



Caracterización de metodologías para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano ^a

Characterization of Methodologies for the Integrated Assessment of Urban Transportation Sustainability

Recibido: Abril 20, 2021 | Aceptado: Septiembre 23, 2021 | Publicado: Julio 15, 2022

Elena Valentina Gutiérrez *

Universidad del Valle, Cali, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-735X>

Maria Fernanda Flórez

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1603-921X>

Juan Sebastian Mazo

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7645-862X>

Santiago Medina-Pacheco

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9172-2399>

Maria Cristina Aristizábal

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1139-8611>

Laura M Cardenas-Ardila

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7361-5730>

^a Artículo de revisión

* Autor de correspondencia. Correo: valentina.gutierrez@correounivalle.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.11144/javeriana.iued26.cmia>

Como citar este artículo:

E.V. Gutiérrez, M. F. Flórez, J. S. Mazo, S. Medina-Pacheco, M.C. Aristizábal, L.M. Cardenas-Ardila, "Caracterización de metodologías para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano" Ing. Univ. vol. 26, 2022. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued26.cmei>

Resumen

Objetivo: Caracterizar las metodologías para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano, e identificar las oportunidades de investigación en países en desarrollo. **Materiales y métodos:** Se hace una revisión estructurada de la literatura en tres etapas y se propone una taxonomía para la caracterización de marcos conceptuales, modelos analíticos, índices e indicadores. Se presenta también un análisis de los indicadores en once categorías propuestas. **Resultados y discusión:** Se evidencia un incremento en la literatura científica e institucional dedicada al estudio de metodologías para la evaluación de la sostenibilidad en las últimas dos décadas. Sin embargo, se observa también la carencia de métodos que permitan incluir las dimensiones económica, ambiental y social de manera integral, en particular para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de transporte urbano. La mayor parte de los trabajos está centrada en el desarrollo de índices e indicadores, y en la aplicación en países europeos y norteamericanos. **Conclusiones:** La caracterización identifica cuáles son las metodologías, las instituciones y los países que han implementado evaluaciones integradas de la sostenibilidad del transporte urbano. Igualmente, se identifican las dimensiones de la sostenibilidad más estudiadas, y se reseñan las oportunidades de investigación en países en desarrollo.

Palabras clave: Sostenibilidad, Transporte urbano, Países en desarrollo.

Abstract

Objective: To characterize methodologies for the integrated assessment of urban transportation sustainability, identifying research opportunities in developing countries. **Materials and methods:** A three-stage structured literature review is presented, and a taxonomy is proposed aiming at characterizing conceptual frameworks, analytical models, and indexes and indicators. An analysis of indicators based on the eleven categories proposed is also presented. **Results and discussion:** The increase of scientific and institutional literature studying methodologies for sustainability assessment in the last two decades is evidenced. However, there is a lack of methods that still limits the integral inclusion of the economic, environmental, and social dimensions, particularly in the sustainability assessments of urban transportation. Most works are focused on the introduction of new indices and indicators, and applying methodologies in European and North American countries. **Conclusions:** The characterization identifies the methodologies, institutions, and countries that have implemented methodologies for the integrated assessment of urban transportation sustainability. Likewise, the most frequent sustainability dimensions are identified, are research opportunities in developing countries are outlined.

Keywords: Sustainability, Urban transportation, Developing countries

Introducción

El desarrollo sostenible ha ganado protagonismo como área de investigación en las últimas dos décadas. Países e instituciones han abordado una agenda de trabajo en pro de cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2015-2030, formulados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Sin embargo, desde el trabajo seminal de Barbier [1], se ha reconocido que el mejoramiento económico genera un impacto ambiental y social, y es necesario implementar estrategias para el logro de la sostenibilidad, en las tres dimensiones en las que se cuantifica el desarrollo, conocidas como *Triple Bottom Line* (TBL) [2]: económica, ambiental y social. La sostenibilidad ha sido abordada de manera diferente según el grado de desarrollo económico de los países: en países desarrollados, la sostenibilidad ha girado principalmente en torno a aspectos ambientales [3]. En países en desarrollo la situación es diferente debido a que existen problemáticas socioeconómicas que tienen mayor protagonismo, como altos índices de pobreza, insatisfacción de necesidades básicas y la rápida urbanización [4], [5]. En Latinoamérica y el Caribe, región con 27 países en desarrollo [6], el grado de urbanización cercano al 79% [7], ha generado un crecimiento en la oferta de transporte que no satisface las condiciones de los ODS, y que tiene un impacto negativo en la salud pública, principalmente debido a las emisiones generadas por los modos de transporte y su impacto en la calidad del aire [8].

En este contexto, evaluar el impacto que genera el transporte urbano en la sostenibilidad constituye un reto científico e institucional. La evaluación de la sostenibilidad puede ser entendida como una metodología que apoya el proceso de toma de decisiones para lograr ciudades más sostenibles [9]. A pesar de su relevancia, el estudio del tema ha sido fragmentado. Por un lado, se encuentran estudios enfocados en analizar los efectos del transporte en la contaminación del aire sin incluir el marco de la sostenibilidad [10]–[12], y por otro, estudios enfocados en analizar los efectos de emisiones del transporte en la salud no consideran otras dimensiones de la sostenibilidad [13], [14]. En un intento por estructurar la literatura sobre las metodologías para evaluar la sostenibilidad desde una visión general, que incluye diferentes sectores como la energía, la producción de bienes, y las cadenas de abastecimiento, Ness et al. [15] presentan una clasificación en la que se establece metodologías integradas, es decir, que tengan en cuenta las tres dimensiones del TBL de manera simultánea como una manera de evaluar la sostenibilidad.

Dado el incremento de la literatura dedicada al estudio de la sostenibilidad y a las diferencias entre diversos sectores, es necesario enfocarse en los trabajos que estudian la sostenibilidad en el transporte urbano. Atendiendo esta necesidad, Karjalainen y Juhola [16] presentan una revisión reciente de literatura de metodologías para evaluar la sostenibilidad enfocándose en el transporte urbano, donde se evidenció que la investigación en el campo es altamente fragmentada y la literatura se centra especialmente en casos europeos. Las revisiones en el sector transporte reportan que la literatura en el tema es aún diversa en aproximaciones,

términos y técnicas [17], las metodologías basadas en indicadores son múltiples [18]–[20], y existe una tendencia fuerte a introducir nuevos sistemas de indicadores de medición de sostenibilidad con poca referencia a trabajos previos [16]. Adicionalmente, las metodologías propuestas no consideran aún de manera explícita las interacciones entre las dimensiones de la sostenibilidad, evidenciando la necesidad de estudiar modelos que brinden una visión integral y holística [21].

Para atender la limitación de la literatura en el desarrollo de metodologías para evaluar la sostenibilidad en el sector transporte y considerando la clasificación de metodologías integradas propuesta en [15], este trabajo tiene por objetivo caracterizar las metodologías disponibles en la literatura que consideran de manera simultánea las dimensiones del TBL, para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano (MEIS-TU). De este modo, el trabajo analiza las metodologías existentes desde dicha perspectiva integral y propone una categorización de indicadores que facilita el estudio del sistema de transporte particular en países en desarrollo. Para ello, se hace una revisión estructurada, y utilizando elementos de tres trabajos previos [17], [22], [23], se propone una taxonomía que permite identificar, los marcos conceptuales, los métodos analíticos, y los índices e indicadores de las MEIS-TU. En la revisión se hace especial énfasis en las metodologías aplicables a países en desarrollo, dadas las condiciones particulares y el enfoque diferencial de la sostenibilidad. El análisis también permite identificar las oportunidades de investigación, y el redireccionamiento que se le puede dar a la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano.

Materiales y métodos

Se hizo una revisión estructurada de literatura, la cual utiliza varios conceptos de los métodos sistemáticos [24], [25], y permite establecer los pasos para la búsqueda, selección y síntesis de los principales hallazgos, siguiendo principios de claridad, replicabilidad y objetividad [25], [26]. Así mismo, con base en las ideas de Duque-Urbe et al. [27], la metodología se desarrolló en tres etapas: planeación e identificación, análisis estructurado, y reporte y taxonomía (ver Figura 1). En la primera etapa se identificó una muestra base de trabajos que responde al objetivo de investigación y se definieron los criterios de inclusión y exclusión. En la segunda etapa se hizo un análisis estructurado de la muestra y se identificaron los componentes clave de las MEIS-TU. En la tercera etapa, y con base en los hallazgos conceptuales, se hizo un reporte de los componentes de las MEIS-TU y se propuso una taxonomía para su análisis. La Figura 1 brinda una descripción de las tres etapas.

Figura 1. Metodología usada para la revisión. Con base en Duque-Urbe et al. [27]

Etapas	Pasos	Preguntas orientadoras
Planeación e identificación	Identificación y selección de la literatura	¿Cuál es la literatura que estudia la evaluación de la sostenibilidad de manera integral?
	Análisis por categorías	¿Cuáles son las características de la literatura que estudia la evaluación de la sostenibilidad de manera integral?
	Caracterización de los trabajos	¿En la literatura cuáles son: (1) los tipos de publicaciones; (2) los métodos; (3) los indicadores; (4) los tipos de países; (5) los sectores; (6) las dimensiones del TBL consideradas?
Análisis estructurado	Análisis de objetos de estudio reportados	Dados los objetos de estudio de la literatura, ¿cuáles son los trabajos orientados a la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano?
	Identificación y análisis de componentes	¿Cuáles son los modelos, índices, indicadores y variables reportados en la literatura para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano?
	Análisis de modelos, índices e indicadores	¿Cuáles son las características de los modelos, índices e indicadores utilizados para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano?
Reporte y taxonomía	Construcción de la taxonomía	¿Cómo clasificar y reportar los modelos, índices e indicadores disponibles en la literatura para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano?
	Reporte de modelos conceptuales y analíticos	¿Cómo reportar las características de los modelos existentes en la literatura para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano con base en la taxonomía propuesta?
	Reporte de índices e indicadores	¿Cuáles son los índices e indicadores pertenecientes a los modelos reportados y a revisiones de literatura de la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano? ¿Cómo categorizar los indicadores reportados de la literatura de evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano? ¿Cuáles son los indicadores más citados en la literatura de la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano?

Fuente: elaboración propia

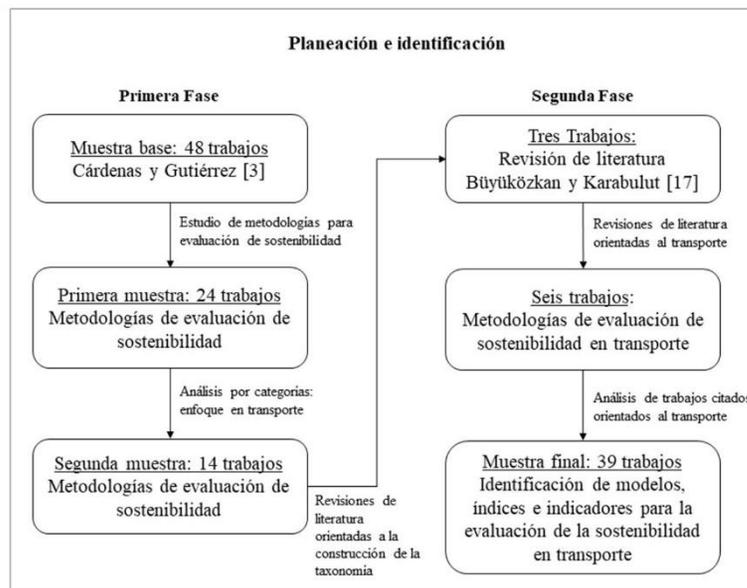
Las revisiones de literatura son importantes para mejorar la comprensión sobre un tema o área, conocer cómo se ha estudiado y cuáles asuntos requieren mayor revisión. La investigación frente a la evaluación de la sostenibilidad es bastante amplia y prueba de ello es la presencia de varias revisiones de literatura [28], [29] que recogen artículos de investigación. Dado el grado de avance que tiene la investigación frente a la evaluación de la sostenibilidad, cobra importancia la necesidad de un estudio integrativo de la literatura disponible. Esto implica la revisión de revisiones de literatura (revisión terciaria de literatura) [30], razón por la que este estudio tiene como punto de partida artículos de revisión de literatura sobre evaluación de sostenibilidad y se concentra en las investigaciones enfocadas en transporte. Se reconoce que dicha delimitación puede desconocer los trabajos publicados en fechas posteriores a los documentos iniciales de la revisión.

Planeación e identificación

La identificación de la literatura se hizo en dos fases. Primero, con base en la literatura reseñada en [3], se seleccionaron aquellos trabajos que de manera expresa estudian alguna metodología para la evaluación de la sostenibilidad. Mediante ese primer criterio de inclusión se encontró una primera muestra de 24 trabajos, la cual fue revisada en su totalidad y se hizo un análisis en seis categorías como se ilustra en la Figura 1. Adicionalmente, se aplicó a la primera muestra un segundo criterio de inclusión: se identificó si cada trabajo tenía un enfoque en transporte. De este modo la muestra se redujo a 14 trabajos.

En la segunda fase se desarrollaron tres actividades. Primero, se seleccionaron aquellos trabajos que, según el tipo, correspondían a revisiones de literatura. Aplicando el segundo criterio de inclusión, se encontraron tres trabajos que hacen una revisión de MEIS-TU: Büyüközkan y Karabulut [17], Purvis et al. [22] y Singh et al. [23]. El trabajo de [17], según nuestro conocimiento limitado, es el que presenta una revisión sistemática más completa de la literatura en el objeto de estudio. Por ello, como segunda actividad paralela, se seleccionaron de [17], aquellos trabajos citados orientados al transporte. Así, se obtuvieron seis artículos más para la muestra. Tercero, a los seis trabajos seleccionados en [17], se aplicó el mismo procedimiento de la actividad dos: se revisaron los seis documentos, y se identificaron en ellos, aquellos trabajos citados que estuvieran orientados al desarrollo MEIS-TU. En este análisis se encontró una muestra adicional de 13 trabajos, que fue incluida en la revisión, quedando así con una muestra final de 39 trabajos (ver Figura 2).

Figura 2. Síntesis de la primera etapa: planeación e identificación



Fuente: elaboración propia

Análisis estructurado

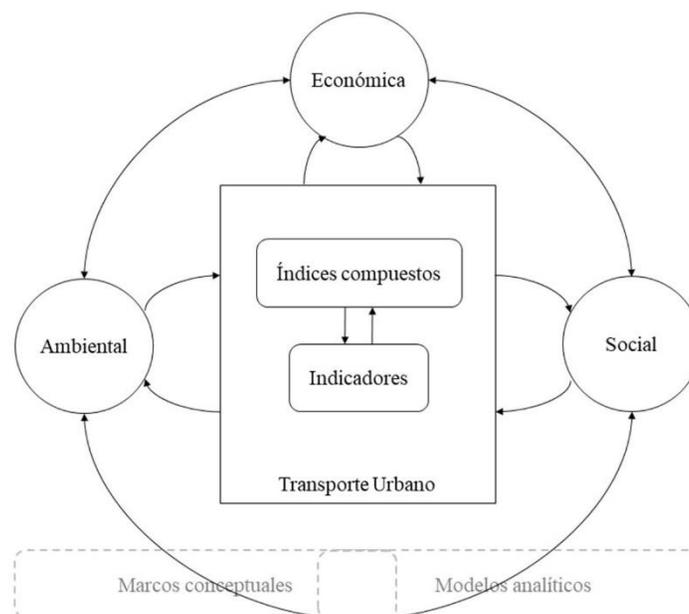
Se realizó un análisis estructurado de la muestra de trabajos obtenida en la primera etapa. Primero se hizo un análisis de los objetos de estudio y los componentes reportados en la literatura. Se identificó que los principales componentes reportados de las MEIS-TU son: marcos conceptuales, modelos analíticos, índices e indicadores [17], [23]. De este modo, se analizaron dichos componentes donde se identificaron sus características en términos de sus aproximaciones, las técnicas utilizadas, y los esquemas de indicadores propuestos.

Reporte y taxonomía

Con base en los análisis de la revisión, se construyó una taxonomía que permita responder al objeto de investigación y dar un reporte estructurado de los hallazgos en la literatura. La taxonomía está compuesta por tres ejes. En el primer eje se consideró la base conceptual propuesta en [22], donde se presentan los elementos teóricos para definir las tres dimensiones de la sostenibilidad. El segundo eje está basado en los hallazgos de [17], quienes proponen un esquema de clasificación de dos categorías para las metodologías disponibles en la literatura: (1) marcos conceptuales, y (2) modelos analíticos. El tercer eje está basado en la estructura propuesta en [23], donde se hace una diferenciación entre (1) índices compuestos y (2) indicadores de sostenibilidad.

De este modo, la taxonomía fue implementada para reportar los hallazgos en términos de (1) marcos conceptuales, (2) modelos analíticos, (3) índices e indicadores, todos en el contexto de las MEIS-TU. La Figura 3 ilustra el esquema de la taxonomía propuesta. En aras de claridad de la taxonomía, y para tener criterios objetivos de inclusión, exclusión, y clasificación de las metodologías, se utilizaron las definiciones presentadas en [17] para diferenciar los marcos conceptuales de los modelos analíticos. Como lo indican los autores, los marcos conceptuales están asociados con la necesidad de tener bases conceptuales robustas para identificar los datos necesarios para la construcción de indicadores de sostenibilidad. Por otro lado, los modelos analíticos están asociados con la evaluación que se hace de los datos obtenidos y con el uso de técnicas analíticas para el procesamiento cuantitativo y cualitativo que les dé significado a los datos.

Figura 3. Taxonomía propuesta



Fuente: elaboración propia

Resultados y discusión

Para caracterizar las MEIS-TU disponibles en la literatura, se siguió la taxonomía de reporte construida para este trabajo. De este modo, se hizo un análisis de los marcos conceptuales, los modelos analíticos y los índices e indicadores encontrados en el contexto de las dimensiones del TBL. La muestra de los 39 trabajos estudiados se describe en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la cual se identifica el tipo de publicación, el tipo de país de acuerdo con la clasificación del *World Economic Situation and Prospects* (WESP) de las Naciones Unidas [6], la contribución de cada trabajo a las cuatro dimensiones de la taxonomía propuesta, y la dimensión del TBL estudiada en cada uno.

La literatura sobre las MEIS-TU ha sido publicada no solo en revistas científicas (59% de la muestra), sino que también ha sido objeto de estudio por parte de instituciones y comisiones gubernamentales en el mundo (41%), como la *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD), la *United Nations Environment Programme* (UNEP), la Unión Europea y sus diferentes comisiones, la *European Environment Agency* (EEA), la *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), el *United States Department of Transportation* (USDOT), la *Transportation Association of Canada* (TAC), entre otras. Puede observarse también que el 64% de los trabajos son realizados en países desarrollados, mientras que sólo el 18% corresponde a países en desarrollo, y solo dos de ellos son en Latinoamérica, específicamente en Brasil.

Tabla 1. Literatura de MEIS-TU

No.	Ref	Tipo Publicación ¹	Tipo País ²	Marco Conceptual	Modelo Analítico	Índice	Indicador	Dimensión TBL ³		
								Eco	Amb	Soc
1	[31]	RevCie	DE			X	X	X	X	X
2	[32]	RevCie	DE, ED		X		X			
3	[33]	Ins	DE	X			X		X	
4	[34]	Ins	DE	X	X		X	X	X	X
5	[35]	RevCie	DE		X		X	X		
6	[36]	RevCie	ED		X		X			
7	[37]	RevCie	ED				X			
8	[38]	RevCie	ED	X			X	X	X	X
9	[39]	Ins	DE	X			X			
10	[40]	Ins	DE	X			X	X	X	X
11	[41]	Ins	DE	X			X	X	X	X
12	[42]	Ins	DE				X	X	X	X
13	[8]	RevCie	ND	X	X				X	
14	[43]	RevCie	ND	X	X				X	
15	[44]	RevCie	DE	X			X			
16	[45]	Ins	DE	X						
17	[46]	Ins	DE	X			X	X	X	X
18	[47]	RevCie	DE	X			X	X	X	X
19	[13]	RevCie	DE		X	X	X	X	X	X
20	[48]	RevCie	DE				X	X	X	X

No.	Ref	Tipo Publicación ¹	Tipo País ²	Marco Conceptual	Modelo Analítico	Índice	Indicador	Dimensión TBL ³		
								Eco	Amb	Soc
21	[14]	RevCie	ED	X		X	X	X	X	X
22	[49]	RevCie	ND				X	X	X	X
23	[50]	Ins	DE				X			
24	[51]	RevCie	DE		X	X	X	X	X	X
25	[52]	Ins	DE	X			X	X	X	X
26	[53]	Ins	DE	X				X	X	
27	[54]	Ins	ND	X			X		X	
28	[55]	RevCie	DE		X		X	X	X	X
29	[56]	RevCie	DE		X		X	X	X	X
30	[57]	RevCie	DE	X		X	X	X	X	X
31	[58]	Ins	DE	X				X	X	X
32	[59]	RevCie	DE	X			X	X	X	X
33	[60]	RevCie	ED				X	X	X	X
34	[61]	RevCie	ND	X	X					
35	[62]	RevCie	ND	X	X			X	X	
36	[63]	Ins	DE	X			X		X	
37	[64]	Ins	ND	X			X		X	
38	[65]	Ins	DE	X			X		X	
39	[66]	RevCie	ED		X	X		X	X	X
Totales	RevCie, DE	23	25							
	Ins, ED	16	7	24	13	6	31	24	30	21
	% de la muestra	59%	64%							
		41%	18%	62%	33%	15%	79%	62%	77%	54%

¹ RevCie: Revista Científica; Ins: Institucional. ND: No Disponible.

² DE: País Desarrollado; ED: País En Desarrollo, según [6].

³ Eco: Económico; Amb: Ambiental; Soc: Social.

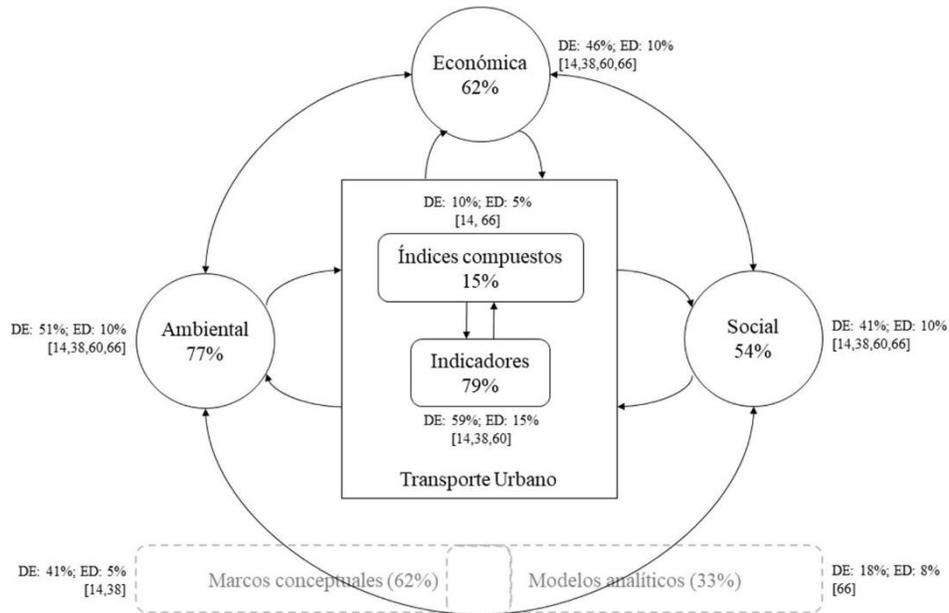
Fuente: elaboración propia

Un 62% de los trabajos presenta marcos conceptuales, y aproximadamente un tercio presenta modelos analíticos, contrario a los hallazgos reportados en [17], en donde se encontró una mayor proporción de modelos analíticos. Así mismo, solo cinco trabajos presentan un modelo analítico, basado en el desarrollo de marco conceptual simultáneo y casi el 80% de los trabajos presenta indicadores. Respecto a las dimensiones de la sostenibilidad, el 54% de los trabajos estudia de manera integral las dimensiones del TBL y se preserva la tendencia reseñada en la literatura: la mayor parte de los trabajos están orientados a estudiar la dimensión ambiental (77%), luego la económica (62%), y por último la social (54%).

La taxonomía propuesta permite caracterizar cuáles de las MEIS-TU ofrecen un enfoque integral que considere de manera simultánea las dimensiones del TBL, con énfasis en los países en desarrollo. La Figura 1 identifica, para cada dimensión de la taxonomía, la proporción de los trabajos de la muestra que considera de manera simultánea las tres dimensiones del TBL, ilustrando las proporciones de los trabajos de países desarrollados (DE) y en desarrollo (ED), y reseña, únicamente, aquellos trabajos de la literatura realizados en países en desarrollo. Como se observa, en marcos conceptuales, modelos analíticos,

índices compuestos e indicadores, la mayor parte de los trabajos se da en países DE (41%, 18%, 10%, y 59%, respectivamente), en contraste con los países ED (5%, 8%, 5%, 15%). Adicionalmente, solo cuatro trabajos presentan una MEIS-TU en países ED [14, 38, 60, 66], a diferencia de los 16 trabajos encontrados en países DE. En el resto de esta sección se hace un análisis de los resultados obtenidos, y se caracterizan los marcos conceptuales, los modelos analíticos, y los índices e indicadores.

Figura 1. Análisis de MEIS-TU con énfasis en países en desarrollo (ED)



Fuente: elaboración propia

Marcos conceptuales

Los marcos conceptuales de las MEIS-TU han tenido un desarrollo significativo en las últimas dos décadas, no solo por la definición de nuevos índices e indicadores, sino también por la adaptación que se ha hecho a las bases conceptuales de la sostenibilidad. Como se indica en [17], los marcos conceptuales definen qué refleja el desempeño de la sostenibilidad, qué indicadores utilizar y qué esperar de su medición. Dichos marcos tienen como objetivo identificar qué datos recopilar, con qué propósito, y cómo deben reportarse. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta una síntesis de los 24 modelos conceptuales de MEIS-TU identificados.

Tabla 1. Marcos Conceptuales

No.	Marco	País(es)	Ref	No.	Marco	País(es)	Ref
1	Belgium Indicators of sustainable development in transport sector	Bélgica	[34] [39]	13	Performance assessment and evaluation method for passenger transportation	Brasil	[38]
2	Carbon Emissions Pinch Analysis (CEPA)	China Corea India Irlanda Nueva Zelanda	[8] [43] [62] [61]	14	Social Sustainable Evaluation Framework	India	[14]
3	Composite transport sustainability index (ICST)	Australia	[57]	15	Sustainability indicators for urban land-use and transport (PROSPECTS)	ND	[34] [52]
4	Framework for the Evaluation of Transport Sustainability Performance	Unión Europea	[40]	16	Sustainable freight transportation (SFT)	India	[14]
5	Germany: Agenda 21 indicators for sustainable mobility in municipalities	Alemania	[34] [63]	17	Sustainable Transportation Indicators Project (STPI)	Unión Europea	[34] [44]
6	Greenhouse Emission Pinch Analysis (GEPA)	Corea	[8]	18	Transportation Association of Canada (TAC)	Canadá	[45] [47]
7	Joint Research Centre: Monitoring Progress towards Sustainable Urban Mobility	ND	[34] [58]	19	The European Transport policy Information System (ETIS)	Europa	[40]
8	Methodology for measuring the sustainability of car transport systems	Reino Unido	[59]	20	The transport and environment reporting mechanism (TERM)	Unión Europea	[34] [41]
9	New Zealand: Proposal for indicators of the environmental effects of transport	Nueva Zelanda	[33] [34]	21	TRANSPLUS: Frame of reference to monitor and evaluate land-use and transport integration	Unión Europea	[34] [46]
10	National Round Table on the Environment and the Economy (NRTEE)	Canadá	[47] [53]	22	Transport Canada (TC)	Canadá	[47]
11	OECD: Indicators for the integration of environmental concerns into transport policies	ND	[34] [54]	23	United States Department of Transportation (USDOT)	Estados Unidos	[47]
12	Ontario Round Table on Environment and Economy (ORTEE)	Canadá	[47]	24	United States Environmental Protection Agency (USEPA)	Estados Unidos	[34] [64] [65]

Fuente: elaboración propia

En la línea de las bases conceptuales de las MEIS-TU, el marco de tres etapas para identificar indicadores ambientales relacionados con el transporte propuesto por la USEPA [65] es uno de los primeros, en conjunto con los marcos de [33] y [64]. El marco conceptual de Bell [33] presenta una guía del Ministerio de Ambiente de Nueva Zelanda, que identifica indicadores ambientales para el agua y la tierra, y explica cómo dichos indicadores encajan en las líneas

del Programa EPI (*Environmental Performance Indicators*). Por su parte, el trabajo presentado en la Comisión para el Desarrollo Sostenible [64], identifica el rol del sector del transporte en la protección del medio ambiente, y, a su vez, reseña su impacto socioeconómico. Otros marcos más recientes, que presentan bases conceptuales orientadas especialmente a la dimensión ambiental, incluyen variantes del Análisis *Pinch*, el cual fue desarrollado para problemas de planificación energética de macro escala con restricción de carbono [8], [43], [61], [62].

En la evolución hacia la generación de MEIS orientadas hacia el transporte, Ricci [58] propuso un marco para evaluar el progreso hacia la sostenibilidad en la planificación y gestión de la movilidad urbana, el cual es probado con casos de estudio en cinco ciudades europeas: Barcelona, Bremen, Nottingham, Estrasburgo, y Turín. De Villers et al. [39] elaboraron y aplicaron un marco de indicadores para el desarrollo sostenible del transporte en Bélgica, mientras que Bickel et al. [34] hicieron una revisión y reseña de nueve marcos conceptuales utilizados en Alemania, Bélgica, y Nueva Zelanda. Estos autores presentan un reporte del proyecto SUMMA (*SUstainable Mobility, policy Measures and Assessment*) de la Dirección General de Energía y Transporte de la Comisión Europea, en el que se aborda una de las acciones clave del programa para el crecimiento de las condiciones económicas, ambientales y sociales para el desarrollo sostenible del transporte [46]. Este reporte se construye con las bases conceptuales de los indicadores de la OECD [54], del proyecto de indicadores de sostenibilidad para el transporte propuesto en [44], y de los indicadores de sostenibilidad para el uso del suelo urbano y el transporte [52].

En esfuerzos más recientes por identificar y caracterizar las MEIS-TU, se observa un mayor énfasis en incluir la integralidad de las dimensiones del TBL, y mayor especificidad en el tipo y naturaleza de los datos requeridos para la evaluación. Jeon y Amekudzi [47] presentan una revisión de las principales iniciativas realizadas en Norte América, Europa y Oceanía, en el direccionamiento de la sostenibilidad en sistemas de transporte. Adicional a la identificación de instituciones y programas para la sostenibilidad del transporte como USDOT, USEPA, TAC, los autores reseñan el modelo NRTEE [53] en Canadá, luego aplicado en Ontario (ORTEE), el cual fue derivado de un conjunto de estudios para la sostenibilidad, enfocados en principios de transporte y relacionados con las dimensiones del TBL. El mismo año, también en Canadá, Hollingworth et al. [45] presentaron el análisis de una encuesta dirigida a diferentes regiones del país con la que se definen indicadores clave, orientados al uso de la tierra, el costo y financiamiento del transporte y las necesidades de los usuarios. Para el caso de Alemania, la Oficina Federal del Medio Ambiente UBA [63], desarrolló la Agenda 21 de objetivos e indicadores para la movilidad sostenible de las municipalidades, y Dobranskyte-Niskota et al. [40] proponen la evaluación del desempeño de la sostenibilidad del transporte basado en los indicadores de organizaciones como la Unión Europea.

En la última década, cuatro trabajos publicados en revistas científicas presentan el desarrollo y aplicación de MEIS-TU, considerando de manera integral las dimensiones del TBL. Un trabajo es realizado en Europa, otro en Australia, dos en países en desarrollo, y de estos últimos, solo uno en Latinoamérica, en Brasil. Smith et al. [59] establecen una metodología para medir la sostenibilidad en sistemas de transporte y definen cuáles indicadores pertenecen a cada dimensión del TBL. Reisi et al. [57] desarrollan un método para obtener un índice compuesto de sostenibilidad de transporte para las áreas de Melbourne, el cual incluye nueve indicadores en las dimensiones del TBL, relevantes para el transporte urbano. El caso de Brasil es presentado por de Almeida y Leal [38] quienes proponen un método estructurado de evaluación de desempeño de los sistemas de transporte de pasajeros en el contexto de la sostenibilidad, a la luz de métricas de eco-eficiencia. Kumar y Anbanandam [14] consideran la participación holística de las dimensiones del TBL de la sostenibilidad, y desarrollan un índice de sostenibilidad social para los sistemas de transporte de carga.

Modelos analíticos

La Tabla 2 presenta una síntesis de los diez modelos analíticos identificados. Los modelos analíticos identificados evidencian la diversidad de técnicas numéricas integradas, basadas en marcos conceptuales previos o propios. La muestra estudiada proporciona una descripción general del desarrollo de técnicas analíticas y de las aplicaciones de los modelos existentes de las últimas dos décadas.

La aproximación más utilizada en los modelos analíticos es el *Multicriteria Decision Making Method* (MCDM). Awasthi et al. [29] presentaron una metodología basada en MCDM y en lógica difusa para la evaluación y selección de sistemas de transporte sostenibles bajo incertidumbre en Francia. En contraste, Bojković et al. [32] desarrollaron un modelo para una evaluación comparativa del sistema de transporte entre países de Europa central y oriental según criterios de sostenibilidad, utilizando la técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Jeon, Amekudzi y Guensler [13] utilizan MCDM con índices de sostenibilidad compuestos y una variedad de métricas de desempeño para evaluar la sostenibilidad en la planificación del transporte. En menor medida, algunos trabajos abordaron la programación lineal, simulación, *Computable General Equilibrium* (CGE), *Impact Assessment Methods*, *Composite sustainability index* (CSI), *Cost-benefit analysis* (CBA), *Cost-effectiveness analysis* (CEA), y *Delphi* difuso.

Tabla 2. Modelos Analíticos

No.	Modelo	Aproximación básica	Técnicas	País(es)	Ref
1	MCDM: Evaluation and selection of sustainable transportation systems under uncertainty	MCDM	TOPSIS difuso	Francia	[32]
2	Carbon Emissions Pinch Analysis (CEPA)	Programación Lineal	Problema de oferta-demanda Problemas de localización	China Corea India Irlanda Nueva Zelanda	[8] [43] [62] [61]
3	Framework for a cross-country comparative assessment of transport sustainability	MCDM	AHP	Países de Europa Central y Oriental	[35]
4	Integrated and dynamic LCSA framework for sustainability assessment of new generation transportation systems	Simulación	Dinámica de sistemas	Estados Unidos	[56]
5	Integrated assessment framework	CGE	Benchmark simulation Air concentration model	China	[36]
6	Macro-level sustainability assessment framework for alternative passenger vehicles	Impact assessment methods	Análisis de Entradas-Salidas	Estados Unidos	[55]
7	Public Sustainable Analysis (PTSMAT)	Transport Mobility Project CSI	Normalización y ponderación MCDM	Canadá	[51]
8	Sustainability assessment framework	MCDM	Pesos iguales	Estados Unidos	[13]
9	Sustainable Mobility, Measures and Assessment (SUMMA)	MCDA CBA CEA	LCA Análisis de escenarios Modelación de sistemas	Estados Unidos Unión Europea	[34]
10	Transportation sustainability index for a livable city	Delphi difuso index	Big Red Minería de datos Data analítica	Taiwán	[66]

Fuente: elaboración propia

Uno de los países con más investigaciones en modelos analíticos es Estados Unidos: en [31] se presenta el modelo SUMMA para Estados Unidos, en conjunto con la Unión Europea, en [13] se desarrolla el modelo *Sustainability Assessment Framework*, en [52] se presenta un marco de evaluación de la sostenibilidad a nivel macro para vehículos de pasajeros alternativos, y en [53] se propone un modelo para el análisis integrado y dinámico para la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de transporte de nueva generación en dicho país. El modelo CEPA, estudiado también como marco conceptual, es el modelo analítico con mayor número de aplicaciones, utilizado para el estudio del sistema transporte en China [8], Corea [40], India [59], Irlanda y Nueva Zelanda [58]. Chen y He [33] presentan el *Integrated assessment framework* basado en un modelo CGE para China y en [48] se aplica el *Public Transport Sustainable Mobility Analysis Project (PTSMAT)* en Canadá. Solo dos trabajos utilizan métodos que brinden una visión integral de la sostenibilidad: en [53] con dinámica de sistemas y en [32] con AHP. Algunos trabajos usan técnicas de minería de datos para predecir cambios dinámicos de índices en transporte [63], pero, en general, se observa una literatura fragmentada en el desarrollo de modelos analíticos para las MEIS-TU.

Índices e indicadores

La literatura muestra la necesidad de medir el desempeño de los sistemas que componen la sociedad en términos de las dimensiones del TBL. Como se indica en [23], los índices compuestos e indicadores de sostenibilidad se han convertido en una metodología útil a la hora de abordar esta necesidad, ya que permiten simplificar, cuantificar, analizar y comunicar la información del sistema que sea objeto de estudio. Esta sección identifica y analiza los índices compuestos e indicadores más utilizados para medir la sostenibilidad del transporte urbano. En la Tabla 4 se presentan los seis índices compuestos identificados.

Los índices compuestos resultan útiles para agrupar indicadores. Según [57], tomar decisiones con base en demasiados indicadores es inapropiado y complejo. Sin embargo, existen opiniones contrarias en cuanto al uso de índices: para algunos autores, los índices compuestos no son confiables debido a que su construcción es subjetiva, mientras que, para otros, son herramientas valiosas que transmiten información y permiten comparaciones rápidas. En la muestra de índices identificada se observa el uso de diferentes técnicas para su construcción. Al referirse exclusivamente a las técnicas de ponderación, en [57] se utiliza un método de ponderación de análisis de componentes y análisis factorial en la construcción del *Composite transport sustainability index (ICST)*. Este método se basa en la variación de los datos y no en opiniones de expertos, solucionando el problema de la subjetividad, el cual fue aplicado en Australia.

Tabla 3. Índices

No.	Índice	Número de categorías e indicadores	Escala/normalización	Ponderación	Agregación	País(es)	Modelo de referencia		Ref
							Conceptual	Analítico	
1	Composite Index of global sustainability	3 subíndices 9 indicadores	Valores estandarizados y Z-scores	Opiniones de expertos	Suma de subíndices	España Francia Holanda Reino Unido Suiza			[31]
2	Composite sustainability index (CSI)	4 categorías 15 indicadores	Función de utilidad de un solo atributo en escalas lineales normalizadas	Pesos iguales	Suma ponderada	Estados Unidos		8	[13]
3	Composite transport sustainability index (ICST)	3 subíndices 9 indicadores	División del valor de cada indicador en el tiempo, por su valor promedio	Principle component analysis/factor analysis (PCA/FA)	Sumatoria de subíndices	Australia	3		[57]
4	Freight transportation social sustainability index (FTSSI)	4 facilitadores 16 dimensiones 74 atributos	ND	Lógica difusa	Números triangulares difusos, Variables lingüísticas	India	16		[14]
5	ND	4 categorías 26 indicadores 12 factores	Función del Z-score Enfoque basado en distancia de referencia	Simulación Monte Carlo	Suma ponderada	Canadá	7		[51]
6	Transportation sustainability index for a livable city	3 categorías 18 indicadores	Tasa de cada indicador por trimestre de los años 2009 a 2016	FMD (Fuzzy Method Delphi)	Series de tiempo Modelo ARIMA	Taiwán	10		[66]

Fuente: elaboración propia

En Estados Unidos y Canadá, respectivamente, en el trabajo en [13] se asignan pesos iguales a cada indicador, lo que hace que cada dimensión tenga la misma importancia relativa en el cálculo del CSI. En [51] se utiliza un modelo estocástico de análisis que permite una asignación de pesos siguiendo un MCDM, y se construye un CSI con base en el marco del PTSMAT. En contraste, en [31], [14], y [66] se utilizan opiniones de expertos para ponderar sus índices, los cuales son desarrollados en Europa, India y Taiwán, respectivamente. La diferencia radica en que el trabajo en India [14] se centra en la dimensión social y formula el *Freight Transportation Social Sustainability Index* (FTSSI) a partir de la agregación de diferentes indicadores sociales. Por su parte, en el trabajo en Taiwán [66] se definen índices compuestos que intentan explicar integralmente la sostenibilidad del transporte según las dimensiones del TBL.

En la literatura se reportan intentos por categorizar y clasificar los indicadores de sostenibilidad del transporte urbano. Dicha iniciativa se evidencia principalmente en los marcos conceptuales propuestos por organizaciones internacionales, especialmente en el contexto de la Unión Europea y con una predominancia de clasificación estricta en las dimensiones del TBL. Por ejemplo, la Comisión Europea y la EEA propusieron el marco conceptual TERM, clasificando los indicadores como descriptivos, de rendimiento, eficiencia e indicadores de bienestar total. Por su parte, en el marco en [39], se agrupan los indicadores por temas, donde se destacan, las tendencias del transporte modal de pasajeros, la estructura de la flota vehicular, el consumo de energía por año, la eficiencia de utilización del transporte y el índice de precios. Minken et al. [52] plantean categorías como la eficiencia económica, accidentes, equidad e inclusión social en el marco de PROSPECTS. Sin embargo, a pesar de estos intentos de clasificación, la diversidad y extensión de indicadores de sostenibilidad del transporte dificultan su categorización y análisis.

Por estos motivos, con el fin de identificar y caracterizar de manera integral los indicadores de sostenibilidad del transporte encontrados en la literatura, se proponen once categorías definidas así:

1. Accesibilidad: posibilidad de acceder a un medio de transporte según necesidades de los usuarios [50].
2. Calidad: capacidad de los medios de transporte para satisfacer las necesidades de los usuarios. La satisfacción se logra al ofrecer un servicio óptimo que cumpla con los requerimientos mínimos exigidos por los usuarios [60].
3. Caracterización del transporte y la flota vehicular: la flota vehicular es conformada por un conjunto de vehículos utilizados para el transporte de usuarios; la caracterización determina las dinámicas de movilidad y características generales de la flota vehicular [34].
4. Caracterización socioeconómica: determina atributos socioeconómicos de los usuarios asociados a los sistemas de transporte. Dichos atributos se relacionan con el ingreso disponible del hogar, cuyo producto es la renta disponible destinada al consumo de productos básicos y a la manutención de medios de transporte propios o uso de transporte público [36].
5. Emisiones: liberación de contaminantes atmosféricos, proveniente de fuentes fijas como industria y generación de electricidad, o fuentes móviles como vehículos de transporte y carga [8].
6. Enfermedades, accidentes y muertes: principales efectos adversos para la salud ocasionadas por el transporte y por las emisiones. La exposición a largo plazo a contaminantes atmosféricos puede ocasionar enfermedades cardiovasculares, enfermedades respiratorias, la reducción de la esperanza de vida y el aumento de cáncer de pulmón [40].

7. Impacto al medio ambiente: una visión general de los efectos negativos medioambientales (el aire, el clima y los hábitats naturales) causados por los modos de transporte en forma de emisiones atmosféricas y contaminación acústica [47].
8. Regulación, gobierno y política pública: políticas de intervención para el control del uso y crecimiento de medios de transporte: regulación que se hace tanto a vehículos y sus niveles de emisión, intentando mantener dichos niveles por debajo de una media [59].
9. Uso del suelo e infraestructura de transporte: cantidad de tierra utilizada para desarrollar infraestructura pública y espacio necesario para la movilidad. Su propósito es reducir las distancias, los tiempos de viaje, los gastos de transporte y mejorar la eficiencia del transporte [66].
10. Uso y consumo de energía: recursos energéticos necesarios para el funcionamiento del transporte. Es la cantidad de energía utilizada, asociada al consumo de combustible de los vehículos y demás medios de transporte [34].
11. Valores financieros: componentes financieros asociados a los usuarios y medios de transporte [51].

Se encontraron 314 indicadores en la literatura seleccionada, los cuales fueron depurados para incluir únicamente aquellos que fueran utilizados en al menos un marco conceptual o un modelo analítico, y que fueran citados en la literatura al menos por dos autores; el resultado final fueron 244 indicadores. Con dicha muestra se hizo un análisis de Pareto utilizando como criterio el número de trabajos que han citado y utilizado cada indicador. Para ello se construyó una clasificación ABC siguiendo los lineamientos de [67]. La

Tabla 4 presenta los resultados del análisis, clasificando la muestra de indicadores en las once categorías propuestas. De la muestra obtenida (244), 91 indicadores corresponden al 65% de las citaciones en la literatura, 86 indicadores corresponden al 25% de las citaciones, y los restantes 67 corresponden al 10%, siendo éstas respectivamente las categorías, A, B, y C de la clasificación de Pareto. En la categoría A, los indicadores de emisiones de transporte de contaminantes atmosféricos son los más frecuentes en la literatura, utilizados en diez marcos conceptuales, siete modelos analíticos, y citados por 23 autores.

Tabla 4. Clasificación y análisis de indicadores

Categoría de Indicadores	Indicadores			Citaciones		A		B		C	
	Conteo	Cumple	%	Conteo	%	91	37%	86	35%	67	27%
Accesibilidad	9	8	89%	27	4%	6	7%	1	1%	1	1%
Calidad	17	13	76%	36	5%	7	8%	4	5%	2	3%
Caracterización del transporte y la flota vehicular	86	70	81%	178	26%	24	26%	35	41%	11	16%
Caracterización socioeconómica	40	32	80%	64	9%	7	8%	10	12%	15	22%
Emisiones	16	10	63%	63	9%	5	5%	1	1%	4	6%
Enfermedades, accidentes y muertes	10	10	100%	39	6%	4	4%	3	3%	3	4%
Impactos al medio ambiente	26	15	58%	46	7%	7	8%	1	1%	7	10%
Regulación, gobierno, y política pública	21	13	62%	35	5%	5	5%	5	6%	3	4%
Uso del suelo e infraestructura de transporte	29	24	83%	57	8%	7	8%	11	13%	6	9%
Uso y consumo de energía	15	11	73%	46	7%	5	5%	6	7%	0	0%
Valores financieros	45	38	84%	91	13%	14	15%	9	10%	15	22%
Totales	314	244	78%	682							

Fuente: elaboración propia

La evaluación integral de la sostenibilidad del transporte a partir de índices e indicadores presenta un obstáculo importante. Como se indica en la literatura [17], el alto nivel de subjetividad, tanto en la selección de indicadores para la construcción de índices como en su evaluación, genera complejidad debido al carácter cualitativo de varios criterios, en particular en lo que respecta a los aspectos sociales e institucionales, lo que hace que la evaluación sea una práctica subjetiva. Adicionalmente, los vínculos causales complejos y la dificultad para distinguir integralmente los impactos de la sostenibilidad crean el uso de una terminología diversa de indicadores, lo que genera definiciones similares con denominaciones diferentes. Por ejemplo, en la muestra de indicadores identificada se encuentran casos como energía utilizada en el transporte y uso de energía de combustibles fósiles para el transporte, dos indicadores que tienen la misma connotación, sin embargo, cada autor propone una denominación distinta para ellos. Esto hace que muchos indicadores se superpongan temáticamente o sean casi idénticos, lo que genera también un volumen disperso de conceptos e incertidumbre relacionada con los datos utilizados. La caracterización de la literatura evidencia la necesidad de crear una unificación de criterios tanto en la

denominación y definición de indicadores como en su selección, garantizando una evaluación objetiva a partir de índices e indicadores integrales de sostenibilidad.

Para enfrentar el obstáculo de variabilidad de terminologías en el uso de indicadores, fue necesaria la creación de categorías, las cuales permitieron evidenciar la carencia de una terminología común, y solucionar el sesgo conceptual a través de la agrupación. El proceso de validación consistió en revisar la definición dada por cada autor y compararla con la dada por otros autores para indicadores con denominaciones similares, para así realizar los procesos de agrupación. Un ejemplo de esto fue el indicador de emisiones de transporte de contaminantes atmosféricos, resultado de la agrupación de indicadores propuestos por 23 autores diferentes, los cuales proponían un nombre distinto para este indicador. La categorización es una tarea necesaria no solo para crear terminologías comunes sino para facilitar el análisis de conjuntos de indicadores en un contexto dado.

Conclusiones

Se ha presentado una caracterización de las metodologías para la evaluación integral de la sostenibilidad del transporte urbano (MEIS-TU), desarrollada mediante una revisión estructurada de literatura y el análisis con una taxonomía propuesta que, basada en tres trabajos previos, incluye el estudio de marcos conceptuales, modelos analíticos, índices e indicadores. La caracterización evidenció el incremento en la literatura científica e institucional dedicada a las MEIS-TU en las últimas dos décadas. Sin embargo, se evidenció también que, a pesar del incremento, aún está latente la necesidad de desarrollar metodologías más integradas que incluyan de manera simultánea las dimensiones del TBL, y las relaciones entre sus componentes. De igual forma, se encontró que la mayoría de los trabajos son realizados en países desarrollados, mientras que solo el 18% corresponde a países en desarrollo, y sólo dos de ellos son en Latinoamérica.

Los marcos identificados evidencian una amplia diversidad en las bases conceptuales utilizadas para la evaluación de la sostenibilidad, lo que hace además complejo definir una única estrategia para las MEIS-TU [68]. Al igual que en hallazgos previos de la literatura, la dimensión social de la sostenibilidad es la menos estudiada (42%), y se observa una necesidad de incluir explícitamente las relaciones causales entre las tres dimensiones del TBL. Es evidente también como las bases conceptuales están definidas en una mayor proporción por trabajos institucionales (58%), y solo un 17% de la muestra seleccionada presenta la aplicación de MEIS-TU. La adaptación de los marcos conceptuales a las dinámicas de países en desarrollo constituye una oportunidad de trabajo. Solo dos trabajos de la muestra son realizados en estos países lo que deja ver la brecha de investigación en el tema.

La caracterización de modelos analíticos mostró también una diversidad de técnicas numéricas integradas, en las que predominan métodos como el MCDM, el AHP y la lógica difusa. Sólo dos trabajos utilizan métodos que brinden una visión integral de la sostenibilidad con dinámica de sistemas y con AHP. Se encontró también que la mayoría de los trabajos en la literatura se centran en casos de Estados Unidos y China. Al igual que los hallazgos en [16], los trabajos disponibles se centran especialmente en casos europeos. No se encontró ninguna MEIS-TU que basada en modelos analíticos estuviese orientada al estudio en países en desarrollo ni en Latinoamérica, lo que nuevamente confirma una oportunidad de investigación.

El análisis de índices e indicadores evidenció opiniones contrarias en cuanto al uso de índices compuestos, debido a la subjetividad que implica el uso de métodos de ponderación dependientes de las opiniones de expertos [57]. Por otra parte, no se encontraron aplicaciones de índices para medir la sostenibilidad del transporte en países en desarrollo en la muestra seleccionada. Además, a pesar de los intentos realizados por algunas instituciones internacionales, especialmente por la Unión Europea, por agrupar y categorizar los indicadores de sostenibilidad, no se encuentra una homogeneidad en la categorización ni terminología que garantice una evaluación integral de la sostenibilidad en el transporte, dificultando el análisis de los indicadores existentes. De este modo, este trabajo hace una propuesta de categorización de indicadores en las MEIS-TU en países en desarrollo y reconoce como una oportunidad de investigación la aplicación de dichas categorías a casos en países en desarrollo que permitan su delimitación.

Las MEIS-TU aplicables a países en desarrollo incluyen: el *Transportation Sustainability Index for a Livable City* y el respectivo modelo analítico aplicado en Taiwán [63]; el marco conceptual *Performance Assessment and Evaluation Method for Passenger Transportation* aplicado en Brasil [35] y el *Social Sustainable Evaluation Framework* en India [14]. Además, se encuentra también el uso de algunos indicadores en Brasil [57], en donde las MEIS-TU se centran en la dimensión social principalmente. Los países en desarrollo constituyen una oportunidad de trabajo e investigación de las MEIS-TU, debido principalmente a las problemáticas socioeconómicas que tienen un mayor protagonismo, así como los altos índices de pobreza, e insatisfacción de necesidades básicas y la rápida urbanización.

References

- [1] E. B. Barbier, "The concept of sustainable economic development," *Environ. Conserv.*, vol. 14, no. 2, pp. 101-110, 1987, <https://doi.org/10.1017/S0376892900011449>
- [2] J. Elkington, "Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 36, no. 2, pp. 90-100, 1994, <https://doi.org/10.2307/41165746>
- [3] L. M. Cárdenas and E. V. Gutiérrez, "Metodología integral para la evaluación de la sostenibilidad del

- transporte urbano y su impacto en la salud en países en desarrollo. Proyecto de Investigación. Universidad de Antioquia,” Medellín, Colombia, 2019.
- [4] P. B. Cobbinah, M. O. Erdiaw-Kwasie and P. Amoateng, “Rethinking sustainable development within the framework of poverty and urbanisation in developing countries,” *Environ. Dev.*, vol. 13, pp. 18-32, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.11.001>
- [5] A. Kemmler and D. Spreng, “Energy indicators for tracking sustainability in developing countries,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2466-2480, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.09.006>
- [6] United Nations (UN), “World Economic Situation and Prospects,” New York, NY, 2020, https://www.un.org/development/desa/dpad/wp-content/uploads/sites/45/WESP2020_FullReport.pdf
- [7] United Nations (UN), *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*. 2014.
- [8] Y. Van Fan, S. Perry, J. J. Klemeš and C. T. Lee, “A review on air emissions assessment: Transportation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 194, pp. 673-684, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.151>
- [9] S. Sala, B. Ciuffo and P. Nijkamp, “A systemic framework for sustainability assessment,” *Ecol. Econ.*, vol. 119, pp. 314-325, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.015>
- [10] P. Pascal, “The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 42, no. 6, pp. 901-909, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.01.013>
- [11] S. Hankey and J. D. Marshall, “Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 9, pp. 4880-4887, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.005>
- [12] J. Khan, M. Ketzler, K. Kakosimos, M. Sørensen and S. S. Jensen, “Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques,” *Sci. Total Environ.*, vol. 634, pp. 661-676, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.374>
- [13] C. M. Jeon, A. A. Amekudzi and R. L. Guensler, “Sustainability assessment at the transportation planning level: Performance measures and indexes,” *Transp. Policy*, vol. 25, pp. 10-21, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.10.004>
- [14] A. Kumar and R. Anbanandam, “Development of social sustainability index for freight transportation system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 210, pp. 77-92, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.353>
- [15] B. Ness, E. Urbel-Piirsalu, S. Anderberg and L. Olsson, “Categorising tools for sustainability assessment,” *Ecol. Econ.*, vol. 60, no. 3, pp. 498-508, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>
- [16] L. E. Karjalainen and S. Juhola, “Urban transportation sustainability assessments: a systematic review of literature,” *Transp. Rev.*, vol. 41, no. 5, pp. 1-26, 2021, <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1879309>
- [17] G. Büyüközkan and Y. Karabulut, “Sustainability performance evaluation: Literature review and future directions,” *J. Environ. Manage.*, vol. 217, pp. 253-267, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.064>
- [18] D. Gillis, I. Semajski, D. Lauwers and L. Chelleri, “How to Monitor Sustainable Mobility in Cities? Literature Review in the Frame of Creating a Set of Sustainable Mobility Indicators,” *Sustainability*, vol. 8, no. 29, pp. 1-30, 2016, <https://doi.org/10.3390/su8010029>
- [19] P. A. Nadi and A. Murad, “Review of methods and indicators in sustainable urban transport studies overview from 2000 to 2016,” *Commun. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 70-78, 2017, <https://doi.org/10.21924/cst.2.2.2017.58>
- [20] A. Sdoukopoulos, M. Pitsiava-Latinopoulou, S. Basbas and P. Papaioannou, “Measuring progress towards transport sustainability through indicators: Analysis and metrics of the main indicator initiatives,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 67, 2018, pp. 316-333, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.020>
- [21] E. Lopez-Arboleda, A. T. Sarmiento and L. M. Cardenas, “Systematic Review of Integrated Sustainable

- Transportation Models for Electric Passenger Vehicle Diffusion,” *Sustainability*, vol. 11, no. 9, pp. 1-19, 2019, <https://doi.org/10.3390/su11092513>
- [22] B. Purvis, Y. Mao and D. Robinson, “Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins,” *Sustainability Science*, p. 681-695, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- [23] R. K. Singh, H. R. Murty, S. K. Gupta and A. K. Dikshit, “An overview of sustainability assessment methodologies,” *Ecol. Indic.*, vol. 15, no. 1, pp. 281-299, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- [24] R. B. Briner and D. Denyer, “Systematic Review and Evidence Synthesis as a Practice and Scholarship Tool,” In D. M. Rousseau (ed.), *The Oxford Handbook of Evidence-Based Management*, 2012, pp. 112-129, <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199763986.013.0007>
- [25] D. Tranfield, D. Denyer and P. Smart, “Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review,” *J. Int. Manag.*, vol. 14, no. 3, pp. 207-222, 2003. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- [26] M. Petticrew and H. Roberts, *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*, Wiley Online Library, 2008,
- [27] V. Duque-Urbe, W. Sarache and E. V. Gutiérrez, “Sustainable Supply Chain Management Practices and Sustainable Performance in Hospitals: A Systematic Review and Integrative Framework,” *Sustainability*, vol. 11, no. 21, pp. 1-30, 2019, <https://doi.org/10.3390/su11215949>
- [28] B. Ness, E. Urbel-Piirsalu, S. Anderberg and L. Olsson, “Categorising tools for sustainability assessment,” *Ecol. Econ.*, vol. 60, no. 3, pp. 498-508, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>
- [29] A. Bond, A. Morrison-Saunders and J. Pope, “Sustainability assessment: The state of the art,” *Impact Assess. Proj. Apprais.*, vol. 30, no. 1, pp. 53–62, 2012, <https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661974>
- [30] C. L. Martins and M. V. Pato, “Supply chain sustainability: A tertiary literature review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 225, pp. 995-1016, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.250>
- [31] A. Alonso, A. Monzón and R. Cascajo, “Comparative analysis of passenger transport sustainability in European cities,” *Ecol. Indic.*, vol. 48, pp. 578-592, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.022>
- [32] A. Awasthi, S. S. Chauhan and H. Omrani, “Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 10, pp. 12270-12280, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.005>
- [33] K. Bell, “Environmental performance indicators Confirmed indicators,” New Zeland, 1998, <https://environment.govt.nz/publications/environmental-performance-indicators-confirmed-indicators-for-air-fresh-water-and-land/>
- [34] P. Bickel *et al.*, “Sustainable Mobility, policy Measures and Assessment: Setting the Context for Defining Sustainable Transport and Mobility,” 2003.
- [35] N. Bojković, D. Macura, S. Pejčić-Tarle and N. Bojović, “A comparative assessment of transport-sustainability in central and Eastern European countries with a brief reference to the republic of Serbia,” *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 5, no. 6, pp. 319–344, 2011, <https://doi.org/10.1080/15568318.2010.539664>
- [36] S. M. Chen and L. Y. He, “Welfare loss of China’s air pollution: How to make personal vehicle transportation policy,” *China Econ. Rev.*, vol. 31, pp. 106–118, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2014.08.009>
- [37] R. Chen *et al.*, “Ambient air pollution and hospital admission in Shanghai, China,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 181, no. 1–3, pp. 234–240, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.002>[38] V. de Almeida Guimarães and I. C. Leal Junior, “Performance assessment and evaluation method for passenger transportation: a step toward sustainability,” *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 297–307, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.071>
- [39] J. De Villers, J.-M. Reniers and W. Hecq, “Elaboration et application d’un set d’indicateurs de

- développement durable des transports en Belgique Seconde partie (2): données contextuelles,” 2001, http://www.belspo.be/belspo/organisation/publ/pub_ostc/HL/rHL17A1_fr.pdf
- [40] A. Dobranskyte-Niskota, A. Perujo and M. Pregl, *Indicators to assess sustainability of transport activities*. 2007, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC41602>
- [41] EEA, “Environmental signals 2002. Benchmarking the millennium,” Copenhagen, 2002.
- [42] U. Brodmann and W. Spillmann, “Verkehr - Umwelt - Nachhaltigkeit: Standortbestimmung und Perspektiven.,” 2000, https://www.snf.ch/media/de/XGbYEAGqMRViE0Eh/nfp41_synthese3.pdf
- [43] D. C. Y. Foo and R. R. Tan, “A review on process integration techniques for carbon emissions and environmental footprint problems,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 103, Part B, pp. 291–307, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.11.007>
- [44] R. Gilbert, N. Irwin, B. Hollingworth and P. Blais, “Sustainable Transportation Performance Indicators (STPI),” Toronto, Canada, 2002, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.661.7698&rep=rep1&type=pdf>
- [45] B. Hollingworth, N. Irwin, A. Mishra and R. Gilbert, “Urban Transportation Indicators - Third Survey,” Canada, 2005, <https://trid.trb.org/view/804166>
- [46] I. di S. per l’Integrazione dei S. ISIS, “Achieving Sustainable Transport and Land Use With Integrated Policies. Final Report of the European project TRANSPLUS - Transport Planning, Land Use and Sustainability,” 2003, <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UT05/UT05035FU.pdf>
- [47] C. M. Jeon and A. Amekudzi, “Addressing Sustainability in Transportation Systems: Definitions, Indicators, and Metrics,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 31-50, 2005, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(31\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(31))
- [48] C. A. Kennedy, “A comparison of the sustainability of public and private transportation systems: Study of the Greater Toronto Area,” *Transportation (Amst.)*, vol. 29, no. 4, pp. 459-493, 2002.
- [49] T. Litman, “Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning,” *Transp. Res. Rec.*, no. 2017, no. 1, pp. 10–15, 2007, <https://doi.org/10.3141/2017-02>
- [50] T. Litman, “A Good Example of Bad Transportation Performance Evaluation,” *Victoria Transp. Policy Inst. (www.vtpi.org/perind.pdf)*, vol. 1, no. October 2008, p. 15, 2009.
- [51] P. Miller, A. G. de Barros, L. Kattan and S. C. Wirasinghe, “Analyzing the sustainability performance of public transit,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 44, pp. 177-198, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.012>
- [52] H. Mincken *et al.*, *Developing Sustainable Land Use and Transport Strategies A Methodological Guidebook*. 2003, <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=1371>
- [53] NRTEE, “National Round Table on The Environment and the Economy. Performance Report,” Canada, 2004, <https://publications.gc.ca/site/eng/414975/publication.html>
- [54] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), “Indicators for the integration of environmental concerns into transport policies,” 1999.
- [55] N. Onat, M. Kucukvar and O. Tatari, Towards Life Cycle Sustainability Assessment of Alternative Passenger Vehicles, Sustainability, vol. 6, no. 12, pp. 9305-9342 2014, <https://doi.org/10.3390/su6129305>
- [56] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari and G. Egilmez, “Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 7, pp. 1009–1034, 2016, <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1070-4>
- [57] M. Reisi, L. Aye, A. Rajabifard and T. Ngo, “Transport sustainability index: Melbourne case study,” *Ecol. Indic.*, vol. 43, pp. 288-296, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.004>
- [58] L. L. Ricci, “Monitoring Progress towards Sustainable Urban Mobility: Evaluation of Five Car Free Cities Experiences,” Luxembourg, 2000.
- [59] T. W. Smith, C. J. Axon and R. C. Darton, “A methodology for measuring the sustainability of car transport systems,” *Transp. Policy*, vol. 30, pp. 308-317, 2013,

<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.09.019>

- [60] A. S. Santos and S. K. Ribeiro, “The use of sustainability indicators in urban passenger transport during the decision-making process: The case of Rio de Janeiro, Brazil,” *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 5, no. 2, pp. 251-260, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.04.010>
- [61] R. R. Tan and D. C. Y. Foo, “Pinch analysis approach to carbon-constrained energy sector planning,” *Energy*, vol. 32, no. 8, pp. 1422-1429, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.018>
- [62] R. R. Tan, K. B. Aviso and D. C. Y. Foo, “Carbon emissions pinch analysis of economic systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 863-871, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.082>,
- [63] UBA, “Qualitätsziele und Indikatoren für eine nachhaltige Mobilität Anwenderleitfaden,” Dessau, 2005.
- [64] UNEP, “The role of the transport sector in environmental protection,” 2001, https://www.un.org/esa/sustdev/csd/csd9_bp15.pdf
- [65] USEPA, “Indicators of the Environmental Impact of Transportation.,” United States, 1999.
- [66] W. M. Wey and J. Y. Huang, “Urban sustainable transportation planning strategies for livable City’s quality of life,” *Habitat Int.*, vol. 82, pp. 9–27, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2018.10.002>
- [67] T. Wild, *Best practice in inventory management*, 3rd Ed., New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2017.
- [68] J. Wilson, P. Tyedmers and R. Pelot, “Contrasting and comparing sustainable development indicator metrics,” *Ecol. Indic.*, vol. 7, no. 2, pp. 299-314, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.02.009>