67	7.49	9.85	9.91	9.3	9.13	9.31	9.63
	TOTAL	6.48	6.3	6.52	6.38	6.12	5.78	5.96	6	6.15	6.03	6.13	6	5.95	6
	Biomasa	2.08	1.92	2.01	2	1.97	1.86	1.96	1.87	1.9	1.88	1.92	1.88	1.86	1.86
	Maderas	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13
	Alimentos	1.91	1.76	1.85	1.84	1.82	1.71	1.81	1.72	1.75	1.74	1.78	1.75	1.73	1.73
	Materiales de energía fósil	1.43	1.34	1.35	1.25	1.12	1.05	1.05	1.06	1.01	0.94	0.91	0.82	0.78	0.76
	Minerales	2.19	2.23	2.41	2.29	2.22	1.96	1.86	1.81	1.85	1.79	1.83	1.82	1.81	1.83
	Minerales de construcción	2.05	2.09	2.28	2.17	2.08	1.84	1.73	1.67	1.7	1.63	1.68	1.66	1.66	1.68

<i>DMC PC</i>	Otros minerales no metálicos	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13	0.14	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	
	Metales	0.78	0.82	0.75	0.83	0.82	0.91	1.08	1.26	1.39	1.42	1.46	1.48	1.5	1.55
	TOTAL	6.21	5.92	6.38	6.24	5.99	5.59	6.01	6.06	6.47	6.3	6.26	5.77	5.75	5.79
	Biomasa	2.32	2.15	2.31	2.28	2.2	2.06	2.27	2.13	2.16	2.15	2.19	2.11	2.08	2.09
	Maderas	0.24	0.24	0.25	0.26	0.24	0.21	0.22	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.2	0.2
	Alimentos	2.07	1.92	2.06	2.03	1.96	1.85	2.05	1.91	1.94	1.94	1.98	1.9	1.88	1.88
	Materiales de energía fósil	0.97	0.82	0.92	0.88	0.82	0.78	0.82	0.91	0.91	0.83	0.83	0.55	0.55	0.53
	Minerales	2.07	2.1	2.32	2.19	2.09	1.84	1.78	1.76	1.78	1.7	1.74	1.66	1.65	1.67
	Minerales de construcción	1.97	1.99	2.2	2.08	1.99	1.77	1.68	1.64	1.64	1.57	1.62	1.57	1.56	1.58
	Otros minerales no metálicos	0.1	0.11	0.11	0.11	0.1	0.08	0.11	0.12	0.13	0.13	0.12	0.09	0.09	0.09
	Metales	0.85	0.85	0.83	0.88	0.88	0.92	1.14	1.26	1.63	1.62	1.5	1.46	1.47	1.5

DMI PC	TOTAL	7.22	7	7.33	7.16	6.89	6.42	6.8	6.79	7.16	6.99	6.91	6.74	6.69	6.72
	Biomasa	2.41	2.26	2.41	2.4	2.33	2.17	2.37	2.23	2.26	2.25	2.29	2.25	2.22	2.23
	Maderas	0.25	0.24	0.26	0.26	0.25	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
	Alimentos	2.16	2.02	2.15	2.14	2.08	1.96	2.15	2	2.03	2.03	2.07	2.03	2.01	2.02
	Materiales de energía fósil	1.62	1.52	1.55	1.45	1.33	1.28	1.29	1.32	1.27	1.17	1.15	1.04	1.01	0.98
	Minerales	2.24	2.27	2.46	2.34	2.25	1.98	1.9	1.87	1.89	1.82	1.87	1.85	1.85	1.87
	Minerales de construcción	2.07	2.1	2.3	2.18	2.09	1.85	1.74	1.7	1.71	1.64	1.69	1.68	1.67	1.7
	Otros minerales no metálicos	0.18	0.17	0.16	0.16	0.16	0.13	0.16	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17
	Metales	0.94	0.95	0.92	0.97	0.97	0.99	1.24	1.37	1.74	1.75	1.6	1.6	1.61	1.64

Extracción doméstica (DE), Importaciones (I), Exportaciones (E), Entrada directa de material (DMI), Consumo directo de material (DMC), Extracción doméstica per cápita (DME PC), Consumo directo de material per cápita (DMC PC), Entrada directa de material per cápita (DMI PC).

Los efectos de la crisis económica del 2008 pueden observarse claramente en todos los indicadores y en la contracción física de la economía de México y Puebla durante el 2009 y 2010, por ejemplo, se puede ver que existió una reducción del 4% en 2010, de 1,024.45 MMT en 2007 a 987.34 MMT en 2010 de la extracción doméstica (DE) de materiales en México, mientras que en Puebla se presentó una contracción de 3% pasando de 37 MMT en 2007 a 35 MMT en 2010. Los resultados también indican que Puebla, como otros estados, municipios y ciudades, depende en gran medida de las importaciones de biomasa y derivados para su sustento, en promedio las importaciones de biomasa representaron el 48% del total de las importaciones del estado entre el 2004 y el 2017.

Extracción doméstica de materiales (DME) y la entrada directa de materiales (DMI)

La entrada directa de material (DMI) nos indica el material físico disponible para una economía, siendo la sumatoria de la extracción doméstica de material (DME) más las importaciones que la región recibe de otras subregiones o países. En la figura 17 podemos ver la evolución de DMI durante el período seleccionado (2004-2017) comparándose México y Puebla. Con los años, este indicador fluctuó hacia arriba y hacia abajo, con una tendencia similar en ambas regiones. No obstante, claramente se puede ver que a partir del 2006 comenzó un decrecimiento significativo del DMI alcanzando el valle en el 2009 y comenzando un periodo de recuperación a partir del 2010, probablemente esto se deba a un decrecimiento económico agravado por la crisis económica mundial del 2008 que también impactó a México y a sus principales sectores productivos.

Otro aspecto importante que considerar es la composición de este indicador, como se muestra en la figura 18, el DMI en México y Puebla se compone principalmente

del DME, mientras que las importaciones no parecen tener un peso tan significativo. Específicamente se observa que la mayor proporción del DME de Puebla fue de biomasa con un 32% del DME total, seguido de minerales con un 31%.

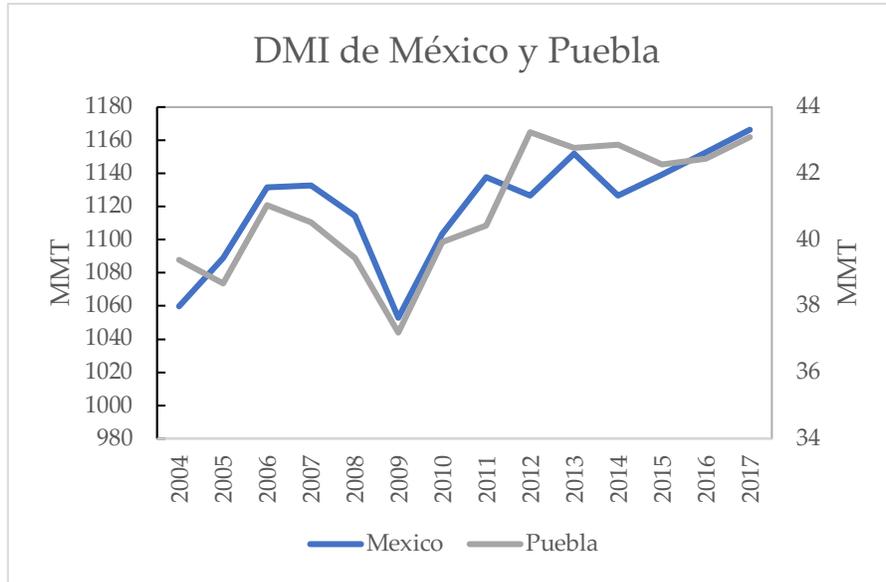


Figura 17. Entrada directa de material (DMI) en México y Puebla 2004-2017.

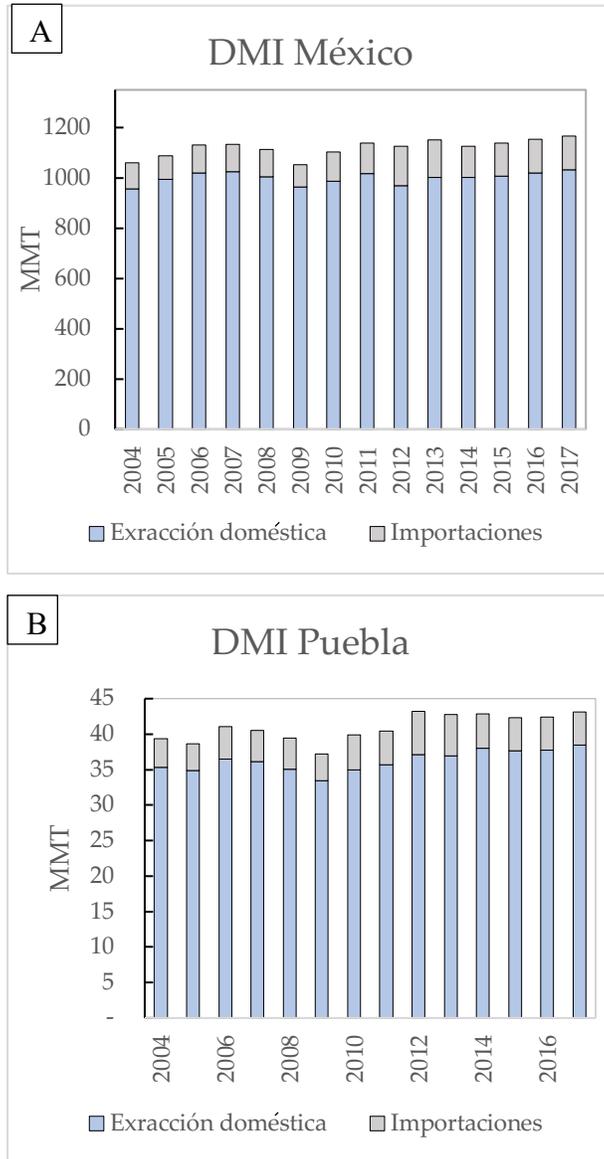


Figura 18. Composición de la entrada directa de material (DMI) de México y Puebla 2004-2017.

Consumo de material doméstico (DMC)

El consumo interno de material (DMC) mide la cantidad anual de materias primas extraídas del territorio nacional o subregión económica focal, más todas las importaciones físicas como entradas de material, menos todas las exportaciones físicas como salida de material del territorio (Eurostat, 2013).

Las gráficas de la figura 19 muestran que tanto en México como en Puebla se ha mantenido un consumo de biomasa con unas variaciones leves, en México el consumo de biomasa creció un 18% de 2004 a 2017, es decir, 67 MMT; mientras que en Puebla el crecimiento fue de 10% pasando de 33 a 37 MMT. Así mismo, se puede observar que en Puebla la composición del DMC fue en promedio de 36% biomasa, 31% minerales, 20% metales y 13% combustibles fósiles, siguiendo una tendencia similar de composición a la de México. Sin embargo, en el estado de Puebla hubo un aumento más pronunciado en consumo de metales. Del 2009 al 2013 hubo un crecimiento del 87% en el consumo estatal, mientras que en México el aumento durante el mismo período solo fue de un 82% y aunque este también fue alto, se sabe que Puebla es el tercer estado mexicano productor de automóviles y autopartes, productos que demandan altas cantidades de acero y aluminio para su fabricación.

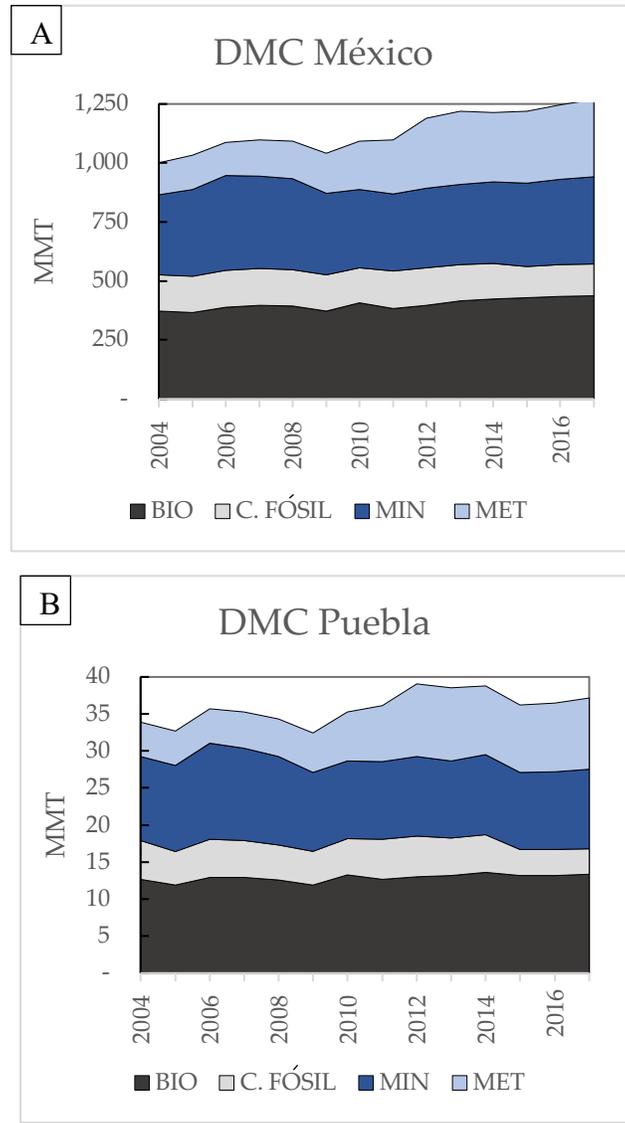


Figura 19. Consumo doméstico de materiales (DMC) de México y Puebla 2004-2017.

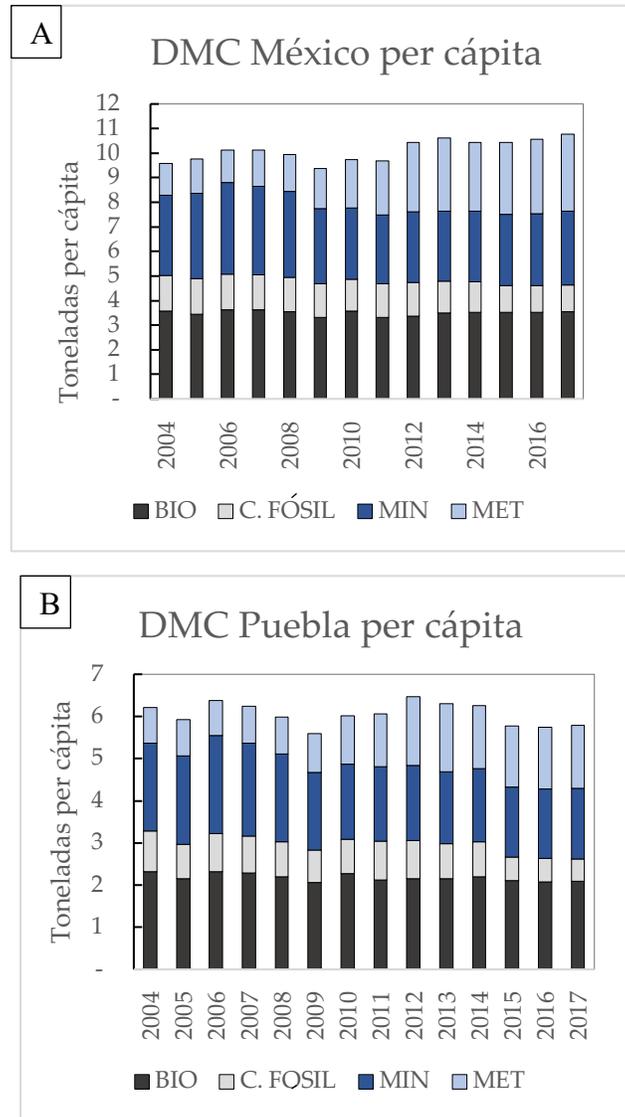


Figura 20. Consumo doméstico de materiales (DMC) per cápita de México y Puebla 2004-2017.

En cuanto al consumo doméstico per cápita, ilustrado en la figura 20, se puede ver que el estado de Puebla siguió una tendencia similar a la nacional durante los años analizados, pero, en promedio el DMC per cápita fue 3.84 toneladas menos al promedio nacional. En México, se puede observar que los materiales con mayor tendencia ascendente durante el período estudiado fueron los metales, con un aumento de 1.83 toneladas per cápita, mientras que el consumo de combustibles

fósiles disminuyó 0.35 toneladas per cápita del 2004 al 2017, esto pudo ser a causa de la descarbonización de la matriz energética. A escala de Puebla se percibe que el consumo de metales per cápita aumentó 0.65 toneladas, mientras que el resto de los materiales presentaron un descenso de consumo per cápita de 0.23 toneladas en la biomasa y de 0.40 toneladas en los combustibles fósiles y los minerales.

Importaciones, exportaciones y balanza comercial física

Si bien las exportaciones de petróleo crudo representaron el mayor ingreso por exportaciones de México durante las últimas décadas, Gonzalez-Martinez y Schandl (2008) afirman que, debido al auge de las industrias de ensamblaje en México, en las últimas décadas, las exportaciones mexicanas han sido principalmente productos manufacturados. Las principales exportaciones de bienes manufacturados de México son automóviles y accesorios de vehículos automotores (World Bank, 2020). Como se muestra en la figura 21, tanto en México como en Puebla, la balanza comercial física (PTB) en su mayoría fue negativa, es decir, que las exportaciones fueron mayores a las importaciones (en toneladas) con excepción del año 2012 y 2013. También se puede observar que las exportaciones tuvieron una tendencia decreciente de 2004 a 2009. En México, la PTB tendió a estabilizarse a partir del 2014 hasta el 2017. Por su parte, en Puebla la PTB fue negativa, al igual que en México durante el 2012 y 2013, las importaciones aumentaron significativamente (31% aproximadamente) para estabilizarse a partir del 2014 a 4.39 MMT, mientras que en las exportaciones vemos un alza importante de casi 49% del 2014 al 2015, esto pudo ser consecuencia de que durante el 2015 la ensambladora de Volkswagen Puebla armó 457 mil vehículos de los cuales cerca del 80% de este volumen fue exportado a los mercados mundiales (Volkswagen, 2017).

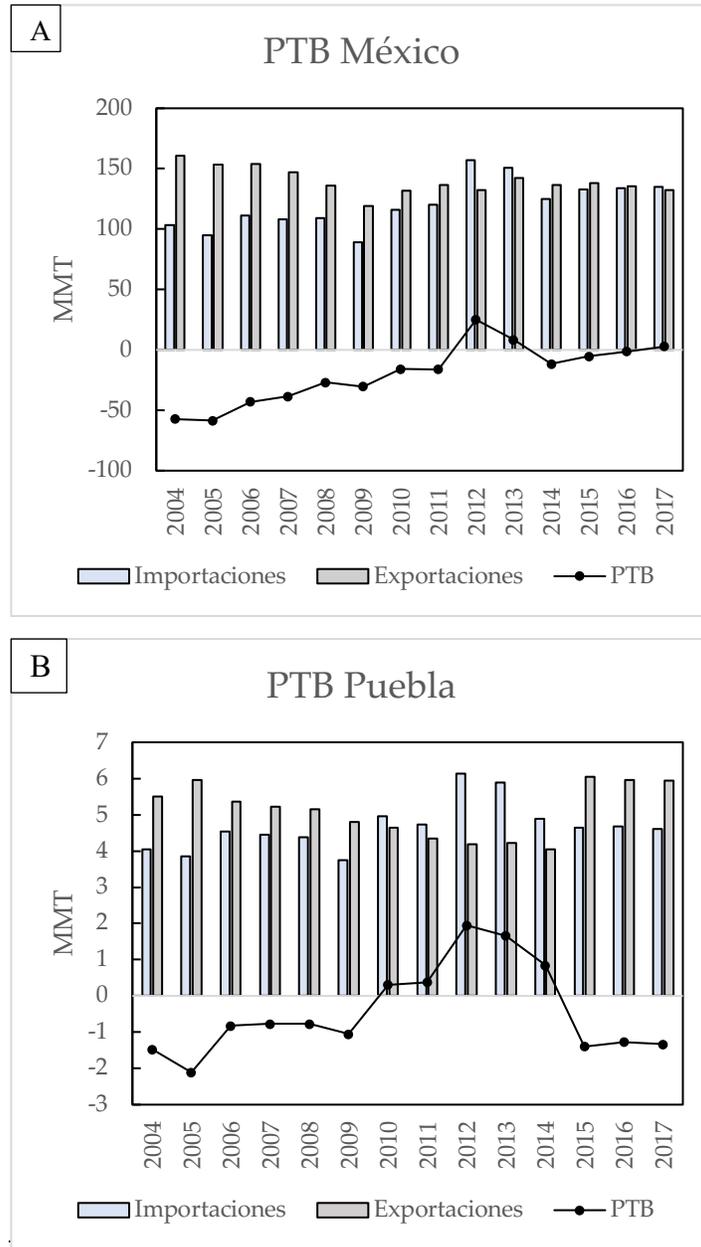


Figura 21. Balanza comercial física (PTB) de México y Puebla 2004-2017.

Indicadores intensivos y desacoplamiento de la economía

Nuestros resultados muestran que Puebla sigue una tendencia análoga a la de la intensidad del DMC nacional. Se puede observar que la intensidad del consumo de materiales en ambas regiones tuvo movimientos al alza y a la baja durante el período estudiado, pero con baja volatilidad; la línea de tendencia nos muestra una sutil disminución de aproximadamente 14%, lo que significa que el consumo ha tendido a ser más eficiente. Ver figura 22.

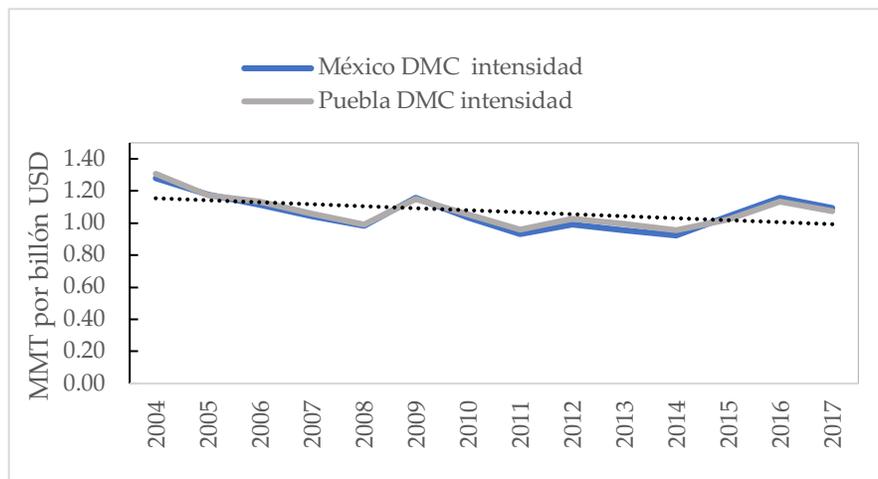


Figura 22. Intensidad del DMC de México y Puebla 2004-2017.

Como se muestra en la figura 23, el análisis de desacoplamiento realizado nos indica que tanto en México como en Puebla el DMC no presentó desacoplamiento absoluto con relación al HDI del país en ninguno de los años estudiados, aunque sí se presentaron algunos años con desacoplamiento relativo en México y Puebla: en 2007, 2008, 2009, 2011 y 2014. En Puebla, el 2005 también fue un año de desacoplamiento relativo. La intermitencia de los períodos de desacoplamiento y la ausencia de desacoplamiento absoluto nos deja ver que el desacoplamiento económico en

México no ha sido una prioridad. Para mayores detalles de los datos usados para realizar el análisis de desacoplamiento, ver las tablas 7.5 y 7.6.

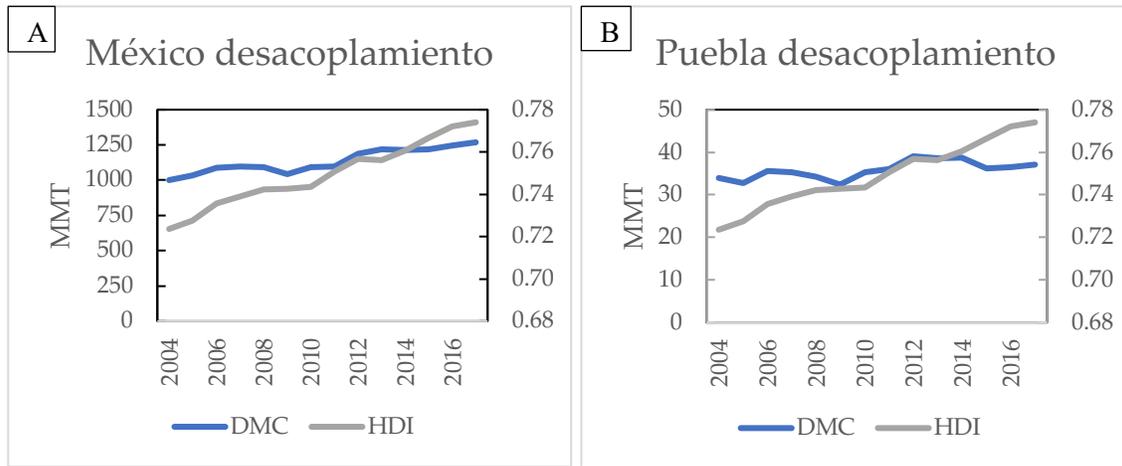


Figura 23. Desacoplamiento de México y Puebla 2004-2017.

Tabla 7.5. Análisis de desacoplamiento del DMC de México 2004-2017

Año	DMC	HDI	Δ	EP/ EF	Razón de desacoplamiento (RD)	1- RD	
2004	1001	0.72		1383			
2005	1034	0.73	1.01	1421	1.03	-0.03	ND
2006	1086	0.74	1.01	1476	1.04	-0.04	ND
2007	1097	0.74	1.00	1485	1.01	-0.01	RD
2008	1092	0.74	1.00	1471	0.99	0.01	RD
2009	1041	0.74	1.00	1401	0.95	0.05	RD
2010	1092	0.74	1.00	1469	1.05	-0.05	ND
2011	1097	0.75	1.01	1462	0.99	0.01	RD
2012	1188	0.76	1.01	1570	1.07	-0.07	ND
2013	1218	0.76	1.00	1611	1.03	-0.03	ND
2014	1213	0.76	1.01	1595	0.99	0.01	RD
2015	1220	0.77	1.01	1591	1.00	0.00	ND

2016	1246	0.77	1.01	1613	1.01	-0.01	ND
2017	1269	0.77	1.00	1639	1.02	-0.02	ND

Tabla 7.6. Análisis de desacoplamiento del DMC de Puebla 2004-2017

Año	DMC	HDI	Δ	EP/ EF	Razón de desacoplamiento (RD)	1- RD	
2004	33.89	0.72		46.83			
2005	32.72	0.73	1.01	44.98	0.96	0.04	RD*
2006	35.67	0.74	1.01	48.49	1.08	-0.08	ND
2007	35.31	0.74	1.00	47.77	0.99	0.01	RD
2008	34.30	0.74	1.00	46.21	0.97	0.03	RD
2009	32.40	0.74	1.00	43.63	0.94	0.06	RD
2010	35.28	0.74	1.00	47.45	1.09	-0.09	ND*
2011	36.09	0.75	1.01	48.08	1.01	-0.01	ND
2012	39.06	0.76	1.01	51.61	1.07	-0.1	ND
2013	38.56	0.76	1.00	50.99	0.99	0.01	RD
2014	38.82	0.76	1.01	51.04	1.00	0.00	ND
2015	36.23	0.77	1.01	47.27	0.93	0.07	RD
2016	36.48	0.77	1.01	47.24	1.00	0.00	ND
2017	37.16	0.77	1.00	48.01	1.02	-0.02	ND

*ND: no hubo desacoplamiento, RD: desacoplamiento relativo

PARTE III: CIERRE

Y

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8

8.1 Conclusiones generales

Una vez presentados y discutidos los resultados obtenidos de la aplicación de las diversas metodologías con enfoque de ecología industrial, este capítulo explica las conclusiones basadas en las preguntas de investigación planteadas en el capítulo 1.

Pregunta 1: ¿Cuál es la huella de carbono generada dado el consumo eléctrico de México y Puebla en el 2013? ¿Cuáles son los sectores con mayor huella de carbono?

De acuerdo a nuestros resultados, el consumo de electricidad por parte del sector industrial y comercial en México causó un total de 151 MMT CO_{2e} de emisiones directas durante el 2013, de los cuales 10.21 millones (8%) fueron generadas en el estado de Puebla, donde estas representaron aproximadamente el 43% (según nuestros cálculos) de las emisiones de la industria dado su consumo energético, mientras que el 57% restantes podría atribuirse a emisiones indirectas, como por ejemplo, emisiones fugitivas o aquellas asociadas a la gestión de sus residuos y aguas residuales, además de aquellas atribuidas al consumo de diversos combustibles fósiles y sus derivados, necesarios para la extracción de materia prima, producción, almacenaje y distribución (transporte) de bienes y servicios. En el capítulo 5 se demostró que la combinación del uso del análisis económico de ciclo de vida con el uso de coeficientes de localización de empleo es un método útil para determinar la huella de carbono nacional (federal, estatal y municipal) dado el

consumo eléctrico derivado de las interacciones de los ochenta sectores industriales y comerciales reportados en la matriz mexicana insumo-producto de la base de datos EORA. En Puebla, los cinco sectores con mayores emisiones directas fueron: servicios de apoyo a empresas (Buss), servicios de preparación de alimentos y bebidas (F&B), camiones (Trk), servicios educativos (Edu), servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados (Med). Mientras que aquellos con emisiones indirectas más altas fueron los mismos sectores, con excepción de servicios educativos, servicios médicos ambulatorios y servicios relacionados, y añadiendo los sectores gobierno (Gov) y servicios de almacenamiento (Sto), la explicación detallada de cada uno de estos sectores y sus emisiones se encuentra desarrollada en el respectivo capítulo.

Pregunta 2: ¿Cómo la estructura económica de México y Puebla y sus intercambios entre industrias influyen a la huella de carbono eléctrica de ambas regiones?

Gracias a la matriz insumo-producto de México y al escalamiento de la matriz de coeficientes técnicos de México al nivel de Puebla fue posible comprender las relaciones entre industrias de los ochenta sectores analizados en esta tesis. Así, fue posible cuantificar los flujos de energía eléctricos necesarios para satisfacer la demanda intermedia y final en ambas economías, y por lo tanto las emisiones directas e indirectas.

Los resultados muestran que, bajo una perspectiva basada en la producción, la variable más influyente en las emisiones directas de CO_{2e}, para el caso de Puebla, fue la tecnología utilizada por cada industria, representada por el vector de intensidad. Las intensidades también jugaron un papel importante cuando se evaluó la huella de carbono desde una perspectiva de consumo. Sumado a ello, bajo esta segunda perspectiva fue posible identificar otras posibles líneas de acción, como una

reestructuración de las relaciones industriales que promuevan la simbiosis industrial, la economía circular y el ecodiseño, así como el impulso a las políticas ambientales enfocadas a la gestión de una demanda final (por parte de los consumidores) más responsable con el medio ambiente.

Así mismo, los resultados revelan la medida de mitigación de generar el 35% de la electricidad mexicana con fuentes renovables para 2024, por si sola, no será suficiente para lograr el objetivo de mitigación de reducciones de 22% para 2030 y 50% para 2050 respecto a la línea base de las emisiones nacionales de GEI, meta planteada en la Contribución Nacionalmente Determinada de México. En consecuencia, las acciones de mitigación complementarias, como las mencionadas anteriormente, serán clave para el logro de los objetivos nacionales de mitigación. El capítulo 5 demuestra que las políticas centradas en mitigar la huella de carbono eléctrica para cada sector de la economía a nivel nacional pueden no ser exactamente las mismas que necesita cada estado o subregión, es decir, que la estrategia de mitigación puede variar según la estructura económica de cada subregión. Con la metodología y el análisis propuesto, fue posible identificar i) aquellos sectores que consumen la mayor cantidad de electricidad a nivel nacional (nivel federal y estatal) y ii) la eficiencia eléctrica de cada sector económico a lo largo de sus cadenas de producción, tanto a nivel federal como estatal. Por lo tanto, la información resultante proporciona insumos relevantes para el diseño de la política climática a diferentes niveles (nacional, estatal o municipal) y para diseñar acciones de mitigación a la medida (*tailor made*) según las características regionales y las necesidades de cada sector.

En resumen, el método sugerido en el capítulo 5 ayuda a evaluar la eficiencia de las políticas de descarbonización de la mezcla energética para selección de medias y metas de mitigación asertivas. Además, este método presenta tres ventajas: primero, se puede lograr con pocos recursos tanto humanos como económicos al no necesitar

el levantamiento de tablas insumo-producto regionales; segundo, el método ayuda a singularizar los sectores con emisiones directas más altas como los que necesitan mejoras tecnológicas; tercero, el método identifica qué parte de la demanda final debe ser el foco de medidas de mitigación debido al alto peso relativo de sus emisiones.

Pregunta 3: ¿Cómo influyen los cambios tecnológicos y de demanda final a la huella de carbono de México y Puebla?

A través del análisis de descomposición estructural en el capítulo 6, se analizó la influencia potencial que los cambios en la estructura económica de Puebla tuvieron en la huella de carbono eléctrica de la región así como el impacto de las variaciones de los enlaces productivos en la huella de carbono eléctrica del estado entre el 2008 y 2013. El SDA presentado confirma que los dos impulsores de los cambios en la producción total de Puebla para cada sector fueron principalmente las variaciones tecnológicas entre industrias y las fluctuaciones en la demanda final. Los resultados muestran que la huella de carbono dado el consumo de electricidad en Puebla presentó un aumento del 30% durante el período estudiado, atribuido principalmente a la demanda final regional. Otros factores como el aumento poblacional o el cambio en el factor de emisiones eléctrico nacional, no se consideraron en el análisis, pues el primero se asumió que está directamente relacionado con el aumento en la demanda final, mientras que el segundo tuvo una variación de minúscula comparando el 2008 versus el 2013 (ver capítulo 6 para mayor detalle).

Es importante mencionar que definir las innovaciones tecnológicas necesarias para la reducción de emisiones en cada uno de los ochenta sectores analizados, está fuera del alcance de este estudio. A pesar de ello, con el uso del SDA-IO, fue posible

determinar cuál fue el porcentaje de influencia que los cambios tecnológicos entre industrias tuvieron en la producción total de cada sector, y por ende de manera indirecta en su huella de carbono, dado su consumo eléctrico, así como la influencia de los cambios de la demanda final. Esto resulta útil al momento de diseñar políticas públicas de mitigación a la medida para cada sector de la economía.

Podemos observar que para los sectores con mayor huella de carbono (mencionados anteriormente) los cambios en la producción total fueron principalmente influenciados por las fluctuaciones de la demanda final de Puebla, que fueron mayores al 62% (ver figura 14). Dichas fluctuaciones, muy probablemente, fueron influenciadas por el crecimiento de la población del 7% entre 2008 y 2013 (INEGI, 2014b). Según las encuestas oficiales del consumo de los hogares mexicanos hubo un crecimiento de hasta 6% bianual en promedio durante el periodo estudiado (INEGI, 2013). Dado que nuestro SDA-IO muestra que las variaciones de la demanda final juegan un papel influyente y significativo en la producción total de la región, el bajo crecimiento (1.56%) del consumo de los hogares mexicanos del 2006 al 2008 pudo haber resultado en una menor huella de carbono eléctrica al compararla con la del 2013.

Con respecto al análisis de los enlaces productivos, se puede decir que para generar estrategias de mitigación regionales asertivas y hechas a la medida, es relevante considerar los vínculos hacia atrás y hacia adelante de cada sector económico de la región. El análisis de enlaces productivos permite comprender si un sector influye en las cadenas de producción de otros sectores, por ser un proveedor o demandante de insumos directo/indirecto. En los resultados del capítulo 6 se puede observar que los sectores con los enlaces directos más altos, es decir, los sectores Buss, Trk y F&B, también fueron los que tuvieron la mayor huella de carbono debido a su uso de electricidad. Esto sugiere que las estrategias de mitigación deberían enfocarse a estos sectores. De este modo, se demuestra que la combinación de SDA

y análisis de enlaces productivos enriquece el estudio de huellas de carbono del ciclo de vida con el uso de matrices insumo-producto, ofreciendo más información para enfocar los esfuerzos de mitigación en aquellos sectores prioritarios.

Pregunta 4: ¿Cómo el contexto macro-económico de México impactó en el perfil biofísico de México y Puebla del 2004-2017?

Si bien el PIB de México tuvo una tasa de crecimiento promedio de 2.80% del 2004 al 2008, el impacto de la recesión económica mundial se dejó notar con una caída del 5.30% en el PIB del 2008 al 2009, sin embargo, se puede decir que su recuperación fue rápida al estabilizarse con una tasa de crecimiento promedio anual de 3% a partir del 2010. Por otro lado, el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) que mide la variación de los precios que los hogares mexicanos deben pagar por los bienes y servicios que consumen, también presentó fluctuaciones durante el período estudiado (2004-2017). Entre 2004 y 2007 creció en promedio un 4.08%, mientras que, en el 2008, esta se disparó creciendo un 6.53% respecto al año anterior, lo cual provoca que los consumidores reduzcan su demanda de bienes y servicios. Posterior al 2008, del 2009 al 2016 el INPC se estabilizó a una tasa promedio de 3.61%.

Los resultados obtenidos de nuestro análisis de flujo de materiales (capítulo 7) muestran que las fluctuaciones del PIB nacional tuvieron una influencia directa en las fluctuaciones en los indicadores extensivos del flujo de materiales de México y Puebla durante el período estudiado, es decir, durante los períodos de expansión del PIB en general, se generó un crecimiento en indicadores como el DMC, el DMC per cápita y el PTB mientras que en los años de contracción del PIB también hubo un decrecimiento en dichos indicadores. Por otro lado, se deja ver que la inflación, y por ende los movimientos en el INPC, tienen una influencia inversa en los indicadores extensivos previamente mencionados, tanto en México como en Puebla.

En cuanto a los indicadores intensivos y de desacoplamiento se observa que a pesar de que en algunos años hubo decrecimiento económico a nivel nacional como estatal, en ningún año del período estudiado hubo una desmaterialización absoluta. Esto pudo ser consecuencia del crecimiento poblacional de todo el país, que pasó de 104 a 125 millones de habitantes durante los trece años estudiados. Sin embargo, ya que para nuestro análisis de desacoplamiento fue usado el HDI como la fuerza de impulso económico (y no el PIB) para ciertos años se observa un desacoplamiento relativo del DMC tanto en México como en Puebla.

8.2 General conclusions

Once the results derived from the application of different methodologies proposed in this doctoral thesis have been presented and discussed, this chapter presents the conclusions based on the research questions listed in Chapter 1. These proposed methodologies come from an industrial ecology approach.

Question 1: What is the carbon footprint generated according to Mexico and Puebla's electricity usage in 2013? Which are the sectors with the highest carbon footprint?

According to our results, the electricity consumption of the industrial and commercial Mexican sectors emitted a total of 151 MMT CO₂e direct emissions during 2013, from which 10.21 million (8%) were generated in the state of Puebla. These are an approximate of 43% (according to our results) of Puebla's industry emissions derived from its energy consumption. Whereas the remaining 57% could be attributed to indirect emissions, for example, those coming from fugitive emissions or those emitted during their solid and water waste management and. Also, those emissions coming from the consumption of various fossil fuels and their

derivatives necessary for the extraction of raw materials, production, storage, and distribution (transport) of goods and services.

Chapter 5 of this thesis shows that the joint use of the economic input-output life cycle analysis and the employment of location quotients provides a useful method to determine the national carbon footprint derived from the electricity consumption from the inter-industrial interactions of the eighty industrial and commercial sectors reported in the Mexican input-output matrix from EORA's database. Through the combination of both methodologies, it was possible to estimate the direct and indirect emissions caused by the electricity consumption for each of the eighty mentioned sectors.

In Puebla, the five sectors with the highest direct emissions were: Business Support Services (Buss) with 4.60 MMT CO₂e, Food and Beverage Preparation Services (F&B) with 2.73 MMT CO₂e, Trucks (Trk) with 1.65 MMT CO₂e, Educational Services (Edu) with 0.43 MMT CO₂e and Ambulatory Medical Services and Related Services (Med) with 0.22 MMT CO₂e. While those with higher indirect emissions were the same sectors, except for the educational services, ambulatory medical services, and related services, and adding the government sector (Gov) with 1.14 MMT CO₂e and storage services (Sto) with 0.20 MMT CO₂e, the detailed explanation of each of these sectors and their emissions are developed in the respective chapter.

Question 2: How do Mexico and Puebla's economic structure and their inter-industrial interactions influence the electric carbon footprint of both regions?

With the use of Mexico's input-output matrix and the scaling of its technical coefficient matrix to Puebla's level, it was possible to understand the inter-industrial relations of the eighty industrial and commercial sectors analyzed in this thesis. By doing so, it was also possible to quantify the electric energy flows necessary to satisfy

the intermediate and final demand of Mexico and Puebla's economy and, therefore, the direct and indirect emissions of both regions.

The results show that, under a production-based perspective, the most influential variable indirect CO_{2e} emissions, in the case of Puebla, was the technology used by each industry, represented by the intensity vector. Intensities also played a significant role when evaluating the carbon footprint when using a consumption perspective. Additionally, under this second perspective, it was possible to identify other possible lines of action, such as a restructuring of industrial relations that promote industrial symbiosis, the circular economy and eco-design, as well as the promotion of environmental policies focused on the management of final demand focusing on more responsible consumption.

Likewise, the results reveal the mitigation measure of generating 35% of Mexico's electricity with renewable sources by 2024, on its own, will not be enough to achieve the mitigation goal of reductions of 22% by 2030 and 50% in relation to the baseline for 2050 of national GHG emissions, a goal set out in Mexico's Nationally Determined Contribution. Consequently, complementary mitigation policies such as those mentioned above will be a key to achieve national mitigation goals.

Chapter 5 shows that the policies focused on mitigating the electric carbon footprint at a national level may not always be the best when applying at a sub-national level (states, municipality, or cities) for each economic sector. With the proposed methodology and analysis, it was possible to identify i) the sectors that consume the highest amount of electricity at the national and regional level and ii) the electrical efficiency of each economic sector throughout its production chains, both at a national and regional level. Therefore, the resulting information can reveal important inputs for designing a climate policy at different levels (national, state, or municipal) as well as mitigating actions tailored to the characteristics and needs of each sector.

To summarize, the method suggested in Chapter 5 helps to assess the efficiency of energy decarbonization policies when choosing assertive mitigation actions and it has three advantages. First, it can be achieved with few human and financial resources since it is not necessary to have regional input-output tables. Second, the method helps to identify the sectors with the highest direct emissions as those that need technological improvements. Third, the method identifies which part of the final demand (final consumption and exports) should be the focus of mitigation measures due to the high relative weight of its emissions.

Question 3: How do technological changes and final demand influence Mexico and Puebla's electric carbon footprint?

Through the analysis of structural decomposition (SDA), Chapter 6 analyzed the potential influence that changes in the structure of the economy of Puebla had on the electrical carbon footprint of the region as well as the impact of changes in the productive links in the electrical carbon footprint of the state of 2008 and 2013. The SDA presented confirms that the two drivers of changes in Puebla's total production for each sector were mainly technological variations such as improvements to make production lines more efficient in their consumption of resources and fluctuations in final demand (see Figure 14). The results show that the carbon footprint given the consumption of electricity in Puebla showed an increase of 30% during the period studied, attributed mainly to the final regional demand and to a lesser extent to the technological variation used by the sectors studied. Other factors such as population growth or the change in the national electricity emissions factor were not considered in the analysis, since the former was assumed to be related to the increase in final demand, while the latter had a minor variation comparing 2008 versus 2013.

It is important to mention that defining which technological innovations should be applied to reduce emissions in each of the sectors analyzed is beyond the scope of this study. Nevertheless, with the use of the SDA-IO, it was possible to determine what percentage of influence technological changes between industries had on the total production of each sector and therefore (indirectly) on its carbon footprint given its electricity consumption, as well as the influence of changes in final demand. This is useful when designing public mitigation policies tailored to each sector of the economy.

We can see that for the sectors with the largest carbon footprint (mentioned above) the changes in total production were mainly influenced by fluctuations in Puebla's final demand, which were greater than 62% (see figure 14). These fluctuations were most likely influenced by the 7% population growth between 2008 and 2013 (INEGI, 2014b). According to official surveys of Mexican household consumption, there was a growth of up to 6% every two years on average during the period studied (INEGI, 2013). Given that our SDA-IO shows that variations in final demand play a significantly influential role in the region's total production, the low growth (1.56%) in Mexican household consumption from 2006 to 2008 may have resulted in a lower electric carbon footprint when compared to 2013.

Concerning the analysis of productive linkages, it can be said that to generate assertive and tailored regional mitigation strategies, it is relevant to consider the backward and forward linkages of each economic sector in the region. The analysis of productive linkages allows us to understand if a sector influences the production chains of other sectors because it is a direct/indirect supplier or an input demander. The results of chapter 6 show that the sectors with the highest direct linkages, i.e., Buss, Trk and F&B, also had the highest carbon footprint due to their electricity use. This suggests that mitigation strategies should focus on these sectors. This shows that the combination of SDA and analysis of productive linkages enriches the study

of life cycle carbon footprints with the use of input-output matrices, providing more information to focus mitigation efforts on those priority sectors.

Question 4: How did Mexico's macro-economic context impacts Mexico and Puebla's biophysical profiles from 2004-2017?

While Mexico's GDP had an average growth rate of 2.80% from 2004 to 2008, the impact of the global economic recession was felt in a 5.30% drop in GDP from 2008 to 2009; however, it can be said that its recovery was rapid as it stabilized with an average annual growth rate of 3% as of 2010. On the other hand, the National Consumer Price Index (NCPI), which measures the variation in prices that Mexican households must pay for the goods and services they consume, also showed fluctuations during the period studied (2004-2017). Between 2004 and 2007 it grew an average of 4.08%, while in 2008 it shot up 6.53% over the previous year, causing consumers to decrease their demand for goods and services. After 2008, from 2009 to 2016 the NCPI stabilized at an average rate of 3.61%. The results obtained from our material flow analysis (chapter 7) show that fluctuations in the national GDP had a direct influence on the fluctuations in the extensive material flow indicators of Mexico and Puebla during the period studied, that is, during periods of overall GDP expansion, growth was generated in indicators such as the DMC, the DMC per capita and the PTB, while in years of GDP contraction there was also a decrease in these indicators. On the other hand, inflation, and therefore movements in the NCPI, have an inverse influence on the previously mentioned extensive indicators, both in Mexico and in Puebla.

Regarding the intensive and decoupling indicators, it can be seen that although in some years there was an economic decrease at a national and state level, in no year

of the period studied was there an absolute dematerialization, this could be a consequence of the population growth of the entire country, which went from 104 to 125 million inhabitants during the thirteen years studied. However, since for our decoupling analysis the HDI was used as the economic driving force (and not the GDP) for certain years, a relative decoupling of the DMC is seen both in Mexico and in Puebla.

8.3 Reflexiones finales

8.3.1 Fortalezas de esta tesis

La contabilidad de emisiones locales, así como del consumo y explotación de recursos naturales, resulta de suma importancia bajo un contexto donde los países deben medir, reportar y verificar sus impactos al medio ambiente con la finalidad de alcanzar sus objetivos nacionales y compromisos internacionales de mitigación y conservación, aun siendo no Anexo I en el Acuerdo de Paris, como lo es México.

En este sentido, la presente tesis doctoral hace un uso práctico de diversas metodologías de la ecología industrial combinadas con el análisis económico-ambiental a nivel nacional y estatal. La aportación de este trabajo consiste en la primera aplicación combinada de dichas metodologías para examinar y cuantificar los impactos ambientales de las actividades económicas del estado de Puebla. Este trabajo representa también una aportación innovadora para la región latinoamericana, al ofrecer una alternativa accesible para cuantificar las emisiones de un sector tan relevante para el desarrollo equitativo, incluyente y sustentable de Latinoamérica, como lo es el sector de la producción, distribución y transmisión de energía eléctrica. Es importante mencionar que la metodología presentada en el capítulo 5 puede ser fácilmente adaptada a la cuantificación de otros tipos de huella,

como la huella hídrica de cada sector, siempre que se cuente con el factor de impacto para el cálculo de esta.

No sólo eso, también esta tesis ofrece una metodología accesible para contar con una primera estimación del perfil biofísico a escala estatal, misma que puede ser sencillamente replicada para cualquier estado, municipio, zona metropolitana o ciudad de México, o Latinoamérica (siempre y cuando se tengan los datos necesarios).

8.3.2 Limitaciones de esta tesis

A pesar de nuestro empeño por reducirlas, este trabajo tiene una serie de limitaciones en relación con aspectos metodológicos, así como decisiones y supuestos que es importante aclarar con la finalidad de que las metodologías expuestas en esta tesis puedan ser replicadas en futuros estudios. En su mayoría las decisiones y supuestos hechos, fueron consecuencia de la disponibilidad o falta de disponibilidad de datos para profundizar en los cálculos.

A continuación, se enlistan los supuestos y su justificación para cada uno de los capítulos medulares de esta tesis:

Para el **capítulo 5 y 6**: “Huella de carbono del ciclo de vida: caso de estudio del uso de electricidad en México y el estado de Puebla” y “Descomposición estructural, enlaces productivos de insumo-producto en el contexto de la huella de carbono eléctrica del estado de Puebla (México)”. Se asumió que:

1. El factor de emisiones de la red eléctrica nacional es el mismo que el del estado de Puebla, debido a que no se contaba con la mezcla de generación eléctrica del estado de Puebla.
2. No se realizó un análisis multirregional de insumo-producto (MRIO por sus siglas en inglés, *multiregional input output model*) lo cual pudiera arrojar datos muy interesantes acerca de la huella de carbono

causada por los intercambios comerciales entre Puebla con el resto de México y con el resto del mundo debido a la falta de datos relacionados con las importaciones y exportaciones de Puebla para cada uno de los ochenta sectores estudiados.

En el **capítulo 7**: “Flujo de materiales, análisis de intensidad de recursos y desacoplamiento: el caso de México y el estado de Puebla del 2004 al 2017” se cuantifican los indicadores extensivos relacionados con las entradas de materiales al territorio de México y Puebla, sin embargo, con la metodología MFA también es posible cuantificar los indicadores relacionados con las salidas de materiales, ya sea por exportaciones de bienes y productos, o a manera de emisiones al aire, agua y suelo. Para el caso de estudio presentado en esta tesis, no fueron cuantificados los indicadores de salidas tales como el Producto Domestico Procesado (DPO por sus siglas en inglés, *domestic material output*) esto a causa de que no se encontraron datos certeros (o datos para la generación de *proxies*) acerca de información como: cantidad exacta de pesticidas y solventes usados a nivel regional para el periodo estudiado (2004-2017), cantidad de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales de Puebla, entre otras.

8.3.3 Futuras líneas de investigación

Una vez señaladas las fortalezas y limitaciones de la presente tesis, resulta interesante mencionar que los resultados y hallazgos obtenidos del análisis cuantitativo y cualitativo presentado da espacio a una amplia gama de posibles futuras líneas de investigaciones, entre ellas:

- Buscar una alternativa para la generación de matrices insumo-producto regionales sin la necesidad de partir de la matriz de coeficientes técnicos combinados con coeficientes de localización.

- Complementar este estudio con un análisis híbrido de LCA para modelar los impactos de las diferentes fuentes de generación de electricidad con el uso de energías renovables.
- Desagregar el sector de generación, transmisión y distribución energía eléctrica para cuantificar el porcentaje de la huella de carbono correspondiente a generación y la fracción correspondiente a transmisión y distribución.
- En caso de contar con los recursos (humanos y económicos), generar los datos e información necesaria para poder realizar un análisis de MRIO para México y sus estados.
- Resultaría interesante replicar el análisis presentado (tanto de EIO-LCA como el SDA y MFA) a las zonas metropolitanas más importantes de México; Zona metropolitana de la Ciudad de México, Zona metropolitana Puebla-Tlaxcala, Zona metropolitana de Monterrey y la Zona metropolitana de Guadalajara. También a otros estados para ver en cuáles se han de priorizar ciertas actividades de mitigación. En este sentido, la elaboración de tablas insumo-producto regionales para México es de alta importancia para el diseño de este tipo de políticas.
- Con el análisis de SDA, es posible analizar otras fuerzas influyentes (*drivers*) de la producción final y la huella de carbono derivada, como por ejemplo el crecimiento poblacional, cambios en el empleo de cada sector, cambios en el valor agregado durante el proceso productivo de cada sector, entre otros.

- Respecto al MFA resultaría interesante traducir los indicadores extensivos como el DMC y el DMI a la huella de materiales (*material footprint*) a nivel nacional y regional con el uso de la herramienta RME (*raw material equivalents*) de Eurostat.

**PARTE IV:
REFERENCIAS Y
ANEXOS**

9. Referencias

- Asuad, N. (2019). *Insumo-Producto Regional. Teoría, metodología, técnicas y estudios de caso* (Facultad de Economía, Ed.). Mexico City: Universidad Nacional Autónoma de México- Colección economía regional urbana.
- Ayres, R. (1994). Industrial metabolism: Theory and policy. In *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. The United Nations University.
- BANXICO. (2020). Producto Interno Bruto.
- Battroid, M. (2011). *Mapa de los municipios del estado de Puebla en México*.
- BBC- Histoty Extra. (2019). The 2008 financial crisis explained. Retrieved from <https://www.historyextra.com/period/modern/financial-crisis-crash-explained-facts-causes/>
- Boundi Charki, F. (2016). Análisis input-output de encadenamientos productivos y sectores clave en la economía mexicana. *Finanzas y Política Económica*. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.2016.8.1.4>
- Center for Energy, & Geology, B. of E. (2013). *Guide to Electric Power in Mexico*.
- CFE. (2020). Comisión Federal de Electricidad.
- Chávez, A. (2017). *Derivation of Basic Input- Output Equations*.
- Chávez, A. (2017). Key Drivers and Future Trends of Urban Carbon Emissions. In S. Dhakal & M. Ruth (Eds.), *Creating Low Carbon Cities*. Springer.
- Chávez, A., Kennedy, C., Chen, B., Chertow, M., Baynes, T., Chen, S., & Bai, X. (2018). Chapter 3: Understanding, Implementing, and Tracking Urban Metabolism Is Key to Urban Futures. In *Urban Planet Knowledge towards*

- Sustainable Cities*. Cambridge University Press.
- CICY. (2020). Cambio Climático Antropogénico.
- CONABIO. (2020). Biodiversidad mexicana. Retrieved from <https://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/quees.html>
- Diario Oficial de la Federación. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. México.
- Diario Oficial de la Federación. (2013). Decreto.
- Diario Oficial de la Federación. (2015a). *Ley de Transición Energética*.
- Diario Oficial de la Federación. (2015b). *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*.
- Enciclopedia Británica. (2007). Puebla.
- EORA-MRIO. (2014). EORA-MRIO.
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1–2), 1–10.
- Eurostat. (2013). *Economy-wide Material Flow Accounts (EW-MFA). Compilation Guide 2013*.
- Eurostat. (2019). Material flows and resource productivity.
- Feng, K., Davis, S., Sun, L., & Hubacek, K. (2015). Drivers of the US CO2 emissions 1997–2013. *Nature Communications*.
- Fischer-Kowalski, M. (1998). Society's Metabolism: The Intellectual History of Material Flow Analysis. Part 1: 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 61–78.
- Flegg, A., Webber, C., & Elliott, M. (1994). On the Appropriate Use of Location

Quotients in Generating Regional Input-Output Tables. *Regional Studies*, 29(6), 547–561.

Frosch, R. A. (1992). Industrial ecology: A philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(3), 800–803.
<https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>

Garner, A., & Gregory, K. (1995). *Industrial ecology: an introduction*.

Gobierno de Puebla. (2020). Proyectan inversiones energéticas en Puebla por 40 mmdp.

Gonzalez-Martinez, A. (2008). *Social Metabolism and Patterns of Material Use. Mexico, South- America and Spain*. Universidad Autónoma de Barcelona.

Gonzalez-Martinez, A., & Schandl, H. (2008). The biophysical perspective of a middle-income economy: Material flows in Mexico. *Journal of Industrial Ecology*.

Green Design Institute. Carnegie Mellon University. (2016a). Creating a Hybrid EIO-LCA and process-based LCA.

Green Design Institute. Carnegie Mellon University. (2016b). Economic Input-Output Life Cycle Assessment. Limitations of the EIO-LCA Method and Models.

Gupta, S. (2015). Decoupling: a step toward sustainable development with reference to OECD countries. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*.

IEA. (2017). *Energy Policies Beyond IEA Countries Mexico 2017*.

- IEA. (2019). Global Energy & CO2 Status Report 2019. The latest trends in energy and emissions in 2018. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions>
- IMCO. (2016). México ratifica el acuerdo de París sobre el Cambio Climático. Retrieved from <https://imco.org.mx/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/>
- INAFED. (2014). *Regionalización de Puebla*. Gobierno del estado de Puebla.
- INECC. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones 2013*.
- INECC. (2015). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero.
- INECC. (2018a). Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC).
- INECC. (2018b). Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional (INDC) para mitigación.
- INECC. (2020). Plataforma de información sobre la implementación de la política climática subnacional.
- INEGI. (2013). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (ENGASTO) 2013.
- INEGI. (2014a). *Censos económicos 2014. La industria restaurantera en México*. Retrieved from [https://www.canirac.org.mx/images/notas/files/Mono_Restaurantera\(1\).pdf](https://www.canirac.org.mx/images/notas/files/Mono_Restaurantera(1).pdf)
- INEGI. (2014b). Estadísticas Puebla.
- INEGI. (2018). Banco de Información Económica.
- International Energy Agency. IEA. (2018). Policies and Measures, Mexico.

- ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
- Jackson, T. (2009). *Prosperity Without Growth. The transition to a sustainable economy*.
- Klemeš, J. J. (2014). Assessing and measuring the environmental impact and sustainability. *21st International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2014 and 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2014, 4*, 1958. Butterworth-Heinemann.
- Lenzen, M., Moran, D., Kenemoto, K., & Geschke, A. (2013). Building Eora: A Global Multi-Regional Input-Output Database at High Country and Sector Resolution. *Economic Systems Research*, *25:1*, 20–49.
<https://doi.org/10.1080/09535314.2013.769938>
- Leontief, W. (1936). Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, (18), 105–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1927837>
- Mattews, S. (2019). Chapter 8: LCA Screening via Economic Input-Output Models. In *Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter* (pp. 211–288). Retrieved from <https://app.boxcn.net/s/5mnzyq1y3gcyjrveubf4>
- Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-Output Analysis Foundations and Extensions* (Second Edi). Cambridge.
- OECD. (2008). *Measuring Material Flows and Resource Productivity*.
- OECD. (2017). OECD.Stat.
- OECD. (2019). OECD.Stat. Retrieved from <https://stats.oecd.org/#>

- Peandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. (2010). Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*. *Environmental Monitoring and Assessment Volume*, 178(1–4), 135–160.
- Piaggio, M., Alcántara, V., & Padilla, E. (2014). Greenhouse gas emissions and economic structure in Uruguay. *Economic Systems Research*, (2), 155–176.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09535314.2013.869559>
- PNUD. (2002). *Informe sobre desarrollo humano*.
- Programa GEI México. (2013). Factor de Emisión Eléctrico 2013. Retrieved from <https://www.geimexico.org/factor.html>
- Regions42D. (2016). *RegionsAdapt 2016 Report: An assessment of risks and actions*. Retrieved from <https://www.regions4.org/publications/regionsadapt-2016-report-an-assessment-of-risks-and-actions>
- REMACV. (2020). Red Mexicana de Análisis de Ciclo de Vida. Retrieved from <https://proyectos.iingen.unam.mx/ciclodevida/es-mx/Publicaciones/Paginas/default.aspx>
- Rip, A., & Kemp, R. (1997). Technological change. In *Human Choice and Climate Change* (pp. 327–400).
- Robert, B. (2004). The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: an Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 12, 997–1010.
- Rueda-Cantuche, J. M. (2006). Input Output Structural Decomposition for Andalusia and Madrid (Spain). *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía y La Empresa*, 1, 38–57.

- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488–1499.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.018>
- Schuschny, A. R. (2005). *Tópicos sobre el modelo de insumo-producto: teoría y aplicaciones*. Santiago de Chile.
- Secretaría de Economía. (2016). Puebla y sus principales sectores productivos y estratégicos.
- SEMARNAT. (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC)*.
- SEMARNAT. (2014). Plan Especial de Cambio Climático.
- SEMARNAT. (2015). Los compromisos de México ante el Cambio Climático.
- SEMARNAT. (2018a). El efecto invernadero. La ciencia del cambio climático.
- SEMARNAT. (2018b). Sexta Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático.
 Retrieved from <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/>
- SENER. (2017a). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2018-2032. In *Secretaría de Energía*.
- SENER. (2017b). *Prospectivas del sector eléctrico 2017-2031*.
- Sistema de Información Energética. (2018). SIE.
- Skolka, J. (1989). Input-Output Structural Decomposition Analysis from Austria. *Journal of Policy Modeling*, 11(1), 45–66.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0161-8938\(89\)90024-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0161-8938(89)90024-0)
- Tachibana, J., Hirota, K., Naohiro, G., & Koichi, F. (2008). A method for regional-scale material flow and decoupling analysis: A demonstration case study of Aichi prefecture, Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 1382–1390.

- UNFCCC. (2019). ¿Qué es el Acuerdo de París?
- United States Census Bureau. (2017). North American Industry Classification System.
- Volkswagen. (2017). Autos que ensambla Volkswagen México.
- Ward, H., Wenz, L., Steckel, J. C., & Minx, J. C. (2017). Truncation Error Estimates in Process Life Cycle Assessment Using Input-Output Analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 00(0). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12655>
- Weisz, H., & Haas, W. (2006). *Economy-wide Material Flow Accounting "Guide for beginners."*
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A Definition of Carbon Footprint. *Ecological Economics Research Trends*, (1), 1–11.
- World Bank. (2020). México datos comerciales básicos: Valor más reciente. World Integrated Trade Solution. Retrieved from <https://wits.worldbank.org/countrysnapshot/es/MEX/textview>
- WRI. (2017). This Interactive Chart Explains World's Top 10 Emitters, and How They have Changed.

10. Anexos

a. Resumen del manuscrito enviado a publicación

Resumen

Los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero estatales y la cuantificación de la huella de carbono a nivel local son fundamentales para cualquier país, principalmente para los países Parte del Acuerdo de París, incluyendo a México, donde los gobiernos nacionales y locales unen esfuerzos para diseñar políticas de mitigación del cambio climático. Sin embargo, realizar inventarios locales requiere recursos económicos que no siempre están disponibles para los gobiernos locales. Para enfrentar esta necesidad, proponemos una alternativa con un método basado en el análisis de ciclo de vida con el uso de tablas insumo-producto y coeficientes de localización para cuantificar las emisiones causadas por el uso de electricidad durante el año 2013, en el estado de Puebla, México. Cuantificamos las emisiones desde la perspectiva de producción y consumo, identificando que la economía de Puebla emitió un total de 15 millones de toneladas métricas de CO₂e debido al uso de electricidad de sus sectores industriales y comerciales. Los sectores con mayores emisiones fueron los sectores de "servicios de preparación de alimentos y bebidas" y los "servicios de apoyo empresarial" que representan el 38% y el 9% de las emisiones totales de Puebla y el 50% y el 23% de las emisiones directas, respectivamente. Concluimos que, además de la descarbonización de la matriz energética, las posibles políticas de mitigación del cambio climático deben apuntar a reducir los factores de intensidad de los sectores más influyentes, identificados bajo la metodología propuesta.

Palabras clave

emisiones de gases de efecto invernadero, consumo eléctrico, matrices insumo-producto, análisis de ciclo de vida, coeficientes de localización.

Abstract

Greenhouse gas emissions' inventories and carbon footprints performed at the local level are critical for any country, mainly for those countries which are part of the Paris Agreement, such as Mexico, where national and local governments join forces to design climate-change mitigation policies. However, determining carbon footprints is time and resource-intensive and not always possible for local governments. To meet this need, we propose an alternative method using lifecycle input-output analysis and location quotients to quantify direct and total emissions of the Mexican state of Puebla caused by its electricity use during the year 2013. We quantify the emissions from the production and consumption based perspective, finding that Puebla's economy emitted a total of 15 million metric tonnes of CO₂e caused by the use of electricity of industrial sectors, this represented 3% of the total national emissions caused by Mexico's industrial electricity use. The most significant contributors to Puebla's total greenhouse gas emissions were the "food and beverage preparation services" and the "business support services" sectors accounting for 38% and 9% of Puebla's total emissions and 50% and 23% of direct emissions, respectively. We conclude that, in addition to the decarbonization of the energy matrix, potential climate change mitigation policies should aim at reducing the intensity factors of the most influential sectors identified with the proposed method.

Keywords

greenhouse gas emissions, electricity consumption, input-output matrices, life cycle analysis, location quotients.

b. Archivos de Excel disponibles en Zenodo

1. *"Inverse Leontief Mexico and Technical coefficients Puebla, Mexico 2013.xlsx"*

para descargar el archivo se debe ingresar a la siguiente liga:

<https://zenodo.org/record/4039582#.X2dvdNZ7mb->.

El archivo contiene:

- La matriz de inversa de Leontief para México con base en la tabla insumo-producto de EORA 2013 calibrada para el sector generación, transmisión y distribución de energía eléctrica
 - La matriz de coeficientes técnicos de Puebla 2013 escalada con coeficientes de localización del 2013.
2. *"MFA Puebla_Mexico 2004-2017"*. Para descargar el archivo se debe ingresar a la siguiente liga: <https://zenodo.org/record/4039612#.X2dy7dZ7mb8>

El archivo contiene la contabilidad y los indicadores extensivos resultantes del análisis de flujo de materiales del estado de Puebla del 2004 al 2017.

11. Difusión de conocimiento generado con esta tesis

a. Pósters y congresos

Presentación en la 9^{na} conferencia de la *International Society of Industrial Ecology* (ISIE), Chicago Illinois, EE. UU., 2017

The Effects of Puebla's Metabolism on Climate Change: Assessing Energy Flow Analysis and Power Generation Infrastructure Forecast

Irais Vázquez
Autonomous University of Barcelona



Overarching Research Question

What will be the climate change effects from Puebla's metabolism, and its future power generation infrastructure needs?



Objectives

General Objectives

- Understand the **climate change impacts** that Puebla's **supply chain** causes (local, regional, national and global).
- Understand and quantify the **energy flows** derived from the demand of **products and services** in Puebla. (Direct and indirect energy flows).
- Understand Puebla's supply chain as well as its energy demand in **economic terms, physical units and CO₂ emissions**.

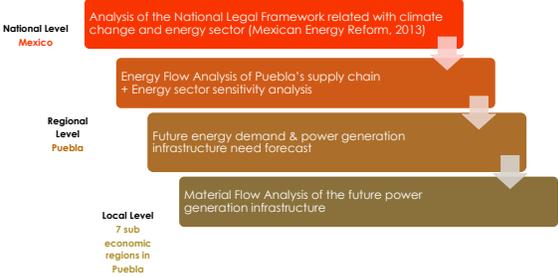
Community Metabolism Analysis Objectives

- Assess the metabolism of the **7 sub-economic regions of Puebla** through the identification and quantification of energy inputs + outputs.

Electricity demand and power generation infrastructure forecast Objectives

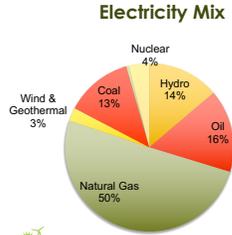
- Identify the need for **new infrastructure** to cover future energy demand with the use of **renewable energy** (wind, hydro, geothermal, etc.).
- Make a **forecast of future energy demand** and propose solutions aligned with the Mexican mitigation/adaptations goals (2030,2050) and international commitments.
- Understand the demand of **materials of future energy infrastructure** and analyze it through the Material Flow Analysis methodology.

Process/Sequence Steps



Preliminary Results
(National scale – Mexico)

Electricity Emission Factor 2013:
Total Direct Emissions/Total Electricity Production ≈ 0.50 kg CO₂e/kWh



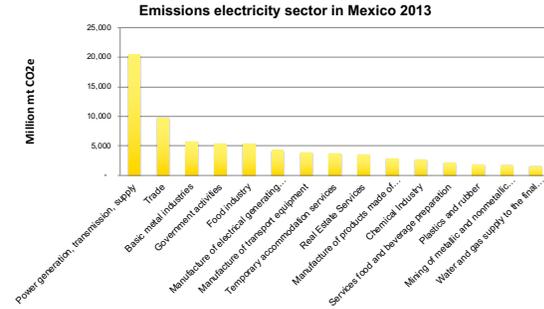
Source: <http://www.beg.utexas.edu/energyecon/2013%20E.pdf>

Carbon footprint

$$CF = [B] [I-A]^{-1} [F]$$

Where:
CF: carbon footprint
B: intensity vector
[I-A]⁻¹: Leontief inverse matrix
F: economic final demand matrix

Preliminary Results
(National scale – Mexico)



Next steps

- Identify the **dominant industrial sectors** in Puebla;
- Quantify the **proportion of each dominant sector** at the **national and regional** levels;
- Calculate the **energy footprint of Puebla** and of its seven economic regions; and
- Develop an energy and **power generation infrastructure** needs forecast.

THANK YOU

Póster en el 1^{er} ICTA Spring Symposium, Barcelona, España, 2018

A Life Cycle Based Electricity Carbon Footprint. The Case of Mexico.

Vázquez, Iraís¹; Villalba, Gara^{1,2*}; Chávez, Abel³.

¹Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona, Building Z, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain.

²Department of Chemical, Biological and Environmental Engineering, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Building Q, Barcelona, Spain.

³Western Center for Environment and Sustainability, Western State Colorado University, 600N Adams St, Gunnison, Colorado, 81231, USA.

* corresponding author: gara.villalba@uab.cat

1. Introduction

In order for federal governments to delegate climate change mitigation strategies and programs to state and municipal governments, GHG inventories at a regional scale are critical for countries with a large territorial extension, like Mexico. We propose the calculation of the Mexican electricity emission factor, an electricity intensity vector and the merging of two key methods; **economic input-output assessment (EIO-LCA)** to estimate the carbon footprint of the electricity industry (power generation, transmission and supply) in México, 2013.

- It can be especially attractive for developing countries which often lack the resources to develop detailed, and preferred, bottom-up data;
- It can be easily replicated annually for periodic monitoring, and;
- It can be applied and scale to any other geographic regions of Mexico. (With the use of **simple location quotients**)

2. Objectives

1. Develop a method of adopting national economic input-output tables (IOT) in order to quantify the life-cycle emissions associated with the power generation and supply sector in Mexico.
2. Identify the industries with the highest electricity consumption and those with the highest direct and indirect CO₂e emissions.
3. Propose feasible quantitative mitigation goals for the electricity industry.

4.1 Electricity emission Factor

The direct emission factor of **0.47 kgCO₂e/ kWh** was estimated by using the direct emission factors reported by Santoyo-Castelazo et al., 2011, and the national electricity mix reported by the Mexican Ministry of Energy.

Energy source	Efficiency max.	Direct emissions kgCO ₂ e/kWh	kgCO ₂ e/kWh
Hydro	14%	0.00	0.00
Oil	16%	0.81	0.13
Natural gas	50%	0.42	0.21
Wind and Geothermal	3%	0.00	0.00
Carbon	13%	0.99	0.13
Diesel	3%	0.72	0.00
Nuclear	4%	0.00	0.00
Total	100%		0.47

3. Mexico's context

Population: 130 million inhabitants
GDP: 1,046 billion USD
Territory: 1,964,375 km²

About 195 countries have signed the Paris Agreement of the UN Framework Convention on Climate Change and thus have agreed to measure, report, and reduce their contribution to global climate change. For large countries such as Mexico, the ability to perform these tasks relies heavily on the commitment of the autonomous governments of the various regions or states.



Thus, the mandate to reduce greenhouse gas (GHG) emissions is first given at the national level, and then each region or state must find a way to comply. For example, Mexico has communicated the intended national contributions, committing to **reduce GHG emissions by 22% by the year 2030 as compared to 2000** (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2017).

Our methodology and estimations can be a complementary tool to periodically quantify GHG emissions derived from electricity consumption. In this way, monitor whether the public action plans and policies, applied to the energy sector, are aligned with the national mitigation goals.

4.2 EIO-LCA

Economic Input Output – Life Cycle Assessment

In any IO model, Total Output is represented by the sum across each row, for each sector.

$$X_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{in} + Y_i \dots [1]$$

Where: Y_i = Final Demand + Final Consumption + Exports; Z are inter-industry transactions.

The inter-industry flows (Z) can be shown as a % of industry/sector output.

$$A_{ij} = z_{ij} / y_j \dots [2]$$

The model continues until we obtained,

$$X = (I - A)^{-1} Y \dots [3]$$

Where $(I - A)^{-1}$ is known as the Leontief Total Requirements matrix. Then, knowing that:

$$L = (I - A)^{-1} \dots [4]$$

And:

$$X = (I - A)^{-1} (Y) \dots [5]$$

Substituting (5) into (6) gives:

$$X = (L) (Y) \dots [6]$$

We could obtain the carbon footprint by multiplying by an intensity vector named "B": **Carbon Footprint = X * B ... [8]**

4.1 Intensity Vector & Location Quotients

Intensity Vector "B"



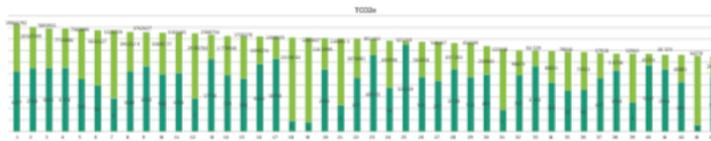
Simple Location Quotients

SIQ is a valuable way of quantifying how concentrated a particular industry or demographic group is in a region as compared to the nation.

$$SIQ = \frac{E^R_j / E^N_j}{E^R / E^N} \quad E^R_j = \frac{E^R_j}{E^R} \quad E^N_j = \frac{E^N_j}{E^N}$$

Where E^R_j and E^N_j are employment in sector j in region R and total employment in region R respectively, and E^R and E^N are employment in sector j and total employment in the nation as a whole (Miller and Blair, 2009).

5. Results and Conclusions



- The total electricity demand of the 80 Mexican industries had an environmental impact of **115,045,028 TCO₂e** direct emissions.
- While the life cycle emissions of the total electricity production totaled **562,557 TCO₂e**.
- The electricity industry emitted a total **321,260 TCO₂e** direct emissions.
- Our results can be a very important contribution to the monitoring, regulation and implementation of the mitigation goals established in the Mexico's mitigation goals. It can also be a complementary tool for the national and regional CO₂e emission inventories.

References

Center for Energy and Bureau of Economic Geology 2013. *Guide to Electricity Power in Mexico*.
IDRA-MRID 2014 "IDRA-MRID" <http://www.idra-mrid.com>, (March, 2015).
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <http://www.inecologia.gob.mx>, (July 2017).
Miller, Ronald L., and Peter D. Blair. 2009. *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Second Edition. Cambridge.
Santoyo-Castelazo, E., H. Gallo, and A. Arango. 2011. "Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Mexico." *Energy* 36(2): 1489-95.

<http://www.sostenipra.cat/>



Póster en la 15^{va} conferencia de la *International Society of Ecological Economics (ISEE)*, Puebla, México, 2018.

Simplifying Life Cycle Carbon Footprint: The Case of Electricity Consumption of Puebla, Mexico.

Vázquez, I.¹; Madrid, C.²; Chávez, A.³; Villalba, G.⁴ *

¹Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona, Building 2, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain.
²Center for Industrial Ecology, School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, 380 Edwards St. 06511 New Haven, CT, USA.
³Western Center for Environment and Sustainability, Western State Colorado University, 600N Adams St, Gunnison, Colorado, 81231, USA.
⁴Department of Chemical, Biological and Environmental Engineering, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Building Q, Barcelona, Spain.

* corresponding author: irais.vazquez@uab.cat

1. Introduction

We illustrate a simplified method using **economic input output- life cycle analysis (EIO-LCA)** and **employment location quotients** to estimate the **electricity carbon-footprint** of Puebla's use during 2013. Puebla's **carbon-footprint** was quantified from two perspectives: **production and consumption approach**.

Advantages of the presented method are:

- Helps with the generation of bottom up metabolic data, generally difficult to obtain;
- Can be a complementary tool for regional GHG inventories;
- Easy to replicated annually for periodic monitoring, and;
- Can be applied to any other state or geographic regions of Mexico or other countries.



4. Methodology

4.1 Electricity Emission Factor

Energy source	Electricity grid-mix ²	Electricity emission factor	
		Direct emission factor by energy source ³	kgCO ₂ /kWh
Natural Gas	50%	0.42	0.21
Oil	16%	0.81	0.13
Hydraulic	14%	0	0
Carbon	13%	0.99	0.13
Eolic and Geothermal	3%	0	0
Nuclear	3%	0	0
Diesel	1%	0.72	0
Total	100%	-	0.47

4.2 Intensity Vector

Impact Vector "b"

kgCO₂/\$total Output



4.3 Economic Input Output Life Cycle Assessment

In any IO model, Total Output is represented by the sum across each row, for each sector.

$$X_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{i18} + Y_i$$

From a production approach, the direct emissions (d) for each sector was calculated as:

$$d = \hat{b} \hat{x}$$

While from a consumption approach, with the use of the Leontief matrix (L) it was possible to obtain the total emissions (T) emitted to settle Puebla's final demand (y):

$$T = \hat{b} L \hat{y}$$

We used a modified Leontief matrix, to obtain the indirect emission :

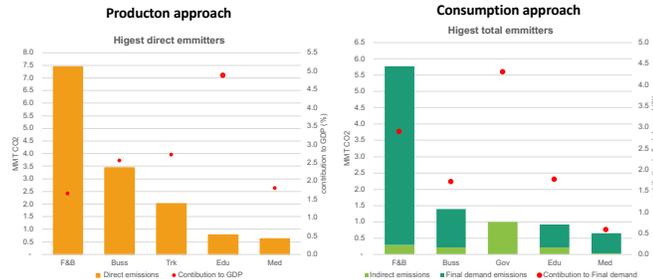
$$I_{nd} = \hat{b} L_{mod} \hat{y}$$

Lastly final demand emissions were calculated:

$$fd_{CO_2} = T - I_{nd}$$

5. Results and Conclusion

- The state of Puebla, Mexico, 2013 emitted a total of about **15 MMT** of CO₂ due to the electricity use of its 80 industrial and commercial sectors.
- Mitigation strategies should **not** be only focused on the **de-carbonization of the energy matrix**.
- Sectors with highest emissions, need to become **less intense** by improving the used technology.
- To mitigate more emissions its crucial that the most emitting sectors, were more aware of the **electricity consumption in their supply chain**.



Sector	Abbreviation	Electricity intensity value (kgCO ₂ /\$ ₁₀₀)
Food and beverage preparation services	F&B	693
Business support services	Buss	252
Trucking	Trk	212
Educational services	Edu	146
Outpatient medical services and related services	Med	386
Government activities	Gov	0

References

Center for Energy, and Bureau of Economic Geology. 2013. *Guide to Electric Power in Mexico*. EORA-MRIO. 2014. "EORA-MRIO." <http://www.worldmrio.com>, (March, 2017).
 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www.gob.mx/inecc>, (July, 2017).
 Miller, Ronald E., and Peter D. Blair. 2009. *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Second Edn. Cambridge.
 Santoyo-Castelazo, E., H. Gujba, and A. Azapagic. 2011. "Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Mexico." *Energy* 36(3): 1488–99.



Póster en el 2^{do} ICTA Spring Symposium, Barcelona, España, 2019

Simplifying Life Cycle Carbon Footprint: The Case of Electricity Use of Puebla, Mexico.



Vázquez, I^{1,*}; Madrid, C^{1,2}; Chávez, A³; Villalba, G⁴.

¹Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona, Building Z, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain.

²Center for Industrial Ecology, School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, 380 Edwards St. 06511 New Haven, CT, USA.

³Western Center for Environment and Sustainability, Western Colorado University, 1 Western Way, Gunnison, Colorado, 81231, USA.

⁴Department of Chemical, Biological and Environmental Engineering, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Building Q, Barcelona, Spain.

* corresponding author: irais.vazquez@uab.cat

1. Introduction

We illustrate a simplified method using **Economic Input Output- Life Cycle Analysis (EIO-LCA)** and **employment location quotients** to estimate the carbon-footprint of Puebla's electricity use during 2013. Puebla's **electricity carbon-footprint** was quantified from two perspectives: **production and consumption approach**.

Advantages of the presented method are:

- Generates bottom up metabolic data, usually difficult to obtain;
- Complementary tool for regional GHG inventories;
- Easy to replicated annually for periodic monitoring, and;
- Can be applied to any geographic regions in Mexico or other countries.

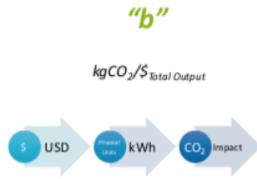


2. Methodology

2.1 Electricity Emission Factor

Energy source	Electricity grid mix	Electricity emission factor	
		Direct emission factor by energy source	kgCO ₂ /kWh
Natural Gas	50%	0.42	0.21
Oil	36%	0.81	0.13
Hydraulic	14%	0	0
Carbon	13%	0.99	0.13
Eolic and Geo thermal	3%	0	0
Nuclear	3%	0	0
Diesel	1%	0.72	0
Total	100%	-	0.47

2.2 Electricity Impact Vector



2.3 Economic Input Output Life Cycle Assessment

In any IO model, Total Output (**X**) is represented by the sum across each matrix's row, for each sector. Where **Z** represents the inter-industrial flows. And **Y** the regional final demand:

$$X_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{in} + Y_i$$

From a **production approach**, the **direct emissions (d)** for each sector were calculated as:

$$d = b \hat{x}$$

While from a **consumption approach**, with the use of the Leontief matrix (**L**) it was possible to obtain the **total emissions (T)** emitted to settle Puebla's final demand:

$$T = b L \hat{y}$$

We used a modified Leontief matrix, to obtain the **indirect emission:**

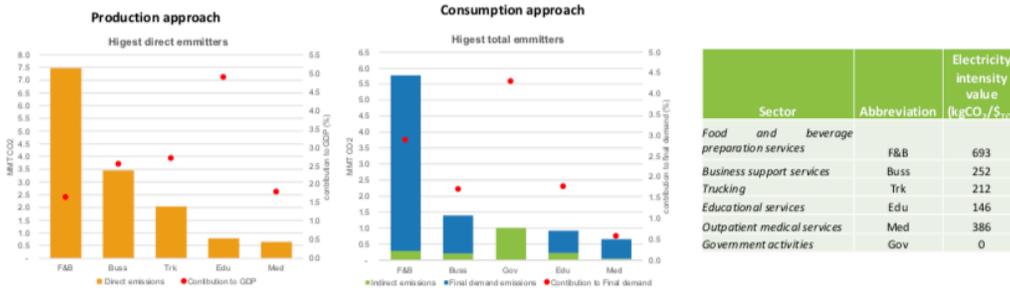
$$I_{ind} = \hat{b} L_{mod} \hat{y}$$

Lastly, **final demand emissions** were calculated:

$$fd_{CO_2} = T - I_{ind}$$

3. Results and Conclusion

- The state of Puebla, Mexico emitted a total of **15 MMT of CO₂** due to the electricity use of its 80 industrial and commercial sectors, in 2013.
- Mitigation strategies should **not be only** focused on the **de-carbonization of the energy matrix**.
- Sectors with the highest emissions, need to become **less intense** by improving the used technology.
- To mitigate more emissions, it is crucial that all sectors were more aware of the **electricity consumption in their supply chain**.



References

Center for Energy and Bureau of Economic Geology. 2013. Guide to Electric Power in Mexico. EORA-MRIO. 2014. "EORA-MRIO." <http://www.worldmrio.com>, (March, 2017).
 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www.gob.mx/mec>, (July, 2017).
 Miller, Ronald E., and Peter D. Blair. 2009. *Input-Output Analysis Foundations and Extensions*. Second Ed. Cambridge.
 Sanjoto-Castellano, E., H. Gujba, and A. Asparagic. 2011. "Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Mexico." *Energy* 36(3): 1488-99.



- b. Congreso de Sustentabilidad: Ecología industrial por un sector energético sustentable en México- organización e instrucción, Puebla, México, 2018.



