Ingeniería

INGENIERÍA DE TRANSPORTE

FUNDAMENTOS PARA SISTEMAS SOSTENIBLES Y MULTIMODALES



Alvaro
Rodriguez-Valencia

Ediciones de la U

Ingeniería

INGENIERÍA DE TRANSPORTE

Fundamentos para sistemas sostenibles y multimodales

Alvaro Rodriguez-Valencia

Ediciones de la U

Rodriguez-Valencia, Alvaro
Ingeniería de Transporte - Fundamentos para sistemas sostenibles y multimodales / Alvaro Rodriguez-Valencia. Bogotá: Ediciones de la U, 2026
410 p. ; 24 cm.
ISBN 978-958-792-974-4 e-Book 978-628-7912-86-1 ePUB 978-958-792-975-1

1. Ingeniería de transporte 2. Movilidad sostenible 3. Transporte público 4. Ecomovilidad 5. Planificación urbana I. Tít.
388 cd. THEMA: TRT

Área: Ingeniería de transporte
Primera edición: Bogotá, Colombia, enero de 2026
ISBN. 978-958-792-974-4

© Alvaro Rodriguez-Valencia
© Ediciones de la U - Carrera 27 # 27-43 - Tel. (+57) 601 6455049
www.edicionesdelau.com - E-mail: editor@edicionesdelau.com
Bogotá, Colombia
Coordinación editorial: Daniela Parra G.

Ediciones de la U es una empresa editorial que, con una visión moderna y estratégica de las tecnologías, desarrolla, promueve, distribuye y comercializa contenidos, herramientas de formación, libros técnicos y profesionales, e-books, e-learning o aprendizaje en línea, realizados por autores con amplia experiencia en las diferentes áreas profesionales e investigativas, para brindar a nuestros usuarios soluciones útiles y prácticas que contribuyan al dominio de sus campos de trabajo y a su mejor desempeño en un mundo global, cambiante y cada vez más competitivo.

Diagramación: Oscar Javier Avendaño
Carátula: Ediciones de la U
Impresión: DGP Editores SAS
Calle 63 No. 70 D - 34, Pbx. (571) 7217756

Impreso y hecho en Colombia
Printed and made in Colombia

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro y otros medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

Agradecimientos

En una actividad tan ambiciosa como la escritura de un libro, el autor ha recibido el apoyo invaluable de muchas instituciones e individuos. Este libro es posible gracias al respaldo integral de la Universidad de los Andes, Colombia, que me brindó el tiempo, los recursos y el espacio necesarios para transformar notas de clase en este proyecto de gran envergadura. Agradezco especialmente a los profesores Rubby Casallas, Nicolás Estrada y Juan Pablo Bocarejo, quienes desde sus cargos directivos apoyaron decididamente esta iniciativa.

En los aspectos relativos a la publicación y la selección de editorial, conté con la valiosa asesoría de Juan de Dios Ortúzar de la Pontificia Universidad Católica de Chile, así como de mis colegas Mario Diazgranados, Nicolás Estrada y Juan Saldarriaga. Agradezco especialmente a Juan de Dios Ortúzar por animarme a emprender este proyecto.

El período sabático me brindó el tiempo y el espacio necesarios para dar el impulso más decisivo a esta obra. Agradezco especialmente a mi amigo Giovanni Circella, quien me acogió durante mi semestre sabático en 2023, por su apoyo y por ayudarme a comprender que desde el Sur Global también es posible producir documentos de referencia basados en una perspectiva crítica y no colonialista.

A Germán Lleras, Ricardo Morales, Darío Hidalgo y Juan Pablo Bocarejo les agradezco por servir como interlocutores críticos, facilitando la clarificación y profundización de las ideas presentadas en este trabajo.

Este emprendimiento contó con la colaboración de varios colegas, amigos, asistentes y estudiantes que merecen reconocimiento especial: a Sebastián Peña, Daniel González, Julián Camargo, Valeria Rodríguez, Ana Carolina Domínguez, Manuel Tello y Orlando Clavijo. Ofrezco mis más sinceras disculpas a quienes, habiendo contribuido directa o indirectamente, no aparecen mencionados en estas líneas.

Finalmente, agradezco a Adriana Gutiérrez, editora de este proyecto, por su paciencia y dedicación en materializar este libro.

ARV

Tabla de contenido

Capítulo 0. Introducción 23

Capítulo 1. El transporte: disciplina en evolución 27

1.1. Movilidad y accesibilidad 27
1.2. La demanda de transporte 29
1.3. Proceso de viajar 31
1.3.1. Para qué viajar 33
1.3.2. Viajar o no viajar 35
1.3.3. A dónde viajar 36
1.3.4. En qué viajar 37
1.3.5. Por dónde viajar 38
1.4. Los costos del transporte 38
1.5. Retos, paradigmas y futuro del transporte 41
1.5.1. La situación actual del calentamiento global 41
1.5.2. Los sistemas de transporte en la actualidad 42
1.6. Las problemáticas del transporte 42
1.7. Transporte sostenible 43
1.7.1. Cómo afrontar el reto del transporte sostenible 45
1.7.2. El nuevo paradigma de planificación del transporte urbano sostenible 46
1.7.3. El futuro de la movilidad 48
Videos recomendados 49
Lecturas recomendadas: 49
1.8. Referencias bibliográficas 49

Capítulo 2. El sistema de transporte 53

2.1. Elementos del sistema de transporte 53
2.2. Características de los sistemas de transporte 54
2.3. Características entre sistemas de transporte público y de transporte privado 57
2.4. Capacidad, flujo y demanda 59
2.5. Características de la demanda de transporte 63
2.6. Características de la oferta de transporte 67

2.7. El rol del ingeniero en sistemas sociotécnicos 69
2.8. Referencias bibliográficas..... 70

Capítulo 3. Funcionamiento de los sistemas de transporte..... 71

3.1. Dos tipos de sistemas 71
3.2. Funcionamiento de una vía..... 72
3.2.1. Análisis espacial y temporal de una corriente de tráfico..... 72
3.2.2. Modelo general de tráfico y la capacidad de los elementos tipo vía 77
3.2.3. Modelo de Greenshields 81
3.3. Funcionamiento de servidor..... 83
3.4. Funcionamiento de sistemas tipo transporte privado 87
3.5. Funcionamiento de sistema tipo transporte público..... 89
3.5.1. Sub-componentes del sistema PuT..... 91
3.5.2. Funcionamiento del sub-componente A: movimiento de vehículos..... 92
3.5.3. Funcionamiento del sub-componente B: de acceso de vehículos al terminal..... 93
3.5.4. Funcionamiento sub-componente C: puntos de control y acceso al sistema 96
3.5.5. Funcionamiento del sub-componente D: acceso a los vehículos.. 97
3.6. Capacidad de los sistemas tipo transporte público..... 98
3.7. Revisión aplicada de los sub-componentes..... 100
3.8. Referencias bibliográficas..... 100

Capítulo 4. Principios de diseño y evaluación de sistemas de transporte 101

4.1. Criterios y objetivos diseño de sistemas de transporte..... 101
4.2. Qué se diseña en transporte (tres entregables de transporte)..... 104
4.3. El proceso de diseño 106
4.4. Diseño y evaluación de entregables de infraestructura 107
4.4.1. Funcionamiento de entregables de infraestructura 107
4.4.2. Principios de diseño de entregables de infraestructura..... 110
4.5. Metodologías para evaluación de entregables de infraestructura 112
4.5.1. Evaluación por capacidad y desempeño: nivel de servicio tradicional..... 112
4.5.2. Evaluación multi-variable para aceras y ciclorrutas 114
4.5.3. Evaluación por auditorías 115
4.6. Diseño y evaluación de entregables de servicio..... 116

4.6.1. El objetivo y funcionamiento de entregables de servicio....116
4.6.2. Metodologías para evaluación de entregables de servicio....119
4.7. Diseño de entregables de experiencia....122
4.8. Criterios de diseño y evaluación de los diferentes entregables....123
4.9. Referencias bibliográficas....124

Capítulo 5. Espacio público urbano: funciones, usos, capacidades y eficiencia....127

5.1. El derecho de vía....127
5.1.1. Integración y segregación....133
5.2. Diseño de vías locales....136
5.2.1. Diseño de espacios calmados....137
5.2.2. Diseño de espacios integrados....138
5.3. Diseño de vías urbanas principales....139
5.4. La capacidad de los sistemas....140
5.5. Eficiencia en el uso del espacio....143
5.6. Retos....145
5.7. Referencias bibliográficas....146

Capítulo 6. Modos de transporte....147

6.1. ¿Por qué estudiar los diferentes modos de transporte desde lo básico?147
6.2. Modos, medios y sistemas de transporte....149
6.3. Infraestructura....150
6.4. Sistemas de control....151
6.5. Los vehículos....152
6.5.1. Carga, propulsión y movimiento....152
6.5.2. Autonomía (de conducción)....155
6.6. Energía y combustibles....157
6.7. Análisis de los modos dentro de la planificación de transporte....160
6.8. Vocaciones empíricas de los diferentes modos....160
6.9. Referencias bibliográficas....162

Capítulo 7. Modo aéreo....165

7.1. Generalidades de la aviación....165
7.2. Principios físicos del vuelo....165
7.3. Aeródromos....167
7.4. Infraestructura....169
7.5. Operación y manejo....174

7.5.1. Planificación aeroportuaria. 176
7.5.1.1. Complejidad y la planificación de aeropuertos. 176
7.5.1.2. Planificación del lado aire 177
7.5.1.3. Planificación del lado tierra 180
7.5.1.4. Estructuración de proyectos aeroportuarios 180
7.6. Referencias bibliográficas 182

Capítulo 8. Modo ferroviario. 183

8.1. Principios y funcionamiento 183
8.2. Aspectos técnicos 184
8.2.1. Funcionamiento mecánico 184
8.2.2. Distancia de frenado 186
8.2.3. Control y señalización 187
8.3. El material rodante 191
8.4. Infraestructura 193
8.4.1. Alimentación eléctrica 196
8.5. Operación 197
8.6. Variables de diseño y planificación de ferrocarriles 198
8.7. Referencias bibliográficas 201

Capítulo 9. Modo marítimo 203

9.1. Principios y funcionamiento 203
9.2. Elementos y subcomponentes del modo marítimo 205
9.3. Demanda 208
9.4. Barcos y embarcaciones 209
9.5. Energía e impacto ambiental 212
9.6. Elementos de diseño y planificación de puertos 214
9.7. Navegación y operación 216
9.8. Los puertos y la competitividad 217
9.9. Innovación y futuro en el transporte marítimo 217
9.10. Referencias bibliográficas 219

Capítulo 10. Modos activos: el peatón y la bicicleta 221

10.1. Principios y funcionamiento de los modos activos 221
10.1.1. Características de modos activos 221
10.1.2. Características de los peatones 223
10.1.3. Características de la bicicleta 224

10.2. La oferta para modos no motorizados....226
10.2.1. Las problemáticas de la oferta para no motorizados....226
10.2.2. Tipos de oferta....228
10.3. ¿Qué hace que las personas quieran escoger caminata o bicicleta?....229
10.3.1. Más allá de tiempos y costos....229
10.4. Cambio paradigma de diseño para no motorizados....234
10.4.1. Anterior paradigma....234
10.4.2. El nuevo paradigma de diseño de no motorizados....236
10.5. Criterios de diseño de infraestructura de no motorizados....239
10.5.1. Características deseables de los espacios peatonales satisfactorios....240
10.5.2. Criterios de diseño para infraestructura ciclistas....242
10.6. Evaluación de infraestructura de modos no-motorizados....244
10.6.1. Nivel de servicio para peatones y ciclistas....245
10.6.2. Limitaciones del método....250
10.7. Estrategias para diseño....251
10.8. Claves en el futuro....254
10.9. Referencias bibliográficas....254

Capítulo 11. Planificación y diseño de transporte público urbano....259

11.1. El transporte público (TP) en la movilidad urbana....259
11.2. Entender cómo funcionan los sistemas de TP....260
11.2.1. Los actores....260
11.2.2. Los incentivos....261
11.3. Elementos clave para la planificación y diseño....265
11.4. Principios de planificación y deseño....272
11.4.1. Definiciones básicas para el diseño y operación de transporte público....272
11.5. Diseño operacional de una ruta....276
11.6. Flujograma de cálculos de diseño operacional....278
11.7. Evaluación de sistemas de TP....285
11.8. Referencias....289

Capítulo 12. Teorías y modelos que explican el funcionamiento de transporte....291

12.1. Los modelos en transporte....291
12.2. Las fuerzas detrás de los modelos....292
12.3. Teorías detrás de los modelos de transporte....294

12.3.1. Teoría de la utilidad aleatoria (*RUT*) 294
12.3.2. Teoría del comportamiento planificado 296
12.3.3. Teoría de psicología ambiental. 298
12.4. Descripción de algunos tipos de modelos 299
12.4.1. Modelos matemáticos 300
12.4.2. Modelos de selección discreta 301
12.4.3. Modelos causales 304
12.4.4. Modelos con variables latentes 305
12.4.5. Modelos de uso de suelo y transporte 307
12.4.6. Modelos de simulación 308
12.5. Lecturas recomendadas 308
12.6. Referencias bibliográficas 310

Capítulo 13. Principios de la planificación de transporte 313

13.1. La esencia de la planificación 313
13.1.1. De qué se trata 313
13.2. Técnicas de planificación 318
13.2.1. Planificación por pronóstico 320
13.2.2. La planificación por escenarios 322
13.2.3. La planificación retrospectiva 325
13.3. Control, flexibilidad, persistencia y eficacia 325
13.4. La planificación en el Sur Global 328
13.5. El proceso de decisión y el rol del planificador 330
13.6. Referencias bibliográficas 332

Capítulo 14. Proceso de planificación de transporte 335

14.1. Pasos del proceso de planificación 335
14.2. El paso cero 336
14.3. Visión 338
14.4. Metas y objetivos 339
14.5. Indicadores 340
14.6. Recolección de datos y generación de información 341
14.7. Métodos Analíticos 343
14.8. Desarrollo de estrategias 345
14.8.1. Evaluación de propuestas, estrategias y alternativas 347
14.8.2. Métodos estandarizados para la evaluación de proyectos de transporte 348
14.9. CRT – Comunicación – Recomendación – Toma de decisiones 352

14.10. Implementación del plan. 352
14.11. Evaluación periódica de cumplimiento ex-post y revisión del plan 353
14.12. Las herramientas para modificar el futuro: regulación y las políticas (*policies*) 355
14.13. Referencias bibliográficas 356

Capítulo 15. Fundamentos para el desarrollo de modelos de la demanda multimodal 357

15.1. Fundamentos y resultados de los modelos de demanda de transporte 357
15.2. Tipos de modelos de transporte 359
15.2.1. Modelos basados en viajes 359
15.2.2. Modelos basados en actividades 361
15.2.3. Comparación entre tipos de modelos: ventajas y desventajas ..363
15.3. Desarrollo de un modelo de transporte 365
15.3.1. Desarrollo de modelo de oferta 365
15.3.2. Principios para el desarrollo del modelo de transporte 367
15.4. El uso práctico de los modelos de transporte 368
15.5. Consideraciones finales 371
15.6. Referencias bibliográficas 372

Capítulo 16. Modelo de cuatro pasos 373

16.1. Estructura del modelo 373
16.2. Paso 1: Generación de viajes 375
16.3. Paso 2: Distribución de viajes 379
16.4. Matrices skim 386
16.5. Paso 3: Selección modal 388
16.6. Paso 4: Asignación en la red (selección de ruta) 393
16.6.1. Método de todo-o-nada 396
16.6.2. Redes congestionadas y las funciones flujo-demora 397
16.6.3. Métodos de equilibrio (iterativos) 399
16.7. Calibración y validación de modelos utilizando datos de encuestas de viajes 401
16.8. Aplicación y uso del modelo 406
16.9. Referencias bibliográficas 407

Índice de figuras

Figura 1-1. Distribución de actividades y conectividad en dos casos. 28
Figura 1-2. Etapas de un viaje en transporte público. 32
Figura 1-3. Representación gráfica de los viajes derivados del diario de viaje. 35
Figura 1-4. Línea del tiempo a partir de la tabla Tabla 1-4. 37
Figura 1-5. Problemáticas asociadas a la actividad del transporte. 43
Figura 2-1. Sistema de representación CLIOS. (Sussman et al., 2014) 56
Figura 2-2. Elementos de un sistema de transporte. 58
Figura 2-3. Los componentes del sistema: oferta-capacidad, volumen y demanda 60
Figura 2-4. Perfil de demanda diaria en períodos de 15 min en un día de sept. de 2023. 64
Figura 2-5. Perfil de demanda anual en períodos de un mes. 65
Figura 2-6. Perfil de demanda tendencial en períodos de un año. 66
Figura 2-7. Oferta en el tiempo. 67
Figura 2-8. Demanda de transporte en un día (izquierda) y oferta de transporte público (derecha) 68
Figura 3-1. Ejemplo esquemático de un viaje en transporte privado (arriba) y en transporte público (abajo) 71
Figura 3-2. Elementos tipo vía canalizada (der) y no canalizada (izq.). 73
Figura 3-3. Gráfica espacio tiempo (x-t) donde se observa la trayectoria de varios vehículos. 73
Figura 3-4 Análisis temporal (caso A) y análisis espacial (caso B). 74
Figura 3-5. Error en la analogía entre LOS para autopistas y aceras . (Rodríguez-Valencia et al., 2022) 78
Figura 3-6. Relación v-k en una vía 79
Figura 3-7. Relación q-k en una vía 79
Figura 3-8. Relación velocidad-flujo para el modelo de Greenshields. 81
Figura 3-9. Estructura de un servidor. 83
Figura 3-10. Esquema de oferta y demanda para sistemas de transporte privado (izquierda). Como ejemplo de un sistema de transporte privado se tiene una autovía (derecha). 88
Figura 3-11. Un tren regional es un buen ejemplo de un sistema de transporte público. 89

Figura 3-12. Flujo estación – vehículo. 90
Figura 3-13. Sistema férreo analizado en sus componentes, mostrando la oferta y la demanda de cada uno. 91
Figura 3-14. Sub-componente A. Vía segregada para los buses del BRT de Bogotá. 92
Figura 3-15. Ejemplo del funcionamiento del sub-componente B. 93
Figura 3-16. Diferentes configuraciones de estaciones de trenes. 95
Figura 3-17. Ejemplo del funcionamiento del acceso al sistema de los viajeros (subcomponente C). 96
Figura 3-18. Toda la sub-componente C y D debe ser accesible para personas con movilidad, visión y audición reducida. 98
Figura 4-1. Pasos de diseño en ingeniería. 106
Figura 4-2. Proceso de evaluación con la metodología de nivel de servicio tradicional. 113
Figura 4-3. Proceso para evaluar una infraestructura peatonal y ciclista con el método de nivel de servicio multimodal. 115
Figura 4-4. Proceso para evaluar una infraestructura peatonal por el método de auditorías. Fuente: adaptado de Gallin, 2001 116
Figura 4-5. Teoría del comportamiento post-compra. 118
Figura 4-6. Existen infinidad de posibles escalas para evaluar la calidad general de un servicio (CGS) 119
Figura 4-7. Interpretación del "Importance performance análisis" (IPA) 121
Figura 5-1. Elementos del derecho de vía con segregación 129
Figura 5-2. Ejemplo de un espacio compartido (shared space) 130
Figura 5-3. Esquema de las jerarquías de las redes en las ciudades, que delimitan los barrios o las zonas de bajo tráfico. 136
Figura 6-1. Fuerzas resultantes de un vehículo de tracción (izq.) y de sustentación (der.). 153
Figura 6-2. Conversión energética del transporte. 158
Figura 7-1. Clasificación de aeronaves. 166
Figura 7-2. Principios físicos 167
Figura 7-3. Diagrama esquemático de un aeropuerto. 168
Figura 7-4. Tiempo entre despegue de aviones. 170
Figura 7-5. Distintos manejos de la demanda y oferta con la teoría de colas. 174
Figura 7-6. Redes entre aeropuertos. 176
Figura 7-7. Aumento de la capacidad de una pista 177
Figura 7-8. Esquema y configuración de pistas aeropuerto de Dallas Fort Worth. 179

Figura 8-1. Sección transversal sistema rueda-riel ferroviario.....185
Figura 8-2. Cambiavías en posición de la vía directa (izq.) y posición de vía divergente (der,).....186
Figura 8-3. Distancias de frenado con diferentes expresiones. 187
Figura 8-4. Sistema de Control Europeo Nivel 2 (ETCS N2). 189
Figura 8-5. Sistema de bloques para la separación de los trenes. 190
Figura 8-6. Detectores de vías y contadores de ejes.....191
Figura 8-7. Tipos de trenes. 192
Figura 8-8. Tren con locomotora y vagones de rueda libre (arriba) y un vehículo autopropulsado o unidad múltiple (abajo). 193
Figura 8 -9. Ocupación temporal de una vía férrea operada por bloques fijos. 194
Figura 8-10. Pistas de clasificación de carga en el modo ferroviario. 198
Figura 8-11. Sección transversal y ejemplo genérico de gálibo ferroviario. ..199
Figura 9-1. Dibujo esquemático de un puerto.....204
Figura 10-1. Paridad de género en el uso de la bicicleta versus la proporción total de viajes en bicicleta. 226
Figura 10-2. Círculo vicioso de degradación de infraestructura peatonal cuando se considera solo como entregable de infraestructura.....235
Figura 10-3. Marco conceptual de la evaluación de infraestructuras de no motorizados por experiencias.....238
Figura 11-1. Ejemplos de esquema de funcionamiento de un sistema de transporte público, con operador privado y tatamente público. 265
Figura 11-2. Demanda de hora punta representada espacialmente de transporte público en un corredor.....266
Figura 11-3 . Diferentes tipologías de redes. (1) Radial; (2) Red; (3) tronco alimentada.....268
Figura 11-4. Áreas de aferencia para las troncales de Transmilenio.....269
Figura 11-5. Trade-off entre separación de estaciones y velocidad de operación. 271
Figura 11-6. Tiempos de recorrido por hora de una ruta circular de bus en Bogotá, Colombia, para meses de agosto y septiembre de 2015. 273
Figura 11-7. Relación oferta demanda a lo largo de un día. 278
Figura 11-8. Flujograma del diseño operacional de sistemas de transporte público. 278

Figura 11-9. Trenes de diferentes tamaños, a partir de juntar o no varias Unidades Múltiples Eléctricas (EMU).....284
Figura 11-10. Proceso de creación de la satisfacción en sistemas de transporte público urbano.....286
Figura 11-11. Representación gráfica del apelotonamiento de buses. 289
Figura 12-1. Teoría de comportamiento planificado. 297
Figura 12-2. Marco conceptual del modelo S-O-R. 298
Figura 12-3. Esquema conceptual de modelos de transporte. 300
Figura 12-4. Ejemplo de una variable latente. 305
Figura 12-5. Estructura del modelo estructural y el modelo de medición de un modelo de ecuaciones estructurales.....306
Figura 13-1. Ejemplo esquemático de dos posibles escenarios de demanda de transporte. 316
Figura 13-2. Perspectiva del proyecto según el tiempo. 317
Figura 13-3. Esquemas de las técnicas de planificación. 318
Figura 13-4. Planificación por pronóstico. 323
Figura 13-5. Diagrama de logros futuros para dos enfoques visionales. 323
Figura 13-6. Envolvente de logros futuros para dos enfoques visionales.....324
Figura 13-7. Evolución de la distribución modal en Bogotá. 327
Figura 14-1. Marco conceptual del proceso de planificación de transporte. 336
Figura 14-2. Diferentes categorías de información necesaria para la planificación de transporte.....342
Figura 14-3. Subcomponente del proceso de planificación que presenta los métodos analíticos. 344
Figura 15-1. Resultado de un modelo de transporte, el caso de Bogotá: a la izquierda para transporte privado y a la derecha para de transporte público. 358
Figura 15-2. Esquema de una matriz origen-destino. 360
Figura 15-3. Comparativo de modelos basados en viajes y en actividades...363
Figura 15-4. Elementos de la construcción de la representación de la oferta. 366
Figura 15-5. Simplificación de la red y ejemplo de cómo se conectan zonas a la red. 367
Figura 15-6. Elementos básicos de un modelo. 369
Figura 15-7. Elementos del modelo base (año 0). 370
Figura 15-8. Elementos de modelo para el futuro. 370
Figura 16-1. Ambiente de modelación y estructura detallada del modelo de demanda de cuatro etapas.....374

Figura 16-2. Inputs y outputs del paso 1 de Generación de viajes.....378
Figura 16-3. Función de impedancia para el inverso del cuadrado del costo. 382
Figura 16-4. Diferencias entre tres tipos de funciones de impedancia ($f(c_{ij})$, dos potenciales y una exponencial. 383
Figura 16-5. Inputs y outputs del paso 2 de Distribución de viajes. 386
Figura 16-6. Proceso del paso 3 de selección de modo.....392
Figura 16-7. Inputs y outputs del paso 3 de Selección de Modo 393
Figura 16-8. Red interurbana en Estados Unidos (izquierda) y red urbana de la ciudad de Bogotá (derecha.) 395
Figura 16-9. Ejemplo de dos funciones flujo demora. La gris con α=0,3 y β=4 y la negra con α=0,5 y β=2.....399
Figura 16-10. Algoritmo de cuatro pasos completo con resultados e inputs.....401
Figura 16-11. Gráfica de comparación de aforos versus flujos en arcos del modelo.....405
Figura 16-12. Esquema simplificado de posibles análisis que se pueden hacer.....407

Índice de tablas

Tabla 1-1. Ejemplo de tasas de viajes de diferentes ciudades.....30
Tabla 1-2. Algunas decisiones de los viajeros.....32
Tabla 1-3. Propósitos de viaje.....33
Tabla 1-4. Ejemplo de información procesada de un diario de viaje.....34
Tabla 1-5. Contrastando los dos enfoques de planificación del transporte. Adaptación a partir de Banister (2008).....46
Tabla 2-1. El fin del sistema de transporte según la perspectiva que se tenga.....53
Tabla 2-2. Unidades de la oferta y demanda según la infraestructura de transporte.....61
Tabla 2-3. Comparación de tres sistemas de transporte. 62
Tabla 2-4. Ejemplos de análisis temporal y agregación de la demanda.....63
Tabla 3-1. Funcionamiento de los sub-componentes de sistemas tipo transporte público por modo. 100
Tabla 4-1. Tipos de entregables en el transporte.....105
Tabla 4-2. Casos genéricos de la relación entre demanda y la oferta.....108

Tabla 4-3. Ejemplo de tabla de correspondencia para medir el nivel de servicio en una autopista 113
Tabla 4-4. Parámetros para evaluar para el nivel de servicio de distintas facilidades. 114
Tabla 4-5. Criterios de evaluación de diferentes entregables de infraestructura. 124
Tabla 5-1 Descripción de los 4 niveles de segregación-integración y tipos genéricos de derecho de vía. 135
Tabla 5-2. Descripción de las diferentes tecnologías de transporte público urbano y regional. 141
Tabla 5-3. Capacidad de los diferentes modos y tecnologías de transporte urbano. 143
Tabla 5-4. Eficiencia de las diferentes tecnologías. 144
Tabla 6-1. Comparación genérica de los modos en varias dimensiones....148
Tabla 7-1. Subcomponentes de un aeropuerto....169
Tabla 7-2. Estrategias de aumento de capacidad de una pista por medio del rediseño del lado aire. 172
Tabla 8-1. Elementos del modo férreo. 194
Tabla 9-1. Sub-compontes de infraestructura marítima. 206
Tabla 9-2. Servicios que se presentan en un puerto. 207
Tabla 9-3. Definiciones básicas del modo marítimo 218
Tabla 10-1. Selección de algunas infraestructuras y servicios de los modos no motorizados. 229
Tabla 10-2. Factores que afectan el servicio o el desempeño de peatones y ciclistas. 232
Tabla 10-3. Criterios de diseño para infraestructuras de diferentes modos...239
Tabla 10-4. Factores relevantes para el diseño de infraestructuras para peatones. 241
Tabla 10-5. Factores relevantes para el diseño de infraestructuras para bicicletas. 243
Tabla 10-6. Tabla de correspondencia para evaluar P-LOS y B-LOS. 246
Tabla 10-7. Valores para la calificación de condición del pavimento. 248
Tabla 10-8. Niveles de segregación para infraestructura ciclista. 252
Tabla 11-1. Promedio de velocidades operacionales de diferentes alternativas de transporte. 274
Tabla 11-2. Valores indicativos de frecuencias máximas y su equivalente intervalo mínimo para tecnologías. 280
Tabla 11-3. Ejemplo de cómo convertir la frecuencia necesaria en frecuencia de operación (paso 2 ya paso 3)....282

Tabla 11-4. Listado amplio de indicadores de evaluación de TP. 287
Tabla 13-1. Ejemplo de escenarios. 322
Tabla 14-1. Ejemplo de indicadores de movilidad 341
Tabla 14-2. Algunos de los métodos analíticos más frecuentemente utilizados en transporte. 344
Tabla 15-1. Modelo de cuatro pasos. 361
Tabla 16-1. Ejemplos de variables que permiten estimar generaciones (producciones y atracciones) de viajes. 376
Tabla 16-2. Matriz total de viajes vacía $[T]_{nxn}$ (tabla de marginales) con la Información resultante del paso 1. 378
Tabla 16-3. Matriz OD de viajes resultante del proceso de distribución. 380
Tabla 16-4. Ejemplo de una matriz Skim de costos monetarios (O_{ij}) entre las diferentes zonas. 387
Tabla 16-5. Ejemplo de una matriz Skim de tiempos entre zonas en la red vacía ($t_{0,ij}$). 388
Tabla 16-6. Opciones metodológicas para la asignación. 395
Tabla 16-7. Selección de parámetros a ser calibrados en el modelo de transporte. 403

Capítulo 0

Introducción

¿Por qué importa el transporte?

Desde el momento en que despierta, el transporte está presente en su vida. El teléfono móvil que le sirvió de alarma esta mañana y el café que se tomó al desayuno llegaron desde muy lejos, en barco o camión. Además, sus actividades diarias requerirán movimiento en el espacio físico. Todo esto es posible gracias a que existe una cantidad de componentes interconectados, que constituyen un sistema de transporte y que permiten el movimiento de personas y bienes en el espacio.

El transporte articula sistemas sociales, económicos, generando oportunidades económicas y sociales, resultando en efectos multiplicadores positivos. Funciona con infraestructuras, servicios y unas normas que apoyan el desarrollo de las personas y de actividades productivas, generando calidad de vida y prosperidad. la capacidad de transportar bienes y personas de manera segura y eficiente a largas distancias facilitando el comercio y la expansión económica (National Geographic Society 2023).

¿Cuáles son los retos y desafíos en la disciplina del transporte?

Los retos alrededor del transporte son cambiantes. Así como los retos actuales difieren sustancialmente de los que teníamos al inicio del milenio o en la década de los 80 del siglo pasado, los que enfrentaremos en el futuro seguramente serán diferentes a los de hoy. En el norte global, si bien los retos del transporte coexisten y se superponen, el énfasis dominante ha migrado: de capacidad vial (posguerra) a calidad del aire (años 80-90), sostenibilidad ambiental (90s-2000s), energías alternativas (2000s), movilidad compartida y vehículos autónomos (2010s), y transformación digital (2020s). En contraste, en el sur global hay mucha más heterogeneidad y superposición, sumado a contextos diferentes de informalidad y sistemas públicos diversos.

Sin embargo, el cambio climático es aquel desafío que, desde su reconocimiento como problemática global, por su complejidad, su escala e inercia, se ha mantenido presente, pero cada día subiendo en su nivel de urgencia. La descarbonización del transporte es obligatoria para mitigar el cambio climático (Cao, Y., Derrible, S., Le Pira, M., & Du, H. (2024). Esta descarbonización puede lograrse mediante tres estrategias: reducir la cantidad de kilómetros viajados (distancia y cantidad), transicionar esos viajes hacia modos menos contaminantes y mejorar la eficiencia y tecnología de los vehículos existentes. Por ejemplo, el COVID nos demostró que reducir la movilidad física es técnicamente posible, mejorando el ambiente, reduciendo la huella de carbono y mejorando las externalidades.

Otros retos de nuestros sistemas de transporte contemporáneos se derivan de la actividad misma, como la siniestralidad vial, la contaminación (del aire y acústica), la congestión, la inequidad de acceso entre la población, los efectos sobre la salud mental y la fragmentación de ecosistemas completan un panorama de externalidades que, en la mayoría de contextos urbanos, se internalizan insuficientemente en los costos del transporte. Buena parte de estos problemas se derivan la dependencia del automóvil (y la motocicleta) y su cada vez mayor uso.

Si bien los vehículos motorizados aportan al bienestar y el desarrollo de las personas, su uso indiscriminado y dependencia en entornos urbanos ha tenido un efecto negativo en ellas: Segregación, degradación de la calidad de vida urbana y del espacio público (al convertir calles y plazas en vías de flujo vehicular y áreas de estacionamiento). La dependencia vehicular en ciudades se sostiene sobre subsidios masivos invisibilizados, como el estacionamiento gratuito o infraestructura vial financiada con impuestos generales, sumado a un imaginario cultural que asocia el automóvil con progreso, realización personal y estatus social.

Aunque a menudo se presentan como problemas técnicos, estos retos trascienden la esfera técnica. Los sistemas de transporte son sistemas muy complejos, donde lo público, la economía, la cultura, la política y los individual se entrelazan. Si bien este libro se enfoca en la componente técnica e ingenieril, reconoce lo indispensable pero insuficiente de un enfoque sistémico.

¿Qué rol juega la ingeniería?

La ingeniería cumple un rol de traductora entre las necesidades (sociales, ambientales, económicas) y las propuestas y soluciones para suplirlas. En transporte, la ingeniería aporta en lograr lo que se necesita para logar su fin de permitir el acceso de individuos a sus actividades y el acceso a mercados

deseados de bienes, mercancías y productos, necesarios para desarrollo de sociedades. (retos)

La actividad de los ingenieros e ingenieras de transporte, genéricamente, consiste en planificar, diseñar, operar y evaluar sistemas de transporte. Estas actividades, desde mi experiencia, se centran principalmente en comprender y articular la oferta (infraestructura, servicios, tecnología) y la demanda (necesidades de movilidad con unos patrones de viaje determinados). El ingeniero usa modelos y simulaciones para poder estimar la demanda futura. El diseño y dimensionamiento de la oferta de infraestructura y servicios, resulta de evaluar la relación entre esa demanda futura y la oferta.

Por décadas, la ingeniería de transporte fue ejercida como una disciplina técnica (no socio-técnica), en muchos casos aislada de su entorno social o ambiental. Sin embargo, a diferencia de la ingeniería estructural, en el transporte se trabaja con personas y tienen efectos directos e indirectos en la sociedad, en el ambiente , en la economía, etc. De ahí que los sistemas de transporte sean sistemas socio-técnicos. Una mirada del transporte desconectada de sus efectos ambientales locales y globales, de sus efectos en segregar socialmente, sus efectos urbanísticos, llevaron a una movilidad insostenible. Ejemplos de ello incluyen autopistas urbanas que produjeron segregación espacial, infraestructura vehicular subsidiada que genera dependencia del automóvil, y soluciones técnicas que resolvieron problemas inmediatos creando externalidades de largo plazo.

Hoy en día, y de manera inexorable, se requiere del trabajo integrado de varias disciplinas, por ejemplo, planificación urbana, economía, psicología, diseño, paisajismo o políticas públicas. Por otro lado, recientemente la ingeniería de transporte se ha concentrado en desarrollar métodos que consideren a los usuarios en los dueños, operación y gestión de sistemas de transporte. Por último, se consideran la participación de comunidades afectadas, reconociendo que quienes viven las consecuencias poseen conocimiento situado indispensable.

A pesar de ser una disciplina socio-técnica, los ingenieros e ingenieras que trabajamos en esta disciplina tenemos la labor de seguir aportando con capacidades distintivas de aplicar las matemáticas, la probabilidad y la tecnología (ya descritas en esta sección) de una manera integrada. Una de sus más importantes labores es ayudar a que se tomen buenas decisiones, basadas en información y evidencia. Esta capacidad de cuantificar, modelar y analizar sistemas complejos es poderosa, haciéndolo indispensables en la planificación de las ciudades y las naciones.

Aunque en muchas facultades de ingeniería se sigue enseñando transporte principalmente como diseño de infraestructura, cálculo de niveles de servicio y optimización, la ingeniería de transporte está evolucionando hacia la formación de personas preparados para enfrentar sistemas de mayor complejidad y, dentro del entorno de la IA, que tengan pensamiento crítico, criterio y capacidad de resolución de problemas.

¿Qué hace a este libro especial?

Al analizar varios libros de texto sobre ingeniería y planificación de transporte disponibles en las bibliotecas, incluso siendo recientes, tienen al menos una de las siguientes cinco grandes falencias: (1) reducir la disciplina a analizar la demanda y la capacidad de los sistemas de transporte; (2) enfatizar desproporcionadamente en el énfasis del transporte en automóviles (y el trato superficial de otros modos, cuando los tratan); (3) estar desactualizados; (4) la falta de un entendimiento sistémico y (5) no presentar visiones alternativas al entendimiento de los sistemas, desde el punto de vista teórico al práctico. Shi, Y., & Al. (2019) and Große, C. (2022) entre muchos otros, reconocen la necesidad de una aproximación sistémica al transporte que integre diferentes modos y tecnologías como un sistema complejo interconectado, en lugar de abordar soluciones aisladas.

Este libro aporta valor a la literatura de varias formas: se basa en entender, analizar y diseñar los sistemas de transporte de manera general, basando los análisis a los dos tipos genéricos sub-componentes de un sistema (tipo vía o tipo servidor). Su mayor contribución consiste en replantear los sistemas de transporte, alrededor de tres entregables que son: de infraestructuras, de servicio y de experiencias. Además, por primera vez en la literatura, hay un capítulo sustancioso y con el estado del arte que explica y analiza los modos no-motorizados. Finalmente, este libro tiene un valioso capítulo de teorías que se aplican al transporte y sus modelos derivados, que son alternativas a los tradicionales modelos de utilidad aleatoria (RUM) y el modelo de 4 pasos.

El mundo es tan cambiante, que la manera de enseñar debe migrar de los contenidos y los casos hacia los principios fundamentales y el entendimiento. Se quiere que los profesionales puedan pensar, analizar y resolver problemas. Que, en sus sesiones de formación, conjuntamente con el libro, puedan adquirir el pensamiento lógico y el pensamiento crítico. Lo esperado es que, este libro sirva para la formación de profesionales en pregrado o posgrado, el libro también sirva de consulta profesional y de fuente para la investigación. Su principal

objetivo es desarrollar las habilidades del lector para resolver problemas, con pensamiento crítico y sistémico, especialmente con capacidad de adaptación frente a entornos cambiantes y tecnologías emergentes.

El libro constituye un recurso educativo con el cual, cualquier profesional puede aprender de un sistema de transporte, analizando el sistema y las componentes desde su funcionamiento, su capacidad, y sus elementos. Además, enseña los principios de los diferentes modos, poniéndolos en perspectiva. Finalmente se encarga de presentar los procesos de planificación, modelación y evaluación. Todos los temas se basan en el estado del arte en los diferentes temas, presentado de forma integrada con investigaciones propias y la literatura más reciente de la ingeniería de transporte.

La obra abarca desde los fundamentos disciplinares de los sistemas de transporte (caps. 1-2) y la comprensión sistémica del funcionamiento de los sistemas de transporte (caps. 3-7). A partir de estudiar teorías y principios metodológicos (cap. 12), la obra tiene un fuerte énfasis en la modelación y algoritmos de estimación de demanda (caps. 15-16) y la planificación (cap. 13). Incluye el estudio detallado de todos los modos (caps. 6-10), incluyendo un capítulo especializado de transporte público (cap. 11), y cerrando con una visión prospectiva y abierta del futuro ante los retos emergentes del sector (cap. 12).

¡Bienvenidos!

Capítulo 1

El transporte: disciplina en evolución

1.1. Movilidad y accesibilidad

Muchos libros de la disciplina inician definiendo el transporte como la actividad de movilizar personas o bienes en el espacio. Pero si bien movilizarse es una actividad en sí misma, las personas en realidad viajan con algún propósito diferente al movimiento en sí. Por ejemplo, las personas se transportan con el fin de llegar a su trabajo, de visitar a alguien, ir al médico, ir al cine o a la escuela. Por eso se dice que la demanda de transporte es una ***demanda derivada***, en la medida en que las personas demandan transporte como consecuencia de querer llevar a cabo otra actividad. Sin embargo, sí existen algunos casos donde el transportarte es la actividad que se lleva a cabo, especialmente en lo recreativo y turístico. Por ejemplo, salir a trotar, dar una caminata de paseo en las tardes, tomar un *turi-bus* en una ciudad o salir a conocer un sistema de transporte nuevo. En el caso de los bienes y mercancías, no debería haber viajes sin propósito.

Tener posibilidades de movimiento físico en el espacio hace referencia a la ***movilidad***, y es lo que permite, a las personas, poder acceder a sus actividades de manera presencial, y, a los actores del sector productivo, acceder a insumos y sacar sus productos en diferentes mercados. La ***accesibilidad*** se relaciona en la disponibilidad de las oportunidades resultantes de la oferta de transporte y las características del uso de suelo (Bocarejo S. & Oviedo H., 2012). Una medida muy utilizada consiste en determinar la facilidad de alcanzar actividades (oportunidades de trabajo, estudio, recreación) en el espacio, desde una localización de origen, usando opciones de transporte disponibles (Guzman et al., 2017). De manera más formal, derivada de la expresión original de Hansen (1959), adaptada con la nomenclatura más reciente de Ortuzar et al. (2011), se tiene la expresión:

$$A_i = \sum_j a_j f\left(C_{ij}\right) \quad (1)$$

$$f\left(C_{ij}\right) = e^{-\beta . c_{ij}} \quad (2)$$

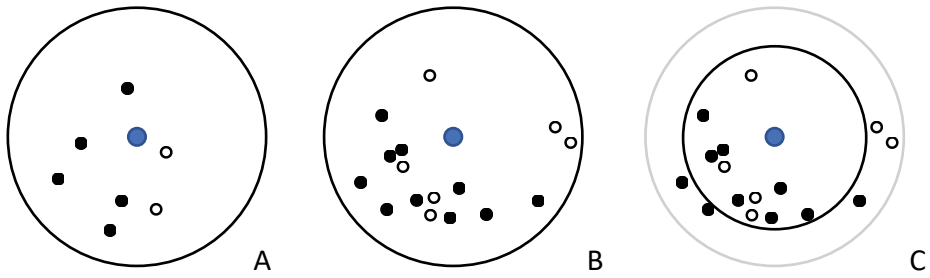
A_i es la accesibilidad de la zona i
a_j es la atractividad de la zona j
c_{ij} es el costo desde la zona i a la zona j
$f(c_{ij})$ es una función de impedancia desde la zona i a la zona j

Nótese que la función de impedancia $f(c_{ij})$ es una función decreciente, de tal forma que, cuanto mayor sea el costo de llegar al destino, menor será su valor. Por su parte, a_j es la cantidad de oportunidades en zona j que se deriva de los lugares de empleo, estudio, servicios, comercio, etc. Por eso, la accesibilidad está relacionada con los usos de suelo.

Para explicarlo de manera alternativa, se determina el área que se puede cubrir con una hora de viaje, desde un origen. La suma del número de oportunidades que haya dentro de esa área sería un indicador de accesibilidad. Por eso, una persona que viva en la periferia de una ciudad, donde hay bajas densidades, tendrá pocas actividades dentro de su área aferente de una hora (Figura 1-1A). En cambio, una persona que viva en el centro financiero de una ciudad (Figura 1-1B) tendrá, dentro de su área de aferencia de una hora, muchas más actividades, comparativamente hablando.

La velocidad juega un papel importante porque el alcance o área de aferencia se puede ampliar o reducir. Así, las personas con opciones de movilidad más lentas requerirán más tiempo para desplazarse, haciendo que, dentro del mismo tiempo de una hora de viaje, su accesibilidad se vea reducida (Figura 1-1 B y C). En otras palabras, una reducción del alcance reduce la cantidad de actividades a las que se puede acceder.

Figura 1-1- Distribución de actividades y conectividad en dos casos



La accesibilidad, como es evidente, dependerá de la movilidad y, a su vez, la movilidad dependerá de las opciones de movimiento que se ofrezcan (autopistas, metro, buses, etc.). Pero una forma más holística de ver la movilidad se relaciona no solo con la capacidad de moverse rápido, sino con la **posibilidad de tener opciones** para moverse en un entorno de libre escogencia. En los años 90, en Bogotá, Colombia, solo había dos opciones: los buses informales o el automóvil. Para el año 2023, Bogotá tiene transporte masivo en buses (BRT), buses regulares, teleférico, ciclorrutas, bicicletas públicas, motocicletas, patinetas, además del automóvil y la motocicleta etc., y para el 2028 se tiene planificada la entrada en operación de un sistema metro.

1.2. La demanda de transporte

La demanda de transporte hace referencia a la cantidad de viajes y sus características, como el modo, los lugares o las rutas. Conocer la demanda de transporte actual permite analizar la congestión y evaluar si los sistemas prestan un buen servicio. Pero tratar de conocer la demanda de transporte en el futuro es esencial para poder planificar los sistemas de transporte. Al conocer el número de viajeros del futuro, se puede estructurar, diseñar y evaluar proyectos e inversiones futuras y conocer sus potenciales beneficios y costos. De ahí se desprende que una de las principales actividades de la ingeniería de transportes es crear modelos que ayudan a estimar la demanda futura de este, actividad que, sea dicho de paso, es muy retadora por la incertidumbre tan alta en sistemas tan complejos.

¿De qué depende la demanda? Los principales determinantes de la demanda total de transporte son el tamaño y la estructura poblacional, que define el número potencial de viajeros, y las características socioeconómicas, especialmente el ingreso per cápita, ya que cuanto más alto el ingreso, mayor será la cantidad promedio de viajes diarios. La **tasa de viajes** es un indicador de movilidad de las ciudades, que indica el promedio de viajes diarios de la población. La tasa de viajes se calcula así:

Ecuación 1-1. Tasa de viajes.

$$tasa\ de\ viajes = \frac{\sum T_{ij}}{pop} \tag{3}$$

$\sum T_{ij}$ es la suma de todos los viajes que se hacen en un día en el área de estudio

pop es la población del área de estudio

Una persona que sale de su casa a realizar alguna actividad, se supone que al menos realiza dos viajes, el de ida y el de vuelta. Pero habrá personas que no salgan a viajar como infantes o adultos mayores; por eso podría ser que la tasa de viaje sea, en algunas ciudades, menor a dos. Sin embargo, las personas que tienen un mayor ingreso tienen en general más posibilidad de acceder a más actividades y ellos hacen que el promedio se suba. Evidentemente, hay unos grupos que viajan más y otros que viajan menos. Por ejemplo, las personas que trabajan o estudian tienden a viajar más, mientras que las personas ya pensionadas o niños viajan menos y en horarios diferentes.

En los países de mayor ingreso y desarrollo se pueden observar tasas de viaje individual: es de hasta 3,5 viajes/persona/día, mientras que, en países en vía de desarrollo, este valor puede ser mucho menor, por ejemplo, de apenas 1,8 viajes/persona/día. Lo anterior apoya la idea de que, a medida que mejora la economía de una sociedad, se generan más viajes productivos. Por ejemplo, una ciudad como Bogotá, que tiene alrededor de 7,8 millones de habitantes (DANE, 2022), puede tener en el día 15,8 millones de viajes (Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2019). En la Tabla 1-1 se presentan otros ejemplos

Tabla 1-1. Ejemplo de tasas de viajes de diferentes ciudades

Ciudad	Año	Población (millones)	Viajes (millones)	Tasa de viajes	Fuente
Bogotá (Colombia)	2019	7,80	15,8	1,81	(Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2019)
Santiago (Chile)	2012	6,65	18,5	2,78	(Muñoz et al., 2015)
Buenos Aires (Argentina)	2019	3,10	8,59	2,2	(Secretaría de Transporte y Obras Públicas, 2023)
Seúl (Corea)	2010	9,89	25,56	2,59	(The Seoul Research Data Service, 2022)
Sydney (Sidney)	2018	4,87	18,7	3,84	(NSW State of Enviroment, 2018)

Para poder construir herramientas potentes (modelos) para la planificación de los sistemas de transporte, se empieza por entender los procesos que las personas hacen para la toma de decisiones cuando realizan un viaje. Es necesario revisar las teorías que explican cómo las personas toman las decisiones y qué modelos se usan para replicar los sistemas de transporte.

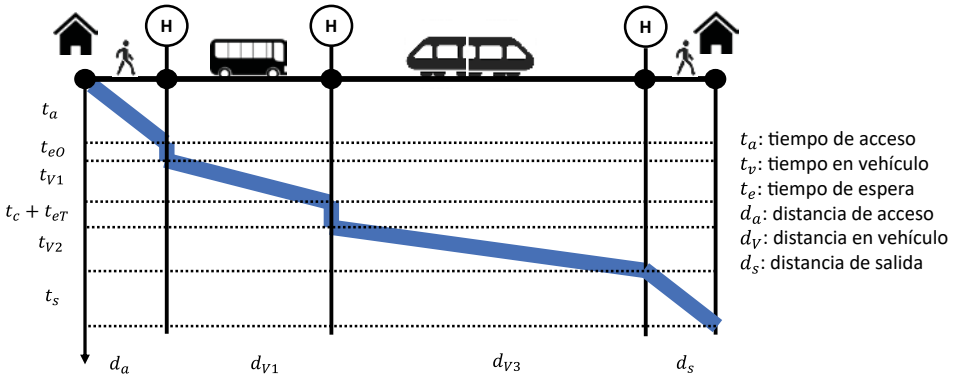
Cada viajero hace una serie de decisiones, muy difíciles de explicar y de modelizar, debido a que las razones para tomarlas pueden variar, no solo entre personas, sino también para una misma persona. Las decisiones se pueden basar en hábitos, necesidades, gustos, capacidades, actitudes y/o preferencias, pero también dependen de las alternativas de decisión que tenga y del entorno en el que se encuentre.

1.3. Proceso de viajar

Antes de entrar a revisar el proceso que las personas realizan a la hora de viajar, es conveniente estar en la misma página sobre algunos términos técnicos como viajes, *tour*, etapas, etc. Un **viaje** es el desplazamiento físico entre un origen y un destino, con un propósito determinado. En las mañanas, la gran mayoría de los viajes tiene como origen los hogares y como destino el trabajo, aunque puede haber otros destinos. Una vez ya en la calle, se realizan muchos otros viajes durante la jornada y, al final del día, se regresa a casa. Los viajes que inician o terminan en casa son de especial interés, porque son el primer y el último viaje. Por eso, los viajes son clasificados en dos grupos: los que tienen como un origen o destino la casa (HB por sus siglas en inglés "*home-based trips*") y los que ni van ni llegan a la casa (NHB o "*not home-based*") (Ortúzar & Willumsen, 2008).

Los viajes pueden ser en un solo modo o pueden emplear varios modos. Usualmente, para los viajes en transporte público (bus, metro, avión, tren, etc.) se requiere usar varios modos dentro del mismo viaje, mientras que un viaje en transporte privado (carro o bicicleta) se realiza en el mismo modo desde el origen hasta el destino. En esos viajes donde hay cambios de modo hay varias etapas. Una **etapa de viaje** (*trip stage* o *trip leg*) se refiere a cada segmento unimodal dentro de un viaje. En la Figura 1-2 se presenta el caso de un viaje en transporte público que tienen 4 etapas: se accede a pie, se toma un bus para llegar a la estación de metro, después cambia de modo para usar el metro y finalmente se sale a pie para llegar al destino final. Como hay tres modos de transporte implícitos, a este viaje se le asigna como **modo de transporte principal** aquel con el cual se recorrió la mayor distancia; en este ejemplo, se considera como un viaje en metro.

Figura 1-2. Etapas de un viaje en transporte público



Cada viajero toma una serie de decisiones, muy difíciles de explicar y de modelizar, debido a que las razones para tomarlas son internas, la mayoría de carácter individual, pero también de carácter colectivo (deber, aprobación, replicación). Las decisiones de una misma persona pueden variar ante la misma decisión, dependiendo del día. Hay decisiones instantáneas como la selección de modo, a partir de las condiciones del clima del momento. Las decisiones también tienen una fuerte influencia de los hábitos, necesidades, gustos, capacidades, actitudes y/o preferencias individuales, pero también dependen de las alternativas de decisión que tenga y del entorno en el que se encuentre. En la Tabla 1-2 se presentan de forma concisa varias de las decisiones en el proceso antes de realizar un viaje. Al revisar las diferentes decisiones, se puede deducir que existe una precedencia clara entre algunas de esas decisiones, mientras que otras se hacen simultáneamente o se pueden intercambiar. Implícitamente, se está diciendo que, ya viendo esto como un algoritmo de modelación, los modelos de demanda de transporte se componen de varios submodelos; no es un solo modelo.

Tabla 1-2. Algunas decisiones de los viajeros

Decisión	De qué se trata
Para qué viajar	Alcanzar una actividad que le da el propósito al viaje
Si viajar o no viajar	Decidir si vale la pena trasladarse o si se puede virtual
A dónde viajar	Escoger entre los posibles destinos para esa actividad
En qué modo viajar	Escoger entre varios medios de transporte disponibles
A qué hora viajar	Decidir en cuál instante en el continuo del tiempo se inicia al viaje
Y cuál ruta tomar	Tiene que ver con el espacio físico y la red y el desempeño de esta

Adicionalmente, existen otras decisiones de más largo plazo asociadas a viajes recurrentes, como lo son la escogencia de la localización del trabajo, del lugar de residencia, o la tenencia de algún tipo de vehículo. Todas son de interés en la ingeniería de transporte, porque también afectan el proceso de viaje.

1.3.1. Para qué viajar

El sociólogo y planificador F. Stuart Chapin Jr., de la Universidad de Carolina del Norte, postuló en los años setenta la teoría que explicaba que la demanda de actividades era motivada por las necesidades básicas humanas (Chu et al., 2012). Así, la teoría asumía que viajar a ciertos destinos, a ciertas horas del día, resultaba de la participación en actividades (Chu et al., 2012). Aunque hay decenas de actividades diferentes, estas se clasifican dentro de unas categorías genéricas de **propósito de viaje**. Un ejemplo de estas categorías se presenta en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Propósitos de viaje

Número	Propósito de viaje	Símbolo	En inglés
1	Regreso al hogar	H	*Home*
2	Trabajo	W	*Work*
3	Estudios	C	*School*
4	Compras	S	*Shop*
5	Visitar a alguien	V	*Visit*
6	Dejar/recoger a alguien	A	*Accompany*
7	Entretenimiento y ocio	R	*Recreation*
8	Personales	P	*Personal*
9	Asistencia médica/dental	M	*Medical/Dental*
10	Otro	O	*Other*

Todo destino de un viaje es, a su vez, un origen de otro viaje subsiguiente, haciendo que al final las personas hagan en un día una sucesión de viajes. Esas sucesiones de viajes que inician y terminan en casa o en el trabajo se llaman ***tours* de viajes**. Como la casa y el trabajo tienen localizaciones predeterminadas y arraigo, son usualmente bases o anclaje de inicio y terminación de *tours*. El *tour* más simple es de la casa (H) al trabajo (W) y de regreso a casa (H). Ese *tour* se

denotaría HWH. Para ejemplificar esto, en la Tabla 1-4 se presenta el ejemplo de la información que se puede obtener de un diario de actividades de una persona.

Tabla 1-4. Ejemplo de información procesada de un diario de viaje

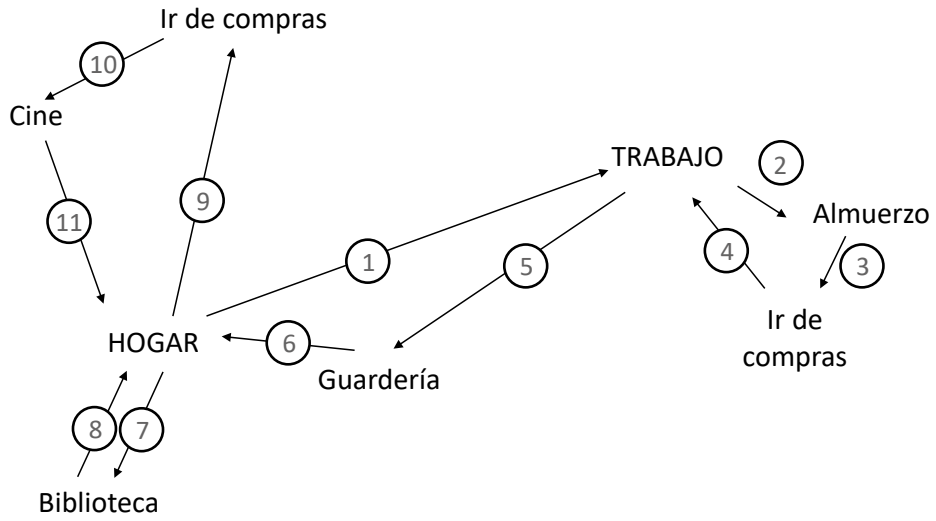
Viaje	Partida	Llegada	Actividad	Costo de viaje
1	7:10 a. m.	7:50 a. m.	Ir al trabajo	$ 2,30
2	12:05 p. m.	12:15 p. m.	Ir a almorzar	$ 0
3	1:20 p. m.	1:30 p. m.	Ir a comprar papel	$ 0
4	1:35 p. m.	1:40 p. m.	Regresar al trabajo	$ 0,00
5	4:35 p. m.	5:00 p. m.	Ir a la guardería	$ 2,30
6	5:05 p. m.	5:25 p. m.	Regresar a casa	$ 9,70
7	6:40 p. m.	6:50 p. m.	Ir a regresar un libro	$ 0
8	6:50 p. m.	7:00 p. m.	Regresar a casa	$ 0
9	7:35 p. m.	7:45 p. m.	Ir de compras	$ 2,40
10	8:00 p. m.	8:15 p. m.	Ir al cine	$ 3,60
11	9:55 p. m.	10:10 p. m.	Regresar a casa	$ 3,60

En este ejemplo, además de los once viajes, la persona realiza cuatro *tours*. El primer *tour* es el de ir a trabajar, que en ese caso incluye una parada de regreso en la guardería (HWAH). Desde el trabajo se tiene un *tour* corto. Al final del día tiene dos *tours* basados en casa: cuando va a dejar el libro a la biblioteca (HOH) y cuando va de compras y recreación al final del día (HSRH). El último *tour* tiene como arraigo el trabajo, quedando conformado como WOSW. (Nota: no confundir la nomenclatura de los *tours* con la nomenclatura de viajes dependiendo si son basados en el hogar o no, HB y NHB). En la Figura 1-3 se presenta un esquema de los viajes, en el cual es más fácil identificar los *tours*.

Las encuestas de hogares, encuestas de interceptación y los diarios de viaje son instrumentos de recolección de información que, al aplicarse a una muestra de la población, permiten obtener la información necesaria para conocer la situación actual de la movilidad y para poder calibrar modelos. Los **diarios de viaje** proveen muchos más detalles que las encuestas de movilidad o encuestas de interceptación de origen y destino. Por ejemplo, con los diarios de viaje se conocen las actividades realizadas, las localizaciones de éstas y su duración, de

lo que se derivan la hora de salida y llegada, los tiempos de viaje y se pueden calcular distancias.

Figura 1-3. Representación gráfica de los viajes derivados del diario de viaje



1.3.2. Viajar o no viajar

En la Tabla 1-2 se presentan algunas decisiones de llevar el viaje o no llevarlo para realizar la actividad. Como el viaje se deriva de la actividad (demanda derivada), esta decisión es fuertemente mediada si es posible acceder a la actividad virtualmente o si es necesario realizar un viaje para acceder. La pandemia de COVID-19 permitió una experiencia masiva de trabajo desde casa (llamado teletrabajo o trabajo remoto). Después de la pandemia, muchas actividades, que no requerían prespecialidad, se están realizando de manera parcial o total desde casa de manera remota.

El proceso cognitivo de elegir viajar o no implica una compleja interacción de actitudes, normas sociales, percepciones de control, evaluaciones de utilidad, experiencias pasadas y consideraciones de riesgo. Esta opción ha flexibilizado la situación, permitiendo a los trabajadores no solo elegir entre trabajo remoto o presencial, sino también modificar la frecuencia y los horarios de sus desplazamientos. Así, se ha ampliado el abanico de opciones, combinando el trabajo desde casa con la presencialidad de forma más adaptable. Esto puede afectar la manera de construir los modelos de transporte (Ortiz-Ramírez et al., 2024),

específicamente los modelos de **generación de viajes**, que no son más que herramientas matemáticas y estadísticas utilizadas para estimar el número de viajes que se originan en o son atraídos hacia una zona específica.

Como se vio recién pasada la pandemia del COVID-19, cuando muchas personas deciden teletrabajar, se están sustituyendo viajes. Esto reduce los viajes en hora punta y podría reducir el número total de viajes, lo que a su vez afecta la generación de viajes (Chu et al., 2012). Sin embargo, alineados con la filosofía de transporte sostenible, esta medida puede resultar en una reducción (Bethune & Korinek, 2020; Leeson & Rouanet, 2021) en la congestión, las emisiones, etc. En un estudio reciente para Bogotá sobre intenciones de trabajo remoto después del COVID se reveló que los usuarios de transporte público, quienes generalmente reportan menor satisfacción con sus desplazamientos, tienen mayor probabilidad de preferir el trabajo remoto (Ortiz-Ramírez et al., 2024).

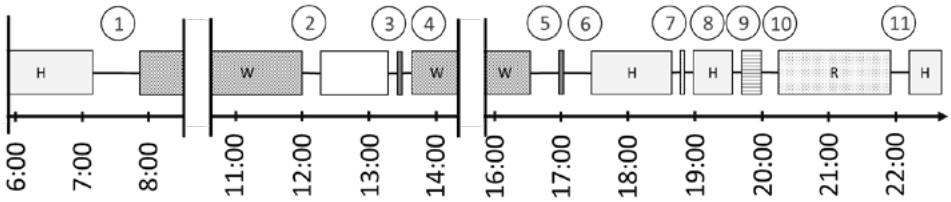
1.3.3. A dónde viajar

Al continuar con el proceso de la Tabla 1-2. Algunas decisiones de los viajeros. Tabla 1-2, la decisión de a dónde viajar es un proceso cognitivo complejo que está fuertemente influenciado por el carácter de obligatoriedad o discrecionalidad de la actividad. Para ir al trabajo o al estudio (viajes obligatorios) usualmente se tiene una única opción, mientras que, para ir a cine, hay muchas más opciones. Dentro de los propósitos de viaje listados en la Tabla 1-3, los viajes menos flexibles, como el motivo viaje de regreso a casa (H), de trabajo (W) y de estudio (C), suman el mayor número de viajes y usualmente forman *tours* HWH y HCH que inician temprano en la mañana y culminan al final del día, generando los dos períodos punta de demanda, que son los más críticos.

Lo primero para tomar la decisión de dónde dirigirse para llevar a cabo las actividades es conocer la localización de los diferentes lugares que atraen viajes. Lugares que estén más lejos, requerirán mayor gasto y tiempo. Usualmente se usan funciones de impedancia, similares a las vistas al inicio de este capítulo, en las cuales se castigan los destinos alejados y se premian los destinos cercanos. La decisión es un *trade-off* entre el beneficio que recibirá en el destino y esos costos asociados al viaje. Además, destinos que estén muy distantes, serán descartados, porque una persona tampoco tiene disponibles la mitad de las horas del día para viajar todos los días al trabajo. Las personas requieren dedicar tiempo para dormir, para actividades de mantenimiento (comer, lavar la ropa), para trabajar, para socializar, para recrearse, para actividades espirituales, e incluso, para no

hacer nada. En la Figura 1-4 se pueden ver los períodos de tiempo dedicados a los viajes.

Figura 1-4. Línea del tiempo a partir de la tabla Tabla 1-4



Los viajes al trabajo y estudio, la ser recurrentes tienen un gran impacto en la calidad de vida. Vivir cerca al trabajo le ahora a las personas horas de tiempo que pueden ser dedicadas a otras actividades. Para aquellos cuyo ingreso es suficiente, tienen la posibilidad de escoger el lugar de la vivienda, en donde vivir cerca del colegio de los hijos o vivir cerca al trabajo es un criterio. Sin embargo, muchas personas no pueden hacer eso, lo que las condenada a viajes largos.

1.3.4. En qué viajar

La decisión de "en qué viajar" hace referencia a la selección del modo de transporte. Esta decisión es, de lejos, la más compleja y la que más ha sido estudiada en la literatura. El punto de partida es conocer la **disponibilidad de las alternativas** de viaje. Para opciones de transporte privado como el automóvil, la moto o la bicicleta, para considerar que está disponible se requiere disponibilidad del vehículo (o tener acceso), tener la licencia, si se necesita y tener las capacidades físicas o cognitivas para hacerlo. Además, se deben tener en cuenta que haya estacionamiento. En el caso de transporte público, es un poco más complicado, ya que, para que se considere que una alternativa del transporte público está disponible, se deben cumplir cuatro condiciones. Si alguna no se cumple, se considera que la alternativa de viaje **no** estará disponible. Las cuatro condiciones son:

- **Disponibilidad de información.** Pueden existir servicios que pasa a una cuadra de la casa, pero si la persona no sabe que existe, o no sabe a qué horas pasa, no lo puede considerar.

- **Disponibilidad en el origen.** Si la parada está lo suficientemente cerca del lugar de origen para acceder caminando o que haya opciones para acceder:

- **Disponibilidad en el destino**. Si la parada está los suficientemente cerca al lugar del destino para acceder caminando o acceder con otra opción.

- **Disponibilidad temporal.** La gran mayoría de los sistemas de transporte no opera las 24 horas. El viaje se debe realizar dentro de la ventana de operación.

De manera simplificada, esta decisión está fuertemente influenciada por el costo y el tiempo de viaje de cada una de las alternativas. Estos dos factores están muy ligados entre sí, ya que viajar más rápido es siempre más caro y, además, las personas de mayor ingreso valoran más su tiempo. Por el contrario, las personas con menor ingreso usualmente pueden/prefieren gastar menos dinero, por lo que tienen menos alternativas, que por lo general son las más lentas, implicando que requieran gastar más tiempo. De acá se concluye que el ingreso individual o del hogar es una variable muy importante a la hora de explicar y poder conocer las decisiones de viaje. Sin embargo, hay muchos otros factores asociados con esas decisiones como el hábito, las actitudes, la conveniencia del momento (cuando llueve o cuando se tiene prisa por llegar), el gusto, las preferencias o la seguridad.

1.3.5. Por dónde viajar

Esta es la última de las decisiones de la Tabla 1-2. y se hace cuando ya se tiene escogido el destino y el modo. La decisión de la ruta por donde viajar es más simple, porque en casi todos los modos, el viajero quiere llegar lo más rápido posible, por lo que el criterio es minimizar los tiempos de viaje. Pero como varios usuarios en la misma ruta están buscando lo mismo, las rutas se pueden llegar a congestionar, generando que otra ruta fuera la más rápida. Al final se tiene un equilibrio de diferentes alternativas. Un ejemplo en el cual el criterio de decisión no es el de minimizar el tiempo de viaje es el de las rutas de ciclistas, donde, en muchos casos, las personas prefieren tomar una ruta un poco más larga para evitar pendientes o para calles con mucho tráfico. En el capítulo del modelo de 4-pasos se revisan los modelos matemáticos para estas decisiones.

1.4. Los costos del transporte

Basso et al. (2011) nos recuerdan que hay tres grandes costos cuando se considera el transporte: primero, los costos de la infraestructura necesaria para el transporte; segundo, los costos de operación como el combustible y demás costos para el viajero como el tiempo, tarifas, peajes y la incomodidad; tercero, los costos externos, que no son fácilmente monetizables, pero que afectan a la sociedad como un todo. Ejemplos de costos externos son la polución, el cambio climático, la congestión y la siniestralidad vial. Sobre los segundos, Papacostas & Prevedouros (2000) hablan de que los sistemas de transportes permiten a las personas y los bienes superar la "fricción" del espacio geográfico. Esa fricción hace referencia a que la actividad de movimiento en el espacio tiene costos.

En todas las decisiones asociadas a viajar presentadas en la sección anterior están presentes las distancias, los tiempos y los costos monetarios. Es común que se consideren los costos de operación y los costos al usuario en una sola entidad, llamada función de costo generalizado. El **costo generalizado** es típicamente una combinación lineal de los atributos del viaje, como los costos y los tiempos, ponderados por coeficientes que representan la importancia relativa frente a los otros atributos y que consideran además la conversión apropiada de dimensiones para que sean sumados (tiempo o dinero) (Ortúzar & Willumsen, 2008). Una representación posible para los costos de alternativas de transporte público es:

$$C_{ij}^{PuT} = \sum_e a_e t_{ij} + a_n \tau_{ij} + \delta \quad (4)$$

Y respectivamente para transporte privado es:

$$C_{ij}^{PrT} = \sum_e a_e t_{ij} + a_n \sum_n o_{ij} + \delta \quad (5)$$

Donde:

C_{ij}^{PuT}: costo generalizado para un viaje en transporte público entre *i* y *j*

C_{ij}^{PrT}: costo generalizado para un viaje en transporte privado entre *i* y *j*

τ_{ij}^{U}: tiempo de viaje entre *i* y *j* de las diferentes etapas (*e*) como ingreso, espera, en vehículo y egreso

a_e: pesos que se le asignan a cada etapa (*e*) del viaje, que son diferentes para cada etapa

τ_{ij}: valor monetario de la tarifa que paga el usuario entre *i* y *j* (puede ser plana, o en función de la distancia)

a_n coeficiente de ponderación -conversión

o_{ij} cargo monetario asociado con los costos de operar un vehículo como el combustible, el estacionamiento, llantas, el aceite, los impuestos y los seguros etc.);

δ: penalidad de cada modo, que representa todos los atributos no incluidos en la medida generalizada (seguridad, confort, etc.)

Una precisión importante de los sistemas de transporte público *(*PuT*)* es que, aunque la tarifa pagada por el usuario es el insumo con el cual los viajeros toman las decisiones de viaje, esa la tarifa que paga el usuario τ_{ij}^{U} no siempre es suficiente para pagar los costos totales de operación *(CTO)* del sistema. De ahí emerge el concepto de **tarifa técnica** $\left(\tau_{ij}^{T}\right)$, que corresponde al costo real promedio de un viaje (Martínez Cajas, 2018), es decir los costos totales de operar el sistema *(CTO)* dividido entre la demanda o el número total de usuarios en el sistema *(D)*:

$$\tau_{ij}^{T} = \frac{CTO}{D} \tag{6}$$

El costo total de operar el sistema incluye los costos de comprar los vehículos, de personal, de energía (combustible), de mantenimiento, de administración, de capital, de recaudo, de tecnología y demás requerido. Nótese que, en los sistemas de transporte, la infraestructura frecuentemente se considera como una inversión, no como un costo, debido a que generalmente es financiada con recursos públicos, y por eso no hace parte del costo de operación.

Se tiene, en general, que si la diferencia entre la tarifa pagada por el usuario menos la tarifa técnica es positiva ($\Lambda>0$) se llama ganancia monetaria (*profit* en inglés), y si la diferencia es negativa ($\Lambda<0$) se llama subsidio. Se tiene la expresión general:

$$\tau_{ij}^{U} - \tau_{ij}^{T} = \Lambda \tag{7}$$

En sistemas de transporte que son para negocio, como las aerolíneas, la tarifa al usuario tiene que ser mayor que la tarifa técnica (diferencia positiva), situación en la cual las aerolíneas definen sus precios basados en la competencia, la eficiencia y los servicios ofrecidos. En sistemas de transporte público urbano, como metros, buses o tranvías, muy rara vez dan ganancia, y, por el contrario, en su gran mayoría son subsidiados. La razón es que la tarifa es regulada para mantenerla en niveles bajos y que así sea asequible para poblaciones de todos los ingresos.

Finalmente, los costos externos son costos asociados al viaje, que el viajero no los tiene en cuenta conscientemente, pero que alguien está pagando. La actividad de viajar genera muchas **externalidades**, que son efectos secundarios que afectan a terceros que no se benefician de la actividad. Ejemplos de externalidades negativas en el transporte son, por ejemplo, los siniestros viajes que sega muchas vidas y genera cuantiosos daños, la polución del aire que genera cientos de muertes por enfermedad respiratoria, el daño ambiental que implica gastos en mitigación y adaptación (como el cambio climático), entre otros. Como sociedad, todos los que pagan impuestos, independientemente si viajan o no, están pagando las externalidades de esos viajes. Si se suman los costos privados y los costos externos se obtienen los costos sociales.

$$CM_s = CM_p + CM_E$$

En economía, el hecho de que quien se esté beneficiando de la actividad, en este caso el viajero, no esté considerando todos los costos, se llama un fallo de mercado. En este caso, se requiere la intervención de los gobiernos para lidiar con las externalidades. La manera más común es incluir un impuesto en la actividad (conocido como impuesto Pigouviano) que permita que el viajero que causa las externalidades compense a la sociedad por esos costos no pagados.

1.5. Retos, paradigmas y futuro del transporte

1.5.1. La situación actual del calentamiento global

El cambio climático, la escasez de energía, la calidad de vida, entre muchos otros, hacen parte de los llamados **asuntos críticos contemporáneos** (ACC). Las ACCe son problemáticas multidimensionales muy complejas que generan impactos negativos en la condición humana y en el planeta (Sussman, J. et. al, 2014), y que requieren de la integración de la esfera política, ambiental, tecnológica y social para analizarlos y abordarlos. De ahí se derivan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dentro de los cuales varios se asocian con el transporte, el ODS 11 "Ciudades y Comunidades Sostenibles" que establece específicamente en su Meta 11.2 el acceso universal a sistemas de transporte seguros y sostenibles para 2030. Adicionalmente, el transporte contribuye transversalmente al ODS 3 "Salud y Bienestar", ODS 7 "Energía Asequible y No Contaminante", ODS 9 "Industria, Innovación e Infraestructura" y ODS 13 "Acción por el Clima".

La **sostenibilidad** es un concepto relativamente reciente. A pesar de que desde 1972, el Reporte del Club de Roma mostró que un comportamiento tendencial llevaría a daños en el ambiente, agotamiento de recursos y acumulación de polución, fue solo hasta 1987, cuando la Comisión Brundtland de las Naciones Unidas (Our Common Future), definió la sostenibilidad como lo que permite "satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias" (Burton, 1987).

Mitigar o reducir los problemas derivados de la actividad del transporte es un tema prioritario en las agendas de las naciones, pero solo desde hace relativamente poco. Después de este reporte se ha avanzado en desarrollar acuerdos multinacionales a nivel global, como el protocolo de Kyoto (1997) y el Acuerdo de París (2015). Con el fin de acelerar el cambio hacia la sostenibilidad de los países, en 2015 el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de la Organización de Naciones Unidas (ONU) definió los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En la COP21, 119 de 147 Partes (representando un 86% de las emisiones globales) se comprometieron a Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) del Acuerdo de París 2015 y la COP21–Transición energética como fundamento para la adopción del Acuerdo de París en diciembre de 2015.

1.5.2. Los sistemas de transporte en la actualidad

La filosofía tradicional de predecir y proveer (*predict and provide*), se llegaría a que se hicieran más y más autovías para carros, lo cual es contrario a la sostenibilidad.

La actividad de transporte, tal y como es hoy en día, es decir basada en movilidad motorizada ineficiente y mayoritariamente basada en combustibles fósiles, no es sostenible.

Los altos niveles de siniestralidad, de inequidad y de ineficiencia en el transporte en la actualidad, especialmente a nivel urbano, se asocian directamente con el **uso generalizado del automóvil** (y recientemente de la motocicleta). Si bien, se espera que con la llegada de automóviles eléctricos y con más altos niveles de autonomía se reduzcan las emisiones y los siniestros viales, aún faltan varias décadas para que se adopten masivamente en el mundo.

1.6. Las problemáticas del transporte

Al unir las externalidades y los asuntos críticos contemporáneos, se gravita hacia seis grandes problemáticas que se derivan de la actividad del transporte. En todo el mundo, anualmente, mueren cerca de 1.35 millones de personas en siniestros (World Health Organization, 2020). En 2020, un 20% de las emisiones de CO_2 venían del transporte (Ritchie, 2020). Las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero generarán un daño ambiental, especialmente por el calentamiento global y el cambio climático. Además, sin sonrojarnos, nos estamos gastando el petróleo de las generaciones futuras de manera desaforada. Esto sin hablar de los problemas de salud que se derivan de la mala calidad del aire por las emisiones del transporte, que son especialmente críticos en niños y adultos mayores. Finalmente, la movilidad como es hoy en día, en todo el mundo, fomenta sociedades menos incluyentes, menos equitativas, más segregadas y desiguales. Las problemáticas de la actividad del transporte se resumen en:

Figura 1-5. Problemáticas asociadas a la actividad del transporte



1.7. Transporte sostenible

Al igual que el concepto de desarrollo sostenible, el **transporte sostenible** es un concepto multidimensional que considera, no solo el ambiente, sino que también considera la economía y la sociedad. Es decir, el concepto no solamente