

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



La infraestructura ciclista como agente de cambio en la calidad del aire de la Ciudad de México

Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil

Presenta:

Nemian Emiliano Sosa Oseguera

Director de tesis:

M. en I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

Ciudad de México

Febrero 2016

Dedicatorias:

A mi madre, Marisa, por enseñarme que, sin importar lo que decida hacer, lo debo hacer bien y sin miedo a equivocarme.

A mi padre, Raúl, quien me mostró que con esfuerzo y responsabilidad puedo alcanzar los objetivos que me proponga.

A toda mi familia por acompañarme incondicionalmente durante toda mi vida.

A todos mis amigos por hacerme la persona que soy hoy y por las grandes experiencias que compartimos juntos.

Agradecimientos:

A Manuel Uribe, por darme la oportunidad de demostrar mis capacidades y por motivarme a terminar este ciclo.

Quiero agradecer en especial a Rodrigo por su paciencia y dedicación para permitirme lograr este objetivo y, por su compromiso con la Facultad de Ingeniería para seguir formando personas íntegras que enorgullecen a la Universidad.

Índice

Introducción.....	3
Objetivo	6
1. Antecedentes	7
2. Impactos de la contaminación sobre la salud de la población.....	11
2.1 Efectos de las partículas PM ₁₀ y PM _{2.5} sobre la salud	12
2.2 Efectos del ozono sobre la salud	15
2.3 Efectos del monóxido de carbono sobre la salud	16
2.4 Efectos del dióxido de nitrógeno sobre la salud	17
2.5 Efectos del dióxido de azufre sobre la salud	17
2.6 Efectos de los compuestos orgánicos volátiles sobre la salud	17
2.7 Normatividad en México y en el mundo.....	18
3. Inventario de emisiones en la ZMVM	20
3.1 Factores que afectan la calidad del aire de la ZMVM.....	20
3.2 Consumo energético.....	20
3.3 Solventes.....	21
3.4 Actividades industriales en la ZMVM	22
3.5 Transporte y Movilidad	23
3.6 Emisiones por tipo de fuente y categoría.....	26
3.7 Análisis desagregado de las emisiones	30
3.8 Índice de calidad del aire	41
4. Infraestructura ciclista como alternativa de solución.....	46
4.1 Ventajas sociales y ambientales de utilizar la bicicleta	46
5. Principios básicos de la infraestructura ciclista	53
5.1 Requisitos para una infraestructura ciclo-incluyente.....	54
5.2 Tipos de bicicletas utilizadas en México	56
5.3 Diseño geométrico.....	63
6. Casos de estudio en el mundo y en la Ciudad de México	92
6.1 Casos de estudio en el mundo	92
6.2 Infraestructura ciclista en la Ciudad de México	96
7. Propuestas de nuevas rutas ciclistas en la Ciudad de México	109

7.1 Propuesta Carril bus-bici en Eje 8 Sur.....	109
7.2 Propuesta de carril ciclista en Av. Insurgentes (Vía con sistema de autobuses de tránsito rápido Metrobús)	113
7.3 Extensión de Ciclovía Segregada sobre Av. Paseo de la Reforma.....	116
7.4 Ciclovía sobre Eje 2 Poniente (Gabriel Mancera)	118
7.5 Ventajas ambientales de las propuestas presentadas	120
Conclusiones y Recomendaciones.....	124
Bibliografía.....	126

Introducción

La movilidad en una ciudad está estrechamente ligada con el medio ambiente de la misma, en específico, con la calidad del aire que respirarán sus habitantes. Sin embargo, una estrategia de movilidad que ayude a disminuir la cantidad de contaminantes emitidos por las unidades de transporte no sólo representa beneficios ambientales, éstos alcanzan a factores sociales y económicos que mejoran la calidad de vida en general. En la actualidad, los proyectos de movilidad urbana y rural deben de buscar cumplir con los requisitos que demanda el desarrollo sustentable y priorizar la infraestructura de acuerdo a los usuarios más vulnerables. La planeación de un proyecto de movilidad debe estar plenamente justificado en el ámbito social y ambiental así como demostrar que más que promover la oferta de espacio para circular, promueva la disminución de la demanda de espacio mediante el uso del transporte público masivo o de vehículos de transporte más pequeños como la bicicleta.

Abordando el tema específico de la movilidad urbana en bicicleta, conviene tener en mente que, por cada km recorrido en bicicleta se evita la emisión de 0.3 kg de CO₂ proveniente de un auto promedio, además de que la fabricación de una bicicleta disminuye en 981,000 los litros de agua utilizados (Bicycle Federation of Australia, 2007). A estos beneficios materiales, hay que añadirle los beneficios sociales que implica el uso de la bicicleta para la salud de las personas, por mencionar algunos, mejora la capacidad pulmonar, reduce niveles de colesterol en la sangre, reduce el riesgo de sufrir sobrepeso, etc.

Este trabajo obtuvo una importante parte de la información del Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP por sus siglas en inglés), el cual es un organismo sin fines de lucro que promueve el transporte sustentable y equitativo. Los estudios que ha realizado en numerosas ciudades del mundo muestran una nueva visión de lo que deben ser las estrategias de movilidad en las ciudades actuales, donde el principal problema son los privilegios de espacio e infraestructura que se le otorgan a los automóviles particulares, provocando mayores congestionamientos, mayores distancias de desplazamiento y un encarecimiento en el espacio de las ciudades.

La urgencia que se tiene por mejorar la movilidad radica en que en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) circulan diariamente 5.5 millones de autos, cantidad que se prevé que llegará a 7.5 millones en 2020 si la cantidad de nuevos autos que se integran cada año al parque vehicular sigue la tendencia de las últimas décadas. Por otro lado, se estima que en la ZMVM la contaminación causa aproximadamente 1,723 muertes prematuras, 4248 hospitalizaciones y 234,209 consultas médicas (CNN México, 2014).

Haciendo referencia al trabajo aquí presentado, en Capítulo 1 "Antecedentes" se explican las causas que llevaron a la caótica situación del transporte en la ciudad y que, sumado a las condiciones geográficas del terreno, han provocado el rápido deterioro de la calidad del aire y con ello de la productividad y salud de sus habitantes.

En el Capítulo 2 “Impactos de la contaminación sobre la salud de la población” se aborda un tema de suma importancia y que fue la razón por la que se pensó en este trabajo, las consecuencias que tiene una mala calidad del aire para aquellos que los respiran. A pesar de que los efectos dependen de la condición de cada individuo, se pueden enlistar varias repercusiones que afectan a grupos importantes de la población. También se mencionan los valores límites de exposición que recomienda la Organización Mundial de la Salud para que, posteriormente, sea clara la comparación con los valores que se presentan en la ZMVM.

Más adelante, en el Capítulo 3 “Inventario de emisiones en la ZMVM” se realiza un análisis de la condición actual de la calidad del aire en la ZMVM, identificando las principales fuentes de emisión de contaminantes y por ende, las categorías en las que se debe poner especial atención si se quiere disminuir la contaminación. Además se explica cómo se genera el índice de calidad del aire y los límites que ha establecido el Gobierno de la Ciudad de México para los distintos tipos de contaminantes, información que le sirve al gobierno para determinar si existe peligrosidad de que los ciudadanos realicen actividades al aire libre.

El Capítulo 4 “Infraestructura ciclista como alternativa de solución”, se explican los elementos que sirven de sustento para que, desde el punto de vista ingenieril, se considere al mejoramiento de la infraestructura para viajar en bicicleta como parte de una solución que permita mejorar la calidad del aire. En este capítulo se exponen claramente las ventajas sociales y ambientales de utilizar la bicicleta que benefician a nivel individual y colectivo. Además, se toma como ejemplo local, la implementación del programa de bicicletas públicas ECOBICI y los resultados que arrojan a nivel ambiental

Una vez justificadas las razones que convierten a la infraestructura ciclista como un potencial pilar en una mejor movilidad y calidad del aire de la ciudad, el trabajo se adentra en la ingeniería de la infraestructura ciclista en el Capítulo 5 “Principios básicos de la infraestructura ciclista”. En este capítulo se explica la ingeniería de la infraestructura ciclista de acuerdo a las condiciones físicas del espacio a intervenir y a la demanda de usuarios. Además se muestran las condiciones que debe cumplir la infraestructura ciclista para que pueda ser usada adecuadamente y evitar en la medida de lo posible los conflictos con otros medios de transporte.

El Capítulo 6 “Casos de estudio en el mundo y en la Ciudad de México”, se investigaron las ciudades más representativas donde la infraestructura ciclista ha sido bien implementada de tal forma que ha permitido cambiar la manera de transportarse para una gran parte de sus habitantes. Después de mostrar las maneras correctas de implementar políticas de movilidad ciclistas, con fines comparativos, se explican los aciertos y errores de las principales vías ciclistas en la Ciudad de México así como de otro tipo de infraestructura vial y el programa de bicicletas públicas ECOBICI.

Por último y, como muestra del potencial que tiene la Ciudad de México para mejorar la oferta de infraestructura ciclista, en el Capítulo 7 “Propuestas de rutas ciclistas en la Ciudad de México”, se proponen cuatro vialidades que presentan condiciones ideales

para que de manera muy sencilla se pueda implementar infraestructura ciclista que permita a los usuarios transitar seguros y que, al tratarse de vialidades primarias, conectan puntos de origen y destino con mucha demanda. Como cierre del capítulo y, como una justificación del trabajo en general, se muestran los beneficios ambientales que significarían la implementación de alguna o todas las propuestas.

Objetivo

El principal objetivo de este trabajo es, proponer parte de una solución integral que permita a los habitantes de la Ciudad de México, mejorar su calidad de vida y, en este caso en particular, mejorar la calidad de aire mediante el mejoramiento de las opciones para desplazarse utilizando la bicicleta.

1. Antecedentes

La mayoría de los problemas que enfrenta la Ciudad de México en materia de infraestructura y de servicios públicos, son consecuencia del crecimiento caótico y la mala o nula planeación para el mismo. La ocupación masiva de la ciudad inició hace más de cinco décadas por la centralización de oficinas gubernamentales, y por ende, del capital y las fuentes de empleo. Pronto la mancha urbana rebasó los límites administrativos de lo que conocemos como el Distrito Federal y se mezcló con 59 municipios aledaños del Estado de México y uno del Estado de Hidalgo (Tizayuca) para formar la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Figura 1.1). A pesar de que administrativamente son tres entidades distintas, al momento de realizar análisis de problemas urbanos, conviene considerar a todos los elementos de la ZMVM, pues la población viaja muy frecuentemente de una entidad a otra y demanda los mismos servicios públicos.

Figura 1.1 Imagen satelital de la Zona Metropolitana del Valle de México. (Google earth, 2015)



Para poder entender la magnitud del crecimiento de la ZMVM cabe mencionar que tan solo de 1950 al año 2000 la población pasó de 2 millones 953 mil habitantes a 18 millones 210 mil (Gobierno de la Ciudad de México, 2015). Además, la ocupación del territorio pasó de 22 mil 960 hectáreas a más de 741,000 hectáreas.

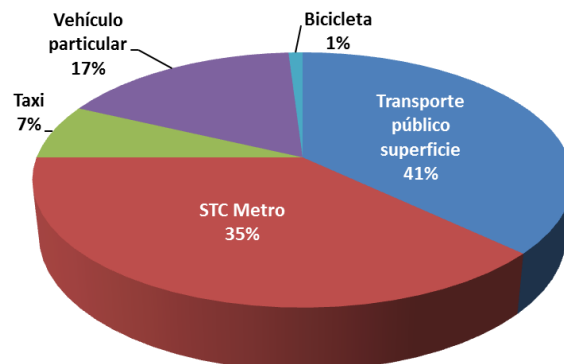
En las últimas décadas y derivado principalmente de los altos costos del uso de suelo en las delegaciones centrales del Distrito Federal, se ha vivido un fenómeno de migración hacia las delegaciones ubicadas en el poniente oriente y sur, así como hacia los municipios del Estado de México, en especial aquellos ubicados al oriente del Distrito Federal. Esto provocó que los viajes metropolitanos, es decir, aquellos que cruzan el límite

entre del D.F. y el Estado de México, aumentaran en una década del 17% al 22%. Se estima que para el 2020 el número de viajes de este tipo alcanzará los 5.6 millones de viajes (Gobierno de la Ciudad de México, 2015). Como consecuencia de esta distribución, actualmente se observa la configuración de polos de atracción y generación de viajes, principalmente los corredores Norte – Sur y Poniente – Oriente, en los cuales la población se ve obligada a cruzar gran parte de la ciudad para llegar a sus escuelas o lugares de trabajo.

Es evidente que, a pesar de la creciente demanda por medios y vías de transporte en la ZMVM, los programas de infraestructura no han estado a la altura de la complejidad de la zona y por lo tanto los congestionamientos viales son cada vez más comunes y cada vez se requiere más tiempo para realizar los traslados cotidianos. Adicionalmente, la construcción de infraestructura e inversión en el transporte público no han sido coherentes con la evolución de las formas de transportarse; entre el año 1986 y el 2000 el porcentaje del número de viajes realizados por vehículos privados se redujo de 25% a 16%, esto a pesar de que el parque vehicular aumentó en cerca de 500,000 unidades. El porcentaje de viajes en metro también disminuyó de 19% a 14%, mientras que el transporte público de superficie aumentó de 56% a 70% convirtiéndose en la base sustancial de la forma de transportarse utilizada por la población. Sin embargo, a pesar de ser claramente el tipo de transporte más demandado, la oferta la ofrecen principalmente rutas unidades de mediana y baja capacidad como los son los microbuses y las vagonetas, provocando saturación en el servicio, grandes tiempos de traslado y contaminación sonora y atmosférica.

En la actualidad, la distribución de los usuarios de acuerdo al tipo de transporte que usan con mayor frecuencia se presenta en la Figura 1.2. Obsérvese que sigue predominando el uso del transporte público de superficie, seguido por el Servicio de Transporte Colectivo Metro. Se hizo una categoría especial para los taxis ya que utilizan la misma infraestructura que los vehículos particulares, por lo que, se puede afirmar que 24 % de los habitantes de la ciudad demandan infraestructura similar. Por último y como pilar de este trabajo, se aprecia que los viajes en bicicleta apenas figuran con el 1%, lo que queda aún muy lejos del 5% que se pretende alcanzar a nivel mundial.

Figura 1.2 Distribución de los tipos de transporte utilizados en la Ciudad de México
(<http://www.parametria.com.mx/DetalleEstudio.php?E=4539>, 2013)



Uno de los muchos problemas específicos del transporte en la ciudad es la desintegración y mala distribución de la oferta. La red de transporte de alta capacidad, como lo es el metro, autobuses y trolebuses, debería ser la columna vertebral de la movilidad, sin embargo, debido al mal servicio, saturación y mal trazo de las líneas que ofrece esta red, son los servicios concesionados los que atraen al mayor número de usuarios, lo que ha generado un descontrol en las rutas que ofrecen estos servicios y en la infraestructura que utilizan para realizar sus bases. Esto se traduce en las grandes cantidades de tiempo que se debe invertir en los traslados cotidiano, que llegan a alcanzar las 17 millones de horas (Gobierno de la Ciudad de México, 2015).

Añadido a esto, la ZMVM, presenta la peculiaridad de que en su lado suroeste una cadena montañosa con una altitud promedio de 3,200 metros, la cual se comporta como una barrera natural que acumula los contaminantes que acarrear los vientos dominantes del Noreste. Lo anterior provocó que en la década de los noventa, la ZMVM se considerara como una de las áreas urbanas más contaminadas del mundo, donde el 88% de los días del año se rebasaba la norma de protección a la salud.

Actualmente la calidad del aire ha mejorado, pero sigue sin ser satisfactoria y suficiente para que los habitantes de la capital podamos estar tranquilos de que respiramos un aire limpio (Figura 1.3). Aunado a esto, la falsa sensación de mejoría se provocó por que los límites máximos de contaminantes en el ambiente antes de declarar precontingencia son mayores a los de los países desarrollados, por ejemplo, en París se declara precontingencia si las partículas contaminantes rebasan $50 \mu/m^3$, mientras que el D.F. declara precontingencia si las partículas contaminantes rebasan los $214 \mu/m^3$ (Delgado,

Figura 1.3 Contaminación del aire en la ZMVM
(www.lahistorialaescibestu.mx, 2015)



2015). Aún con la diferencia tan grande que hay en estos límites en 2014 se registraron 3 episodios de precontingencia en la ZMVM. Las autoridades argumentan que esta diferencia es por las condiciones particulares de la ZMVM y pretender ir disminuyendo este umbral paulatinamente, pero esto provocó que la sociedad y autoridades le han dejado de prestar la atención necesaria a este tema, pues se estima que el costo anual de la contaminación del aire es de \$ 1,361,498,319 (Delgado, 2015).

Otras cifras relevantes en cuestión de movilidad se enlistan a continuación (Delgado, 2015):

- El 80% de la contaminación auditiva es causado por los coches.
- Se estima que las pérdidas anuales por congestiónamiento vial en todo el país ascienden a 200 mil millones de pesos.

- En el D.F. una persona tarda en promedio una hora en trasladarse de su hogar al lugar donde trabaja.

Al igual que en muchas ciudades en el mundo, en la Ciudad de México se ha tratado de impulsar el uso de la bicicleta para disminuir los congestionamientos y mejorar la calidad de vida de los que la utilicen. Es notorio que, la bicicleta hace más accesibles los espacios que ofrece la ciudad, ya que, si se implementa adecuadamente la infraestructura para este tipo de transporte, se puede crear una red de interconexión que permita a los usuarios cambiar cuantas veces quieran de tipo de transporte para llegar a sus destinos, reduciendo la dependencia del automóvil. Sin embargo, existe un gran número de retos por superar para considerar a esta ciudad como segura para utilizar la bicicleta. Los dos principales retos son la construcción de infraestructura ciclista de calidad y lograr que la bicicleta se convierta en un medio de transporte cotidiano para los habitantes.

2. Impactos de la contaminación sobre la salud de la población

La contaminación del aire representa un importante riesgo para la salud, como parte del contexto que permite ubicar adecuadamente el problema de la contaminación atmosférica, es conveniente mencionar algunos datos que la Organización Mundial de la Salud (OMS, WHO por sus siglas en inglés) obtiene y publica regularmente. Según estimaciones de 2012 de la OMS, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 3.7 millones de defunciones prematuras. Además, se estima que la contaminación del aire es responsable del 0.8% de los años de vida perdidos con gozo de plena salud. Destaca también, que el 88% de las defunciones prematuras se producen en países de ingresos bajos y medianos. Las Directrices de la OMS sobre Calidad del Aire¹ ofrecen una evaluación de los efectos sanitarios provocados por la contaminación del aire, así como de los niveles de contaminación perjudiciales para la salud (OMS, 2014).

Las políticas e inversiones a medios de transporte menos contaminantes, así como viviendas energéticamente eficientes, generación de electricidad a base de recursos no contaminantes y un mejor manejo y disposición de residuos industriales y municipales son los pilares de la solución a este enorme problema global.

En el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), es importante tomar en cuenta que las tendencias de la mayoría de los contaminantes que han sido monitoreados desde hace varios años muestran una tendencia a la baja, lo cual representa beneficios importantes a la población. Sin embargo se siguen presentando altos costos en salud. Es por esto que, los gobiernos que integran la Comisión Ambiental Metropolitana (Gobierno Federal, Gobierno de la Ciudad de México y Gobierno del Estado de México), han elaborado periódicamente el documento Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, el cual es un análisis que integra a las variables que influyen en la calidad del aire de la ZMVM, su evolución durante las últimas décadas y la propuesta de diversas estrategias que permitan mejorar la calidad del aire y a su vez, que los resultados también propicien beneficios económicos y sociales a largo plazo.

Los contaminantes del aire tienen distinto potencial para producir daños sobre la salud humana, dependiendo del tipo de contaminante, de las propiedades físicas y químicas, de sus componentes, la frecuencia, duración de exposición y su concentración, entre otros factores. De manera general las afectaciones a la salud dependen fundamentalmente de dos factores:

- 1) La magnitud de la exposición
- 2) La vulnerabilidad de las personas expuestas

¹ Las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire publicadas en 2005 ofrecen orientaciones generales relativas a umbrales y límites para contaminantes atmosféricos que pueden provocar efectos negativos en la salud de las personas.

La magnitud de la exposición está en función de la concentración del contaminante en la atmósfera, de la duración de la exposición y de su frecuencia. La vulnerabilidad de las personas expuestas es significativamente diferente, algunos grupos de población son más sensibles o vulnerables que otros a la contaminación del aire, que obedece a factores como la genética, etnia, género y edad; y a factores adquiridos como las condiciones médicas, acceso a los servicios de salud y nutrición.

La exposición aguda se presenta a concentraciones elevadas de contaminantes en corto tiempo, que logran ocasionar daños sistémicos al cuerpo humano. Algunos estudios señalan un incremento en la mortalidad debido a complicaciones respiratorias relacionadas con la exposición a partículas de diámetro pequeño, ozono y sulfatos; otros estudios informan acerca de enfermedades cardiovasculares, lo cual se considera como un efecto indirecto de la contaminación. La exposición aguda también se relaciona con enfermedades de vías respiratorias superiores e inferiores: bronquitis, neumonía y tos, entre otras (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011).

Por otra parte, la exposición crónica implica concentraciones bajas de contaminantes en largos periodos. Esta exposición a pesar de que sea a niveles bajos, puede afectar a las personas con una predisposición genética o con algún problema de salud preexistente. Los efectos a la salud son similares a los mencionados por una exposición aguda.

Las exposiciones a la contaminación del aire durante el embarazo y durante los períodos tempranos de la vida se han asociado con nacimiento prematuro, retraso en el crecimiento intrauterino, bajo peso al nacer, síndrome de muerte temprana y mortalidad infantil.

Los síntomas por exposición a la contaminación del aire se manifiestan principalmente en la disminución de la capacidad respiratoria, incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias crónicas y agudas, aumento de ataques de asma e incremento de casos de enfermedades cardíacas.

En cuanto a la toxicidad de las partículas, ésta depende por un lado de su composición química, por lo tanto, de la fuente de emisión, y por otro, del tamaño, ya que éste determina qué tanto penetrarán al árbol bronquial.

2.1 Efectos de las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} sobre la salud

Las concentraciones de macropartículas se refieren a los finos sólidos suspendidos de menos de 10 micrones de diámetro (PM₁₀) capaces de penetrar en las vías respiratorias y de causar un gran daño a la salud (El Banco Mundial, 2014). Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados y material orgánico asociado a partículas de carbono.

La quema de combustibles fósiles en los automóviles y en la industria generan carbono negro, partículas ultrafinas y gases que se condensan en forma de partículas líquidas. Además, al circular, los vehículos provocan la resuspensión del polvo del suelo.

Las partículas más perjudiciales para la salud son las de 10 micrones de diámetro, o menos ($\leq PM_{10}$), que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones. La exposición crónica a las partículas agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neumopatías, así como cáncer de pulmón.

Generalmente, las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM_{10} por metro cúbico (m^3) de aire. Las mediciones sistemáticas de la calidad del aire describen esas concentraciones de PM expresadas en microgramos $\mu g/m^3$. Cuando se dispone de instrumentos de medición suficientemente sensibles, se notifican también las concentraciones de partículas finas ($PM_{2.5}$ o más pequeñas).

Valores fijados en las Directrices según la OMS (OMS, 2014)

PM_{2.5}

10 $\mu g/m^3$ de media anual

25 $\mu g/m^3$ de media en 24h

PM₁₀

20 $\mu g/m^3$ de media anual

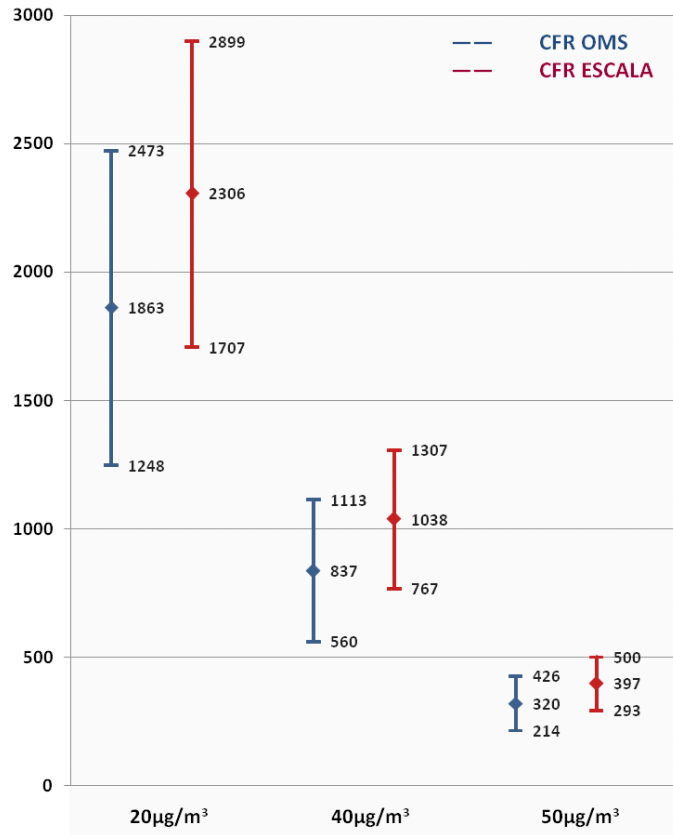
50 $\mu g/m^3$ de media en 24h

En las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire se estima que una reducción media anual de las concentraciones de partículas (PM_{10}) de 70 microgramos/ m^3 , común en muchas ciudades en desarrollo, a 20 microgramos/ m^3 , permitiría reducir el número de defunciones relacionadas con la contaminación en aproximadamente un 15%. Sin embargo, incluso en la Unión Europea, donde las concentraciones de PM de muchas ciudades cumplen los niveles fijados en las Directrices, se estima que la exposición a partículas derivados de la acción humana, reduce la esperanza media de vida en 8,6 meses.

En la Figura 2.1.1, se muestra la distribución de las concentraciones de PM_{10} en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la cual fue dividida en cinco zonas de estudio, destacándose la zona noreste por una concentración elevada, misma que va disminuyendo en dirección suroeste.

en las concentraciones de PM₁₀ en la ZMVM y usando funciones de concentración-respuesta estimadas de dos fuentes, las de la OMS y las del proyecto ESCALA³.

Figura 2.1.2. Muertes evitables por año (mortalidad total-corto plazo) bajo diferentes escenarios de concentración de PM10



(Riojas et al, 2009)

2.2 Efectos del ozono sobre la salud

El ozono a nivel del suelo, que no debe confundirse con la capa de ozono en la atmósfera superior, es uno de los principales componentes de la niebla tóxica. Éste se forma por la reacción con la luz solar (fotoquímica) de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) procedentes de las emisiones de vehículos o la industria y los compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por los vehículos, los disolventes y la industria. Los niveles de ozono más elevados se registran durante los períodos de tiempo soleado. El límite permisible es de 100 µg/m³ de media en 8h según la OMS (OMS, 2014)

³ *Estudio de Salud y Contaminación del Aire en Latinoamérica (ESCALA)*. Proyecto que incluye a la ZMVM y cuyo objetivo es examinar la asociación entre la exposición a la contaminación del aire exterior y algunas causas de mortalidad en las siguientes ciudades de América Latina: Zona Metropolitana del Valle de México, Monterrey y Toluca para el caso de México, Sao Paulo, Río de Janeiro y Porto Alegre en el caso de Brasil, y Santiago, Temuco y Concepción en el caso de Chile para el periodo 1997-2005.

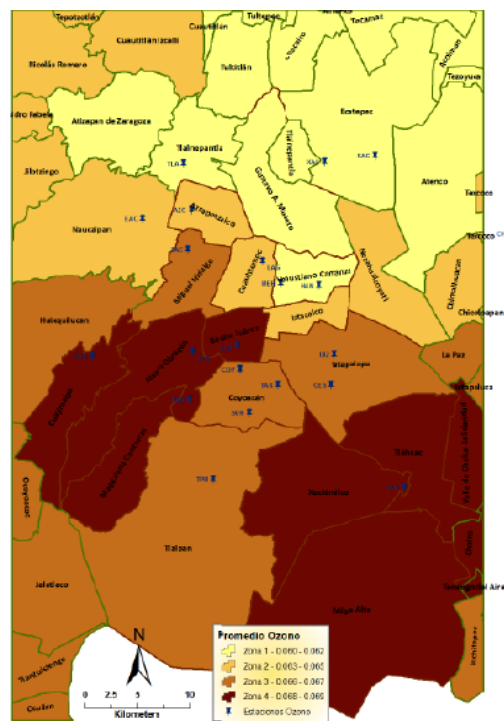
Una exposición crónica al ozono reduce la función pulmonar y provoca síntomas respiratorios como tos, flemas y sibilancias, los cuales, a pesar de que no se ha comprobado que provoquen el asma, sí hay pruebas de que la pueden agravar. Del mismo modo, empeoran los síntomas del enfisema e incluso el cáncer de pulmón (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011). Los estudios epidemiológicos realizados en la ZMVM (Figura 3) han encontrado evidencia que asocia al O_3 con un incremento en las tasas de mortalidad, en las visitas a salas de emergencia por asma y por infecciones respiratorias, así como en los síntomas de padecimientos de las vías respiratorias altas. (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011)

Además, el ozono también es responsable de ciertas complicaciones respiratorias en niños asmáticos y de la aparición de patrones de variabilidad en la frecuencia cardíaca en adultos mayores. Al igual que para PM_{10} el mayor número de muertes evitables se encuentra en el grupo de mayores de 65 años, para el cual conforme al estimador de ESCALA se evitarían en la ZMVM cerca de 300 muertes al año bajo el escenario de reducción a 50 ppb.

2.3 Efectos del monóxido de carbono sobre la salud

Los efectos agudos del CO reducen la disponibilidad de oxígeno y pueden afectar el funcionamiento de diferentes órganos, especialmente al cerebro y al corazón por ser más sensibles al oxígeno, lo cual provoca dificultades para concentrarse, bajos reflejos y confusión. (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011)

Figura 2.3.1 Distribución espacial de la concentración de ozono en la ZMVM, 2005



(Riojas et al, 2009)

2.4 Efectos del dióxido de nitrógeno sobre la salud

El NO₂ es un gas poco soluble, irritante y oxidante que puede alcanzar los bronquiolos y los alvéolos. Después de exposiciones a NO₂ se presentan síntomas como irritación de nariz y garganta, seguidos de bronco-constricción⁴ y disnea⁵, especialmente en individuos asmáticos y se incrementa la susceptibilidad a infecciones respiratorias. (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011)

Valores fijados en las Directrices de la OMS

NO₂

40 µg/m³ de media anual

200 µg/m³ de media en 1h

(OMS, 2014)

Las principales fuentes de emisiones antropogénicas de NO₂ son los procesos de combustión (calefacción, generación de electricidad y motores de vehículos y barcos.

2.5 Efectos del dióxido de azufre sobre la salud

Valores fijados en las Directrices de la OMS

SO₂

20 µg/m³ media en 24h

500 µg/m³ de media en 10 min

(OMS, 2014)

El SO₂ es un gas incoloro con un olor penetrante que se genera con la combustión de fósiles (carbón y petróleo) y la fundición de menas que contienen azufre. La principal fuente de actividad humana del SO₂ es la combustión de fósiles que contienen azufre usados para la calefacción doméstica, la generación de electricidad y los vehículos a motor. El ácido sulfúrico reacciona también con otros gases en la atmósfera, como el amonio, para formar partículas suspendidas.

La respuesta del organismo a concentraciones elevadas de SO₂ se manifiesta por síntomas como tos, irritación de nariz y garganta, seguidos de bronco-constricción y disnea. (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011)

2.6 Efectos de los compuestos orgánicos volátiles sobre la salud

En años recientes se han incrementado los estudios sobre las mezclas complejas de contaminantes atmosféricos, como por ejemplo los compuestos orgánicos volátiles. Los COVs son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental generando vapores, que además de su función como

⁴ Se denomina bronco-constricción al estrechamiento de las vías aéreas por la contracción del músculo que los rodea, llamado "músculo liso". (Kids Health, 1995)

⁵ La disnea se refiere a la dificultad respiratoria que se manifiesta como una sensación de falta de aire en los pulmones. (Enfemenino, 2015)

precursores de la formación de ozono y otros oxidantes son motivo de especial preocupación debido a la alta toxicidad de algunos de ellos en los seres humanos (Ciencia y Biología, 2014). Entre ellos, hay un grupo que en particular es de gran importancia por sus efectos tanto cancerígenos como no cancerígenos, formado por el benceno, el tolueno, el etil-benceno y el xileno. La exposición al benceno está asociada adicionalmente con efectos hematotóxicos no cancerígenos incluyendo anemia aplásica, así como efectos cancerígenos como leucemia mieloblástica aguda (El Banco Mundial, 2014).

El benceno es usado como materia prima en una gran cantidad de productos de uso diario como detergentes, pesticidas, lubricantes, fibras e incluso medicamentos (SEDEMA, 2014).

El tolueno se produce en la manufactura de gasolina y otros combustibles a partir del petróleo crudo. Las fuentes de emisión son el humo de los automóviles, algunos productos de limpieza, barniz para uñas y humo de tabaco. El tolueno puede afectar al sistema nervioso, producir cansancio, confusión, debilidad, náuseas, entre otros (SEDEMA, 2014).

El etilbenceno se utiliza en el proceso de fabricación del estireno y otros productos químicos, también forma parte de combustibles derivados del petróleo. Inhalar etilbenceno en niveles muy altos produce mareo, irritación de ojos y garganta (SEDEMA, 2014).

El xileno se produce a partir del petróleo y es nocivo ya que es un agente narcótico, en exposición alta puede ocasionar alteraciones en el sistema nervioso central, alteraciones en el equilibrio o confusión (SEDEMA, 2014).

2.7 Normatividad en México y en el mundo

En la tabla 2.7.1 se aprecia un cuadro comparativo entre las normas actuales que existen en México con otros criterios internacionales. Se puede observar que los límites permisibles en México son más altos que en los otros criterios.

Tabla 2.7.1 Normas, directivas y criterios de calidad del aire de México, de la Unión Europea y de los Estados Unidos de América, así como los valores guía sugeridos por la Organización Mundial de la Salud

Contaminante	Periodo promedio de exposición	Unidades	Valores límite						
			México			Unión Europea	US-EPA	EPA California	OMS
			NOM vigente	Exposición aguda (frecuencia máxima aceptable)	Exposición crónica (concentración y tiempo promedio)				
PST	24 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Modificación a la NOM-025-SSA-1993	210 (A)	-	-	-	-	-
PM10	Anual 24 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Modificación a la NOM-025-SSA-1993	120 (A)	50 (promedio aritmético/año)	40 50	- 150	20 50	20 50
PM2.5	Anual 24 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Modificación a la NOM-025-SSA-1993	65 (A)	15 (promedio aritmético/año)	25 40	15 35	12 35	10 25
O3	MDPM 8 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm	Modificación a la NOM-025-SSA-1993	157 (QMA)	-	120	147	137	100
	1 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm		0.08 216 (NVA) 0.11		0.06 - -	0.075 - -	0.07 180 0.09	0.05 - -
CO	MDPM 8 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm	NOM-021-SSA1-1993	12.6 (A)	-	10	10	10	-
	1 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm		11 - -		9 40 35	9 40 35	9 23 20	10 30 -
SO2	8 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm	NOM-022-SSA1-2010	524 (2A)	66 0.025 (promedio aritmético/año)	-	80	-	-
	24 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm		0.2 288 (A) 0.110		125 0.047	0.03 365 0.14	- 105 0.04	- 20 0.007
NO2	Anual 1 hr	($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm	NOM-023-SSA1-1993	-	-	40	100	57	40
		($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ppm		395 (A) 0.21		- 200 -	0.053 - -	0.030 339 0.18	- 200 -
Pb	-	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NOM-026-SSA1-1993	-	1.5 (promedio aritmético/trimestre)	0.5	1.5	1.5	0.5

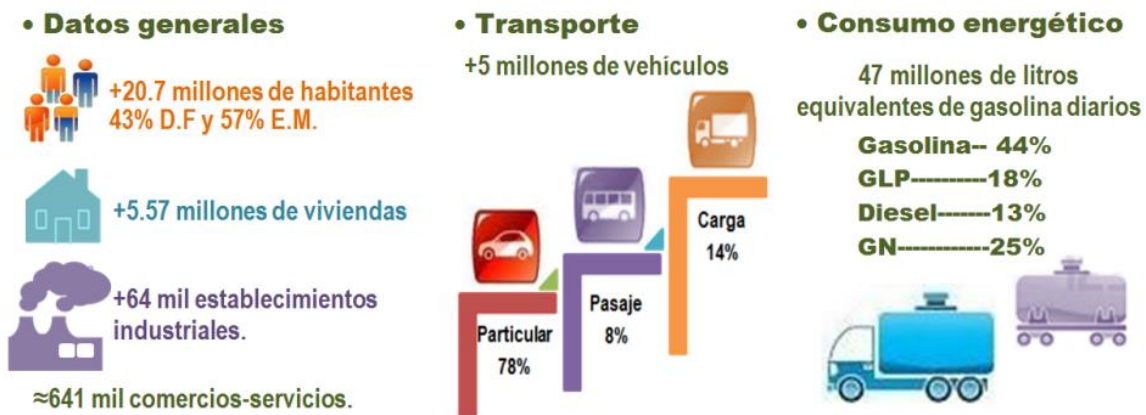
MDPM: máximo diario de promedios móviles; QMA: quinto máximo en un año; NVA: ninguna vez al año; A: una vez al año; 2A: dos veces al año. (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011)

3. Inventario de emisiones en la ZMVM

3.1 Factores que afectan la calidad del aire de la ZMVM

La calidad del aire de la ZMVM está determinada por el balance entre las emisiones contaminantes, generadas por los diferentes factores de presión (crecimiento poblacional, vehicular y de consumo energético) y la capacidad atmosférica de dicha zona para eliminar o reducir la carga de emisiones. La Ciudad de México había sido considerada a mediados de los años 70 como una de las ciudades más contaminadas del mundo. A finales de los años ochenta, todos los contaminantes monitoreados en la Ciudad rebasaban los criterios establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental para evaluar la calidad del aire. Desde hace algunos años, el plomo, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno cumplen con las concentraciones máximas permisibles establecidas en sus respectivas normas. Sin embargo, los niveles de ozono y partículas PM10 y PM2.5 rebasan con frecuencia el valor de la norma mexicana vigente.

Figura 3.1.1 Datos generales de la Zona Metropolitana del Valle de México (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



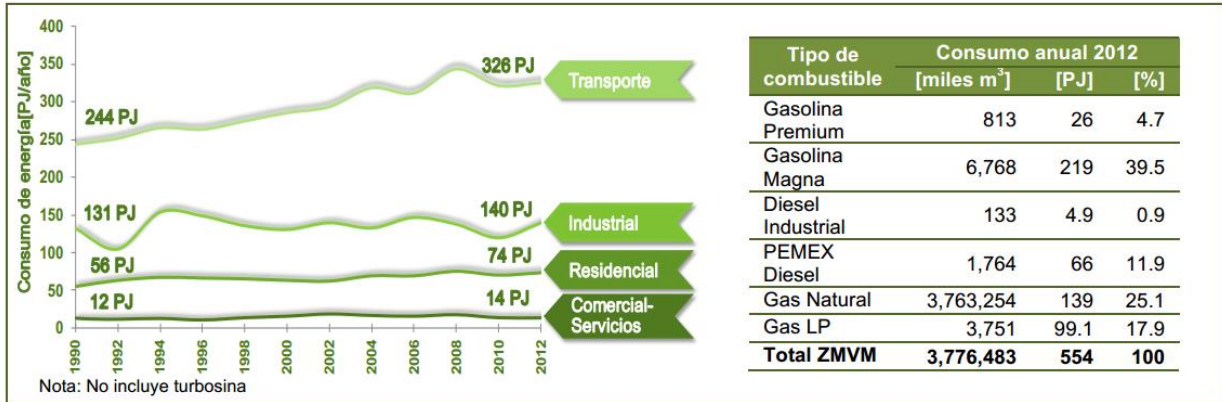
3.2 Consumo energético

En términos de contaminación atmosférica, la tendencia del consumo energético de combustibles fósiles, es un indicador del aporte de emisiones contaminantes y de efecto invernadero que ha tenido cada uno de los diferentes sectores, por ejemplo en la Figura 3.2.1 se puede observar que el sector transporte es el que siempre ha demandado un mayor consumo energético, por lo que se le asocia como un sector importante en la generación de emisiones. En las últimas dos décadas el consumo energético se ha incrementado un 25%, pasando de 443 Petajoules (PJ) en 1992 a 554 PJ en 2012, con una tasa promedio de crecimiento anual del 1.3%.

En el año 2012 se consumieron 554 Petajoules de energía, con un consumo per cápita por uso de combustibles de 27 Gigajoules, es decir que esto equivale a que anualmente cada

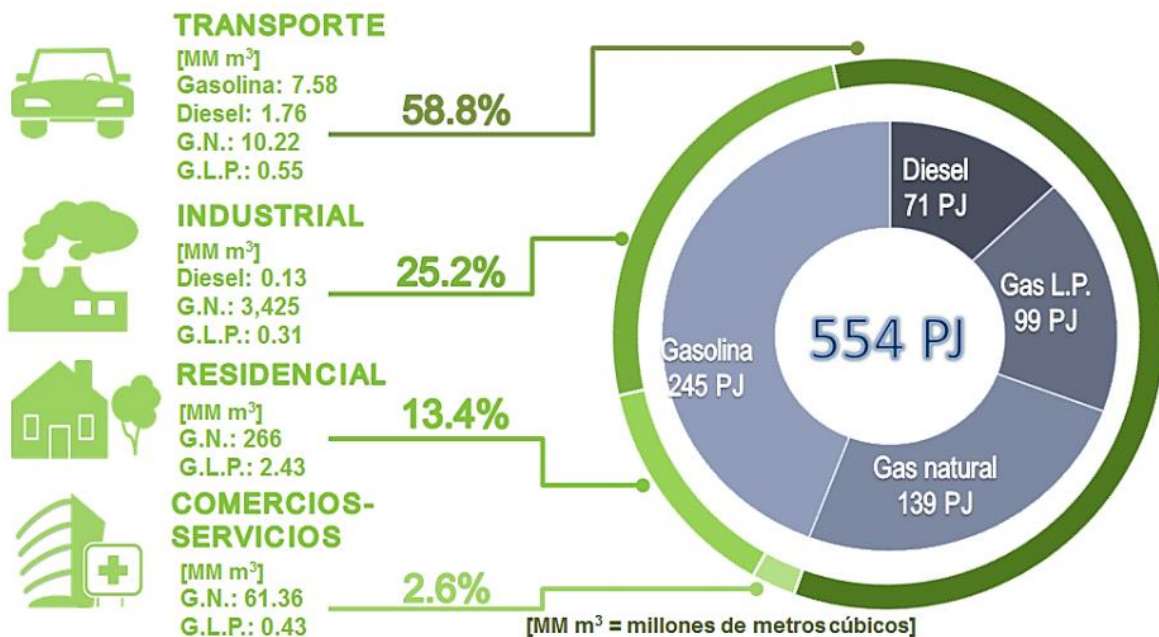
habitante de la Ciudad de México utilizó la energía proveniente de quemar 824 litros de gasolina.

Figura 3.2.1 Tendencia y consumo energético de la ZMVM hasta el 2012 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



En la figura 3.2.2 se presenta un desglose del consumo energético por sector y por tipo de combustible. Obsérvese que el sector más demandante es el del transporte lo que implica que la gasolina sea el combustible más consumido

Figura 3.2.2 Consumo energético por sector y combustible, ZMVM-2012 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



3.3 Solventes

La producción de ozono en la ZMVM está condicionada principalmente por los compuestos orgánicos volátiles (COV) que se emiten. Estos compuestos orgánicos se forman durante los procesos de combustión y por la evaporación del combustible, sin

embargo, también se generan en las actividades que utilizan solventes o productos que los contienen. De acuerdo con lo establecido en la NADF-011-AMBT-2007⁶, los solventes son compuestos orgánicos volátiles y son utilizados en todos los sectores económicos de nuestra metrópoli, ya sea de manera individual o en combinación con otras sustancias sin sufrir cambio químico, se usan para disolver materias primas, productos y materiales, también se utilizan como agentes de limpieza para disolver impurezas, como medios de dispersión o modificadores de la viscosidad, como tensoactivos, plastificantes y protectores, entre otros. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013). De acuerdo a la Figura 3.3.1 el mayor consumo de solventes tiene por objeto la elaboración de algún producto, por lo que se puede inferir que el sector industrial es la principal fuente de contaminación por el uso de solventes.

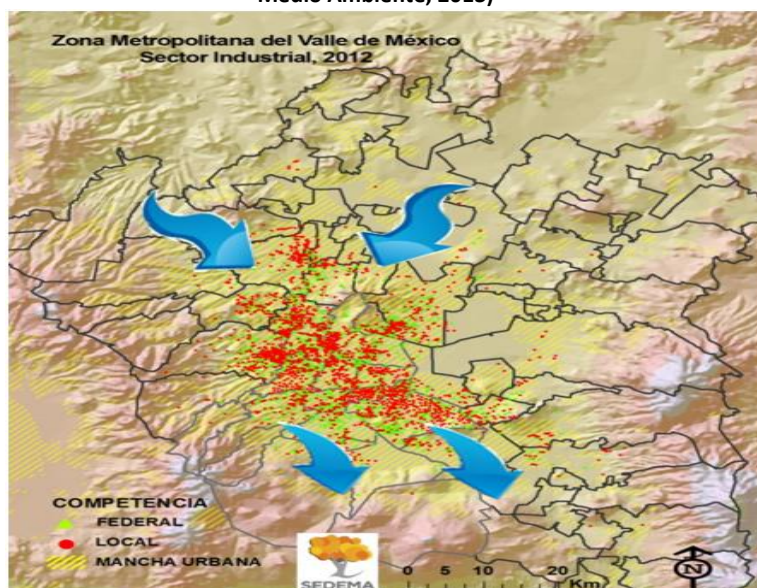
Figura 3.3.1 Consumo de solventes en la ZMVM, 2012 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



3.4 Actividades industriales en la ZMVM

De acuerdo al Sistema de Consulta de los Censos Económicos 2009 del INEGI, se identificó que existen 30,934 establecimientos industriales en el Distrito Federal y 33,807 en los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM. Se determinó que de los 64,741 reportados por los Censos Económicos 2009 del INEGI en la ZMVM, aproximadamente 30,881 de ellos son generadores de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. (Secretaría del Medio Ambiente, 2010).

Figura 3.4.1 Sector industrial y dirección del viento ZMVM, 2012 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



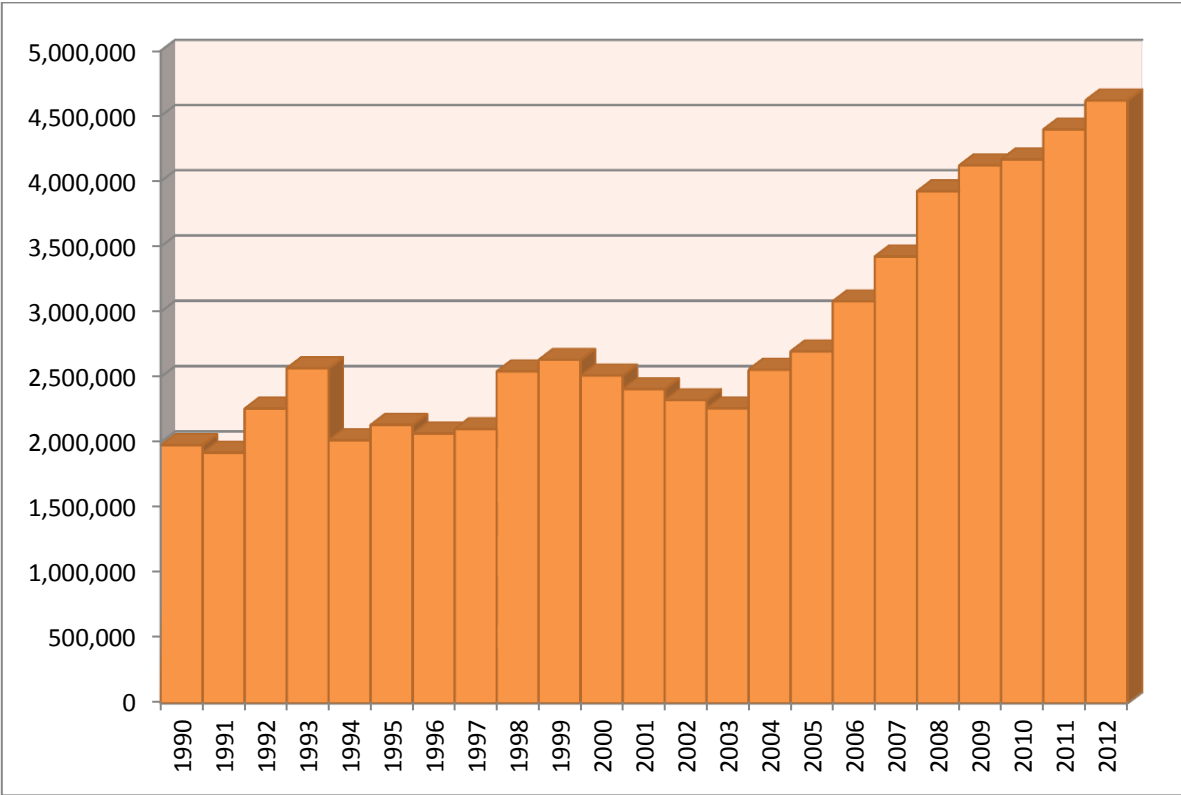
⁶ Norma que establece los límites máximos permisibles de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en fuentes fijas de jurisdicción del distrito federal que utilizan solventes orgánicos o productos que los contienen.

La ubicación de los sectores industriales y la dirección de los vientos predominantes provocan que las emisiones se dirijan hacia zonas densamente pobladas. (Figura 3.4.1)

3.5 Transporte y Movilidad

El incremento de un poco más del doble de vehículos registrados en la ZMVM en los últimos 22 años, ha resultado en un aumento del tráfico, de congestionamientos viales y como consecuencia, una disminución en la velocidad de circulación (Figura 3.5.1). Actualmente, en la ZMVM se tienen registrados más de 5 millones de vehículos, donde el 75% de ellos son de uso particular (autos/camionetas SUV) y generalmente transportan sólo 1 o 2 personas.

Figura 3.5.1 Crecimiento del número de vehículos motorizados registrados en el Distrito Federal (INEGI, 2013)



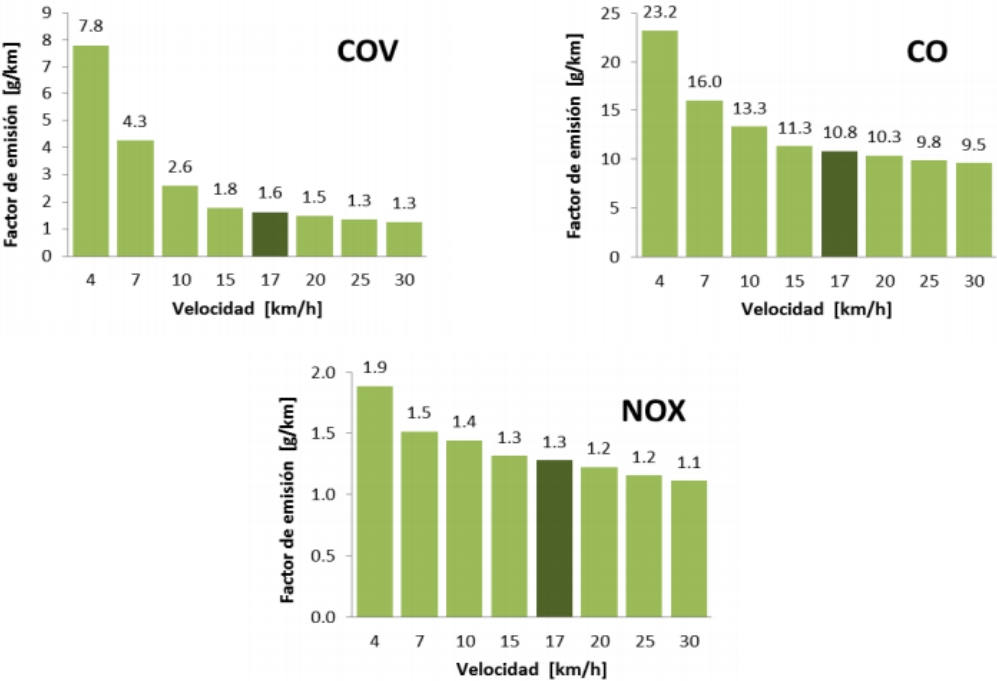
De acuerdo con datos reportados por el Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo de México, en 1990 la totalidad de los vehículos de la ZMVM recorrían anualmente 30 mil millones de kilómetros (IPTD, 2012), esta cantidad casi se ha triplicado al año 2012, con un recorrido vehicular de 86 mil millones de kilómetros.

Las posibles consecuencias ambientales en la generación de emisiones contaminantes se presenta en la Figura 3.5.2, la cual muestra el aumento de emisiones de precursores de ozono para los autos particulares, si la velocidad promedio de circulación bajara a 15 km/hora, a 10 km/hora, a 7 km/hora o a 4 km/hora.

Se debe notar que la velocidad de 4 km/hora, que es cuando el vehículo está casi detenido, es comparable a estar estacionado con el motor encendido y es el escenario que tiene el mayor aumento de emisiones, donde se observa que los compuestos orgánicos volátiles (COV) se incrementarían de 1.6 g/km a 7.8 g/km, el monóxido de carbono (CO) de 10.8 g/km a 23.2 g/km y los óxidos de nitrógeno (NOx) de 1.3 g/km a 1.9 g/km.

Obsérvese además que, la columna correspondiente a la velocidad de 17 km/h se resalta por ser la velocidad promedio a la que viajan los autos particulares en la ciudad.

Figura 3.5.2 Emisiones de autos particulares de acuerdo a su velocidad (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



La ZMVM presenta un índice de motorización de 242 autos por cada 1000 habitantes, lo cual tiene consecuencias muy graves en los congestionamientos viales a los que se enfrentan sus habitantes para sus traslados cotidianos. La empresa IBM realizó un estudio de fastidio por la carga emocional y económica de viajar en distintas ciudades y los resultados que arrojó indicaron que la Ciudad de México junto con Beijing son las que presentan un mayor índice de fastidio (IBM, 2011). En la figura 3.5.3 se muestran las ventajas en cuanto a capacidad de traslado de pasajeros que presentan los distintos modos de transporte urbanos, lo que aliviaría en gran medida los congestionamientos viales provocados principalmente por los autos particulares (Tabla 3.5.4)

Figura 3.5.3 Pasajeros promedio que se podrían desplazar cada hora por un carril vial (IMCO, 2012)

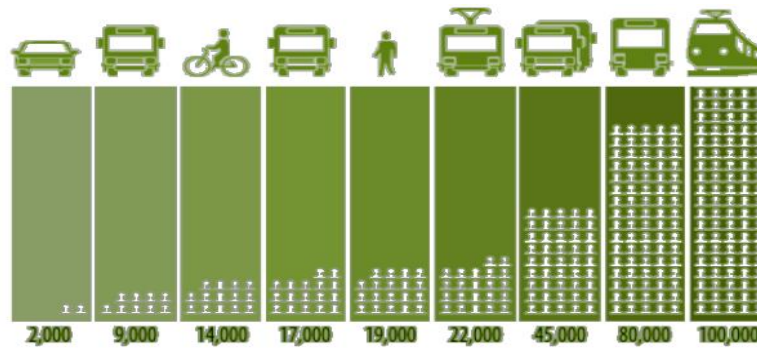


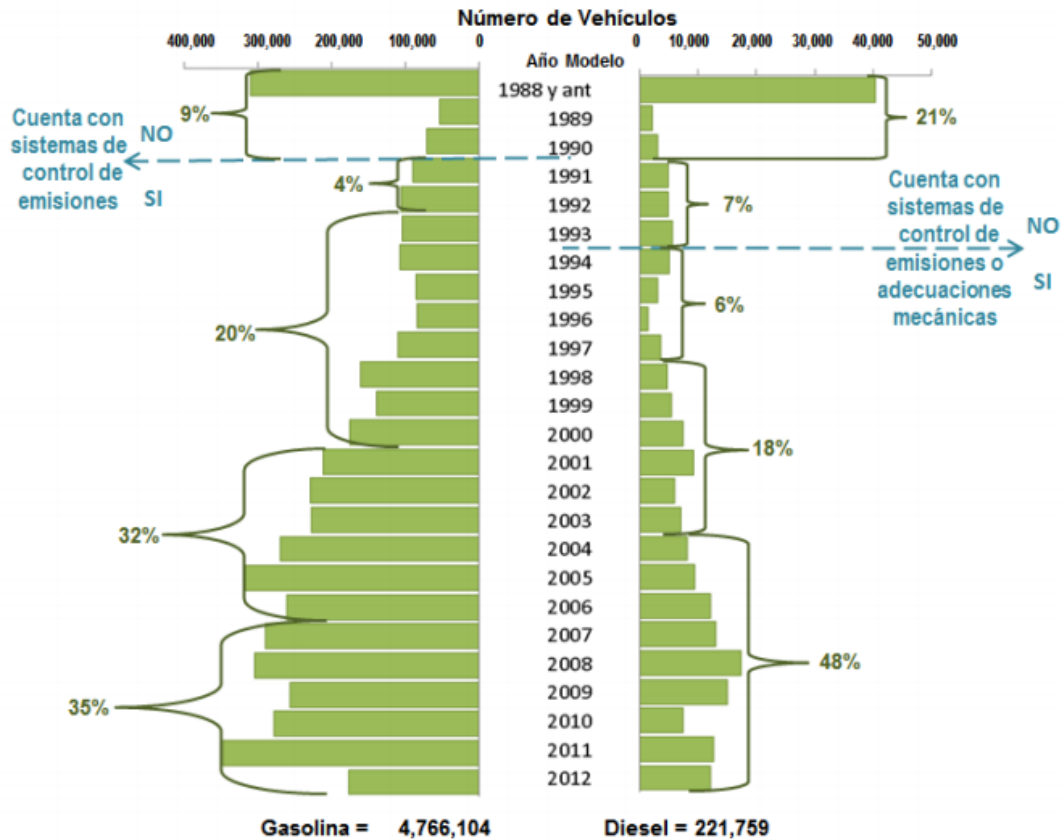
Tabla 3.5.4 Flota vehicular registrada en la ZMVM en 2012 por entidad y tipo de vehículo (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

Tipo de Vehículo	Distrito Federal	Estado de México	ZMVM	%
Autos particulares	1,545,525	1,388,678	2,934,203	58.5%
Camionetas particulares SUV	413,399	396,880	810,279	16.2%
Taxis	136,822	110,740	247,562	4.9%
Vagonetas (pasaje)	7,154	66,430	73,584	1.47%
Microbuses (pasaje)	19,092	16,083	35,175	0.70%
Camionetas tipo Pick Up	102,203	300,343	402,546	8.03%
Vehículos de carga de hasta 3.8 t	13,447	30,150	43,597	0.87%
Tractocamiones	53,583	20,722	74,305	1.48%
Autobuses	34,783	15,951	50,734	1.01%
Vehículos de carga de más de 3.8 t	54,303	113,873	168,176	3.4%
Motocicletas	118,045	54,117	172,162	3.4%
Metrobús/Mexibús	363	64	427	0.01%
Total	2,498,719	2,514,031	5,012,750	100
	49.8%	50.2%		

Respecto a los combustibles utilizados, la flota vehicular a gasolina representa el 95% de la flota total y consume 21 millones de litros diariamente, esto equivale al 44% de la energía que se utiliza en la ZMVM. La flota vehicular a diesel es tan sólo el 4% y consume casi 5 millones de litros diarios.

La figura 3.5.5 muestra un desglose de la flota vehicular en 2012 de acuerdo al año modelo y al tipo de combustible utilizado. Se aprecia que, el mayor porcentaje ya cuenta con sistemas de control de emisiones por ser de modelos más recientes, pero aún existe un número considerable de vehículos que no presentan algún control de emisiones y representan una fuente importante de la contaminación por fuentes móviles.

Figura 3.5.5 Parque vehicular por año modelo y combustible (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



3.6 Emisiones por tipo de fuente y categoría

El término contaminante criterio se ha adoptado en muchos países y es convencionalmente aceptado para referirse a los contaminantes siguientes: Dióxido de Azufre (SO₂), Bióxido de Nitrógeno (NO₂), partículas o material particulado (MP), Plomo (Pb), Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Compuestos Orgánicos Totales (COT) y ozono (O₃). (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011)

Figura 3.6.1 Clasificación de los contaminantes (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

Criterio	Tóxicos	Efecto invernadero
<ul style="list-style-type: none"> •Partículas menores a 10 µm (PM10) •Partículas menores a 2.5 µm (PM2.5) •Bióxido de azufre (SO₂) •Monóxido de carbono (CO) •Óxidos de nitrógeno (NO_x) •Compuestos orgánicos totales (COT) •Compuestos volátiles (COV) •Amoniaco (NH₃) 	<ul style="list-style-type: none"> •Tolueno •Benceno •Xileno •Metanol •Formaldehído •MTBE, entre otros 	<ul style="list-style-type: none"> •Bióxido de carbono (CO₂) •Metano (CH₄) •Óxido nitroso (N₂O) •Carbono negro (CN)

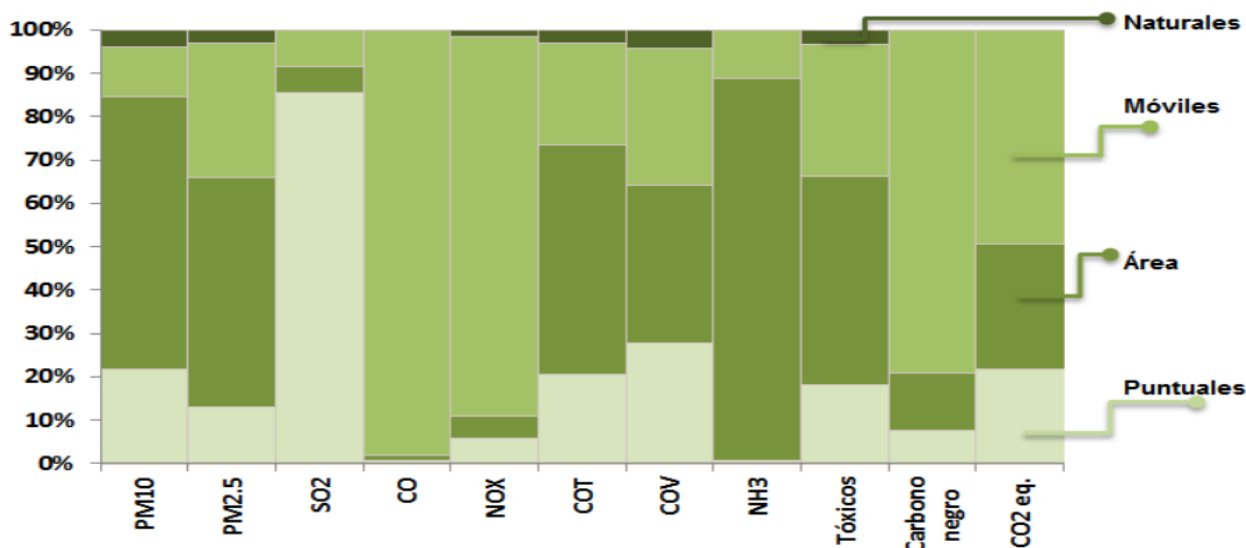
A continuación se presenta la tabla 3.6.2 y la figura 3.6.3 donde se muestran las contribuciones que cada tipo de fuente emite según el tipo de contaminante.

Tabla 3.6.2 Emisión total de la ZMVM por tipo de fuente 2012 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

Fuente contaminante	Emisiones [t/año]										
	PM10	PM2.5	SO ₂	CO	NOX	COT	COV	NH ₃	Tóxicos	CN	CO ₂ eq.
Puntuales	7,491	1,219	4,157	7,357	13,349	183,679	174,698	245	35,304	162	10,708,786
Área	21,841	4,995	289	20,249	12,449	474,418	231,282	39,025	94,195	278	14,369,344
Móviles	3,966	2,946	421	1,578,442	209,717	210,328	199,824	4,922	59,512	1,676	24,424,880
Vegetación y suelos	1,379	291	N/A	N/A	3,617	26,944	26,944	N/A	6,804	N/S	N/A
Total	34,677	9,451	4,867	1,606,048	239,132	895,369	632,748	44,192	195,815	2,116	49,503,010
Emisiones [%]											
Puntuales	21.6	12.9	85.4	0.5	5.6	20.5	27.6	0.6	18.0	7.7	21.6
Área	63.0	52.9	5.9	1.3	5.2	53.0	36.5	88.3	48.1	13.1	29.0
Móviles	11.4	31.1	8.7	98.2	87.7	23.5	31.6	11.1	30.4	79.2	49.3
Vegetación y suelos	4.0	3.1	N/A	N/A	1.5	3.0	4.3	N/A	3.5	N/S	N/A
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

N/A. No Aplica – N/S No significativo

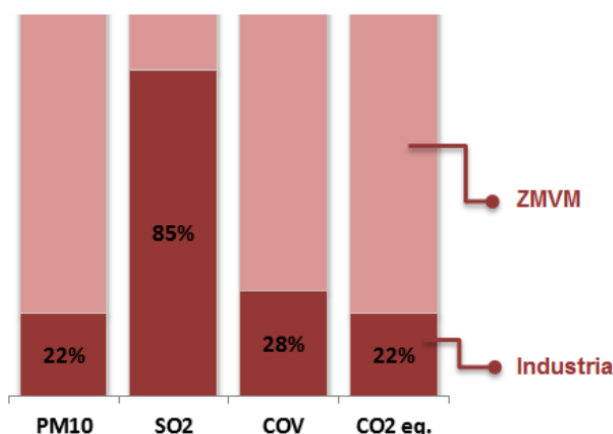
Figura 3.6.3 Contribución en porcentaje por tipo de fuente y contaminante (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Fuentes puntuales

Una fuente puntual es una fuente estacionaria, única y fácilmente identificable. Se define como toda instalación en la que se desarrollan procesos industriales, comerciales, de servicios o, en general, actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011). De las 4,867 toneladas de bióxido de azufre (SO₂) generadas en la ZMVM, el sector industrial es el principal emisor con una participación del 85%, siendo los sectores de la industria química (12%) y del papel (38%) los que más contribuyen a esta emisión. (Figura 3.6.4)

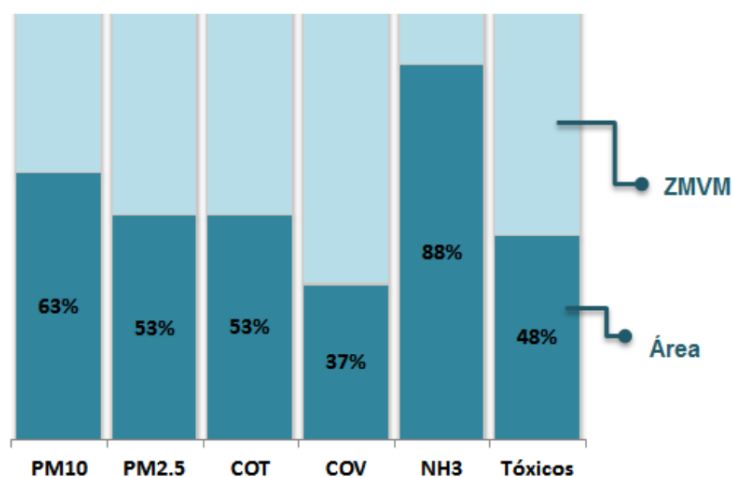
Figura 3.6.4 Contribución porcentual de las fuentes puntuales (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Fuentes de área

Las fuentes de área son fuentes fijas que resultan demasiado numerosas y dispersas como para ser incluidas de manera individual en un inventario de fuentes puntuales (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011). Las fuentes de área emiten aproximadamente 22 mil toneladas de PM10 (63% del total), provenientes en su mayoría de la re-suspensión del polvo durante el paso vehicular sobre las vialidades. También dentro de las fuentes de área, se generan 231,282 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV), que representan el 37% del total en la ZMVM (Figura 3.6.5)

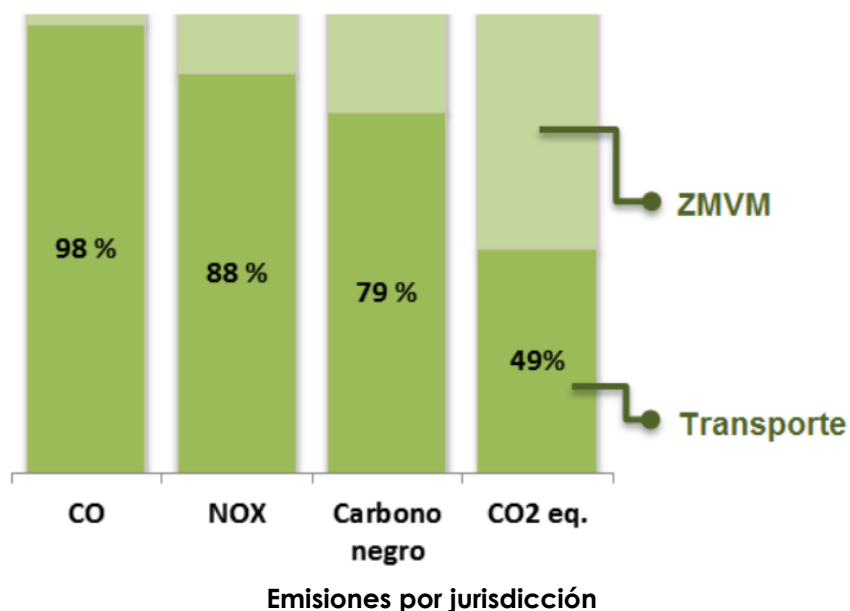
Figura 3.6.5 Contribución de las fuentes de área (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Fuentes móviles

En las áreas urbanas como la Zona Metropolitana del Valle de México, el transporte vial o fuentes móviles generan la mayoría de los contaminantes y de los compuestos de efecto invernadero. Este sector aporta el 98% del CO con 1.57 millones de toneladas y el 88% de los NOx con cerca de 210 mil toneladas; respecto a los compuestos de efecto invernadero, contribuye con el 79% de carbono negro (1,676 toneladas) y el 49% de gases de efecto invernadero (24.4 millones de toneladas de CO2 equivalente) (Figura 3.6.6)

Figura 3.6.6 Contribución porcentual de las fuentes móviles. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

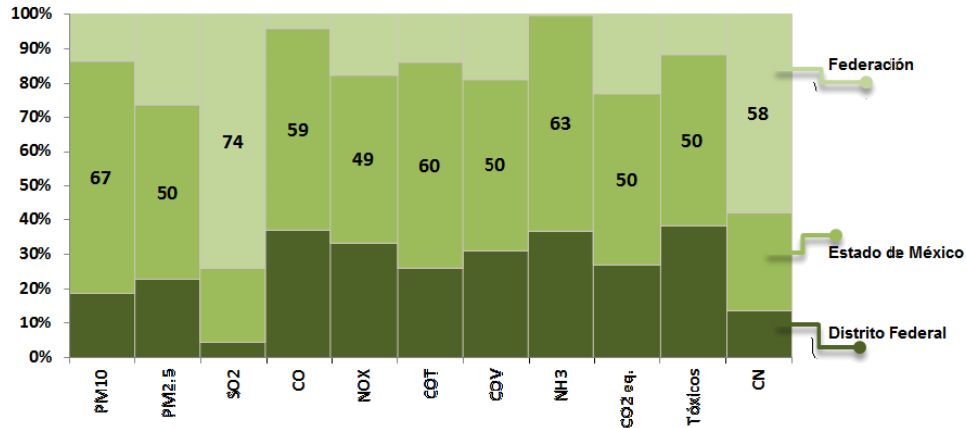


Es importante mencionar que en la Zona Metropolitana del Valle de México, las emisiones que originan la contaminación del aire y que contribuyen con el calentamiento global del planeta, provienen de fuentes que tienen diferente jurisdicción; por lo que el control y reducción de emisiones de las fuentes ubicadas dentro de la ZMVM, son responsabilidad tanto del gobierno del Distrito Federal como de los gobiernos del Estado de México y Federal (Tabla 3.6.7).

Tabla 3.6.7 Inventario de emisiones por jurisdicción. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

Jurisdicción	Emisiones [t/año]										
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COT	COV	NH ₃	Tóxicos	CN	CO ₂ eq.
Distrito Federal	6,552	2,185	217	594,116	79,287	232,949	199,483	16,210	75,001	293	13,401,215
Estado de México	23,335	4,749	1,052	944,674	117,734	536,841	314,436	27,799	97,489	597	24,576,236
Federal	4,790	2,517	3,598	67,258	42,111	125,579	118,829	183	23,325	1,226	11,525,559
Total	34,677	9,451	4,867	1,606,048	239,132	895,369	632,748	44,192	195,815	2,116	49,503,010
	Emisiones [%]										
Distrito Federal	19	23	4	37	33	26	31	37	38	14	27
Estado de México	67	50	22	59	49	60	50	63	50	28	50
Federal	14	27	74	4	18	14	19	N/S	12	58	23
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figura 3.6.8 Contribución porcentual por jurisdicción (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

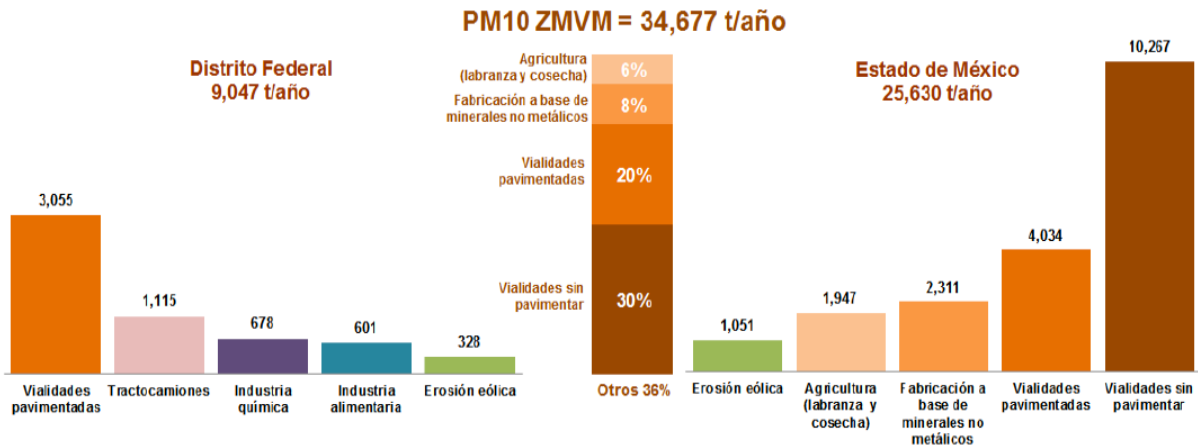


3.7 Análisis desagregado de las emisiones

Partículas suspendidas

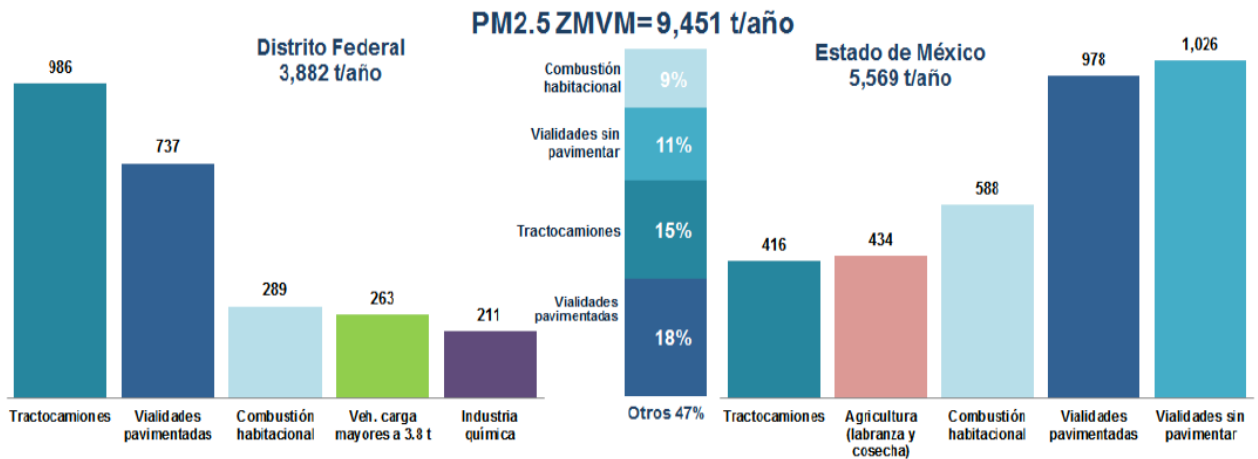
En cuanto a las partículas suspendidas, los sectores que ofrecen el mayor potencial de reducción de PM10, son las vialidades pavimentadas y sin pavimentar, las cuales se generan debido a la re-suspensión de polvo durante el paso vehicular sobre las vialidades. Tan sólo estas dos categorías aportan el 50% (17,638 toneladas) de las emisiones totales generadas de este contaminante en la ZMVM. En la figura 3.7.1 se muestran las principales fuentes de PM10.

Figura 3.7.1 Principales categorías de emisión de PM10 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Del mismo modo, con relación a las emisiones de PM2.5, las vialidades pavimentadas y sin pavimentar siguen siendo la principal fuente de generación de este contaminante, sobre todo las vialidades pavimentadas que aportan el 18% del total de la ZMVM (Figura 3.7.2)

Figura 3.7.2 Principales categorías de emisión de PM2.5 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



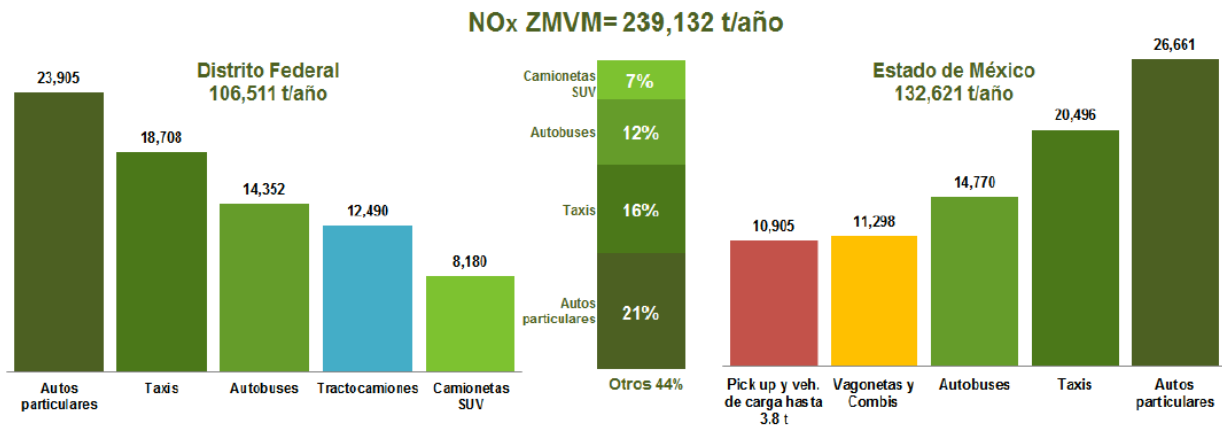
De manera general, las áreas de mayor generación de estos contaminantes se ubican en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco, Venustiano Carranza, norte de Iztapalapa, en la colindancia de Gustavo A. Madero con Azcapotzalco, y en los municipios de Tlalneantla de Baz, Naucalpan de Juárez, Atizapán de Zaragoza, Nezahualcóyotl y el sur de Ecatepec.

Precursores de ozono

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

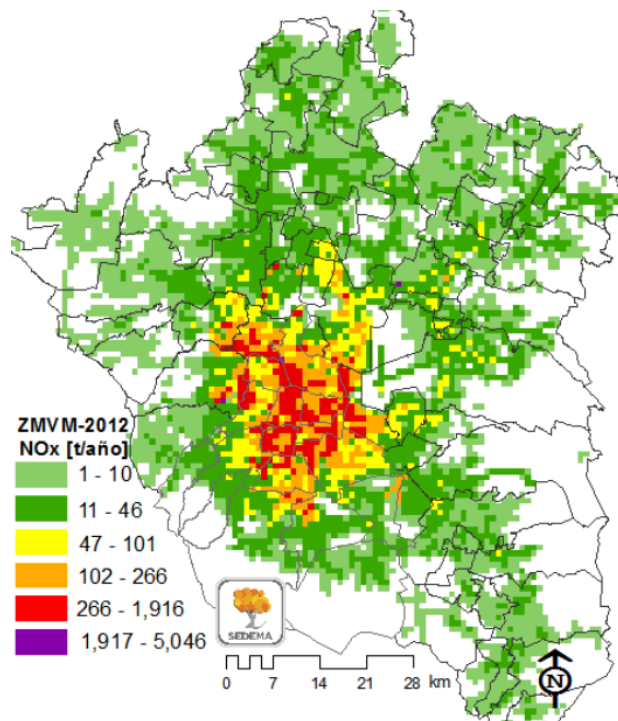
Considerando que el sector transporte es el que emite las mayores cantidades de NO_x en la ZMVM, también es el que ofrece el mayor potencial de reducción de emisiones, sobre todo los autos particulares, por ser los más abundantes y los taxis, por el uso intensivo que se hace de ellos; estos dos tipos de vehículos contribuyen con el 21% y del 16% de las emisiones respectivamente, le siguen en orden de importancia los autobuses con el 12% y las camionetas particulares tipo SUV con el 7%; en suma estas cuatro categorías aportan el 56% de las 239,132 toneladas que se generan en la Zona (Figura 3.7.3).

Figura 3.7.3 Principales categorías de emisión de NOx (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



En cuanto a la distribución espacial de los óxidos de nitrógeno, debido a que gran parte de este contaminante proviene de los vehículos automotores, las vialidades con intenso tráfico vehicular son las áreas de mayor generación, sobre todo las ubicadas en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y los municipios de Tlalnepan de Baz, Naucalpan de Juárez y Nezahualcóyotl (Figura 3.7.4)

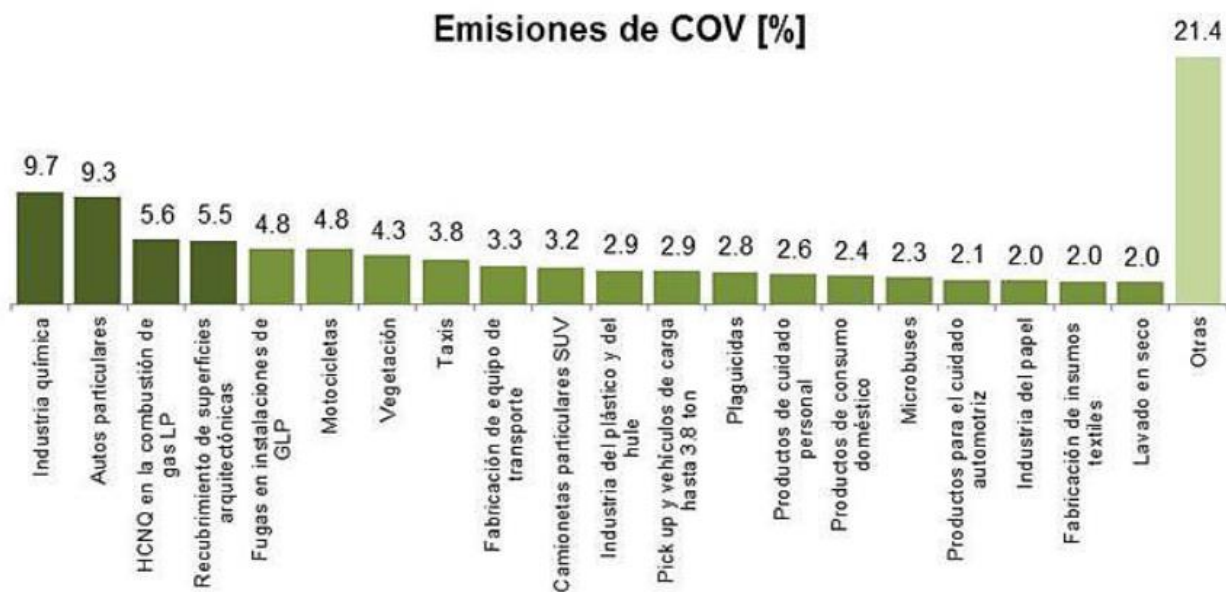
Figura 3.7.4 Distribución espacial de NOx en la ZMVM. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Compuestos orgánicos volátiles (COV)

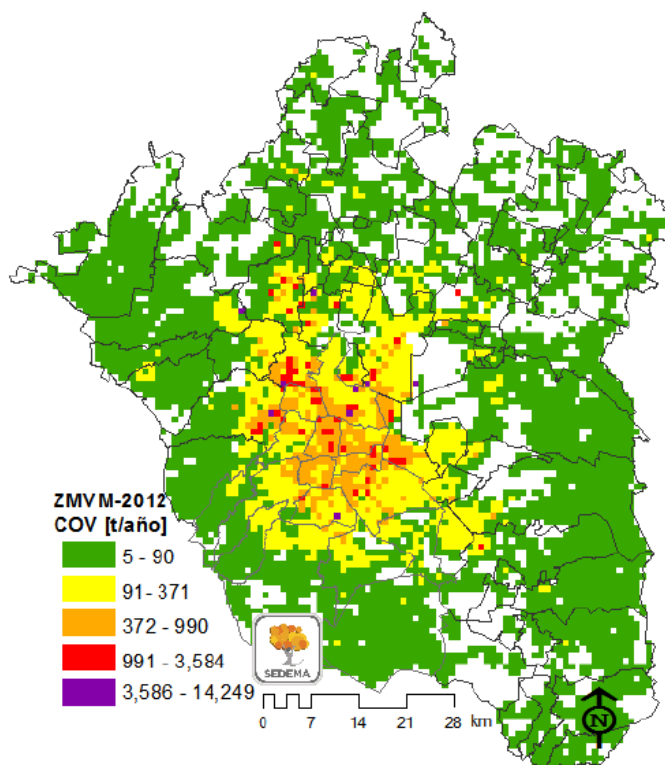
A diferencia de otros contaminantes, los COV son generados por numerosas categorías, como se puede observar en la Figura 3.7.5, las de mayor generación de COV son los autos particulares, la industria química, la combustión incompleta de gas LP (HNQC) y el recubrimiento de superficies arquitectónicas, éstos en conjunto aportan el 30% de las casi 633 mil toneladas de COV generadas en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Figura 3.7.5 Emisión de COV por categorías (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



De igual manera se presenta un mapa (Figura 3.7.6), donde se observa la distribución espacial de las principales fuentes de COV en la ZMVM. Se debe notar que las áreas geográficas donde se concentra este contaminante están relacionadas con la actividad vehicular e industrial, pero también con actividades cotidianas realizadas en hogares y comercios

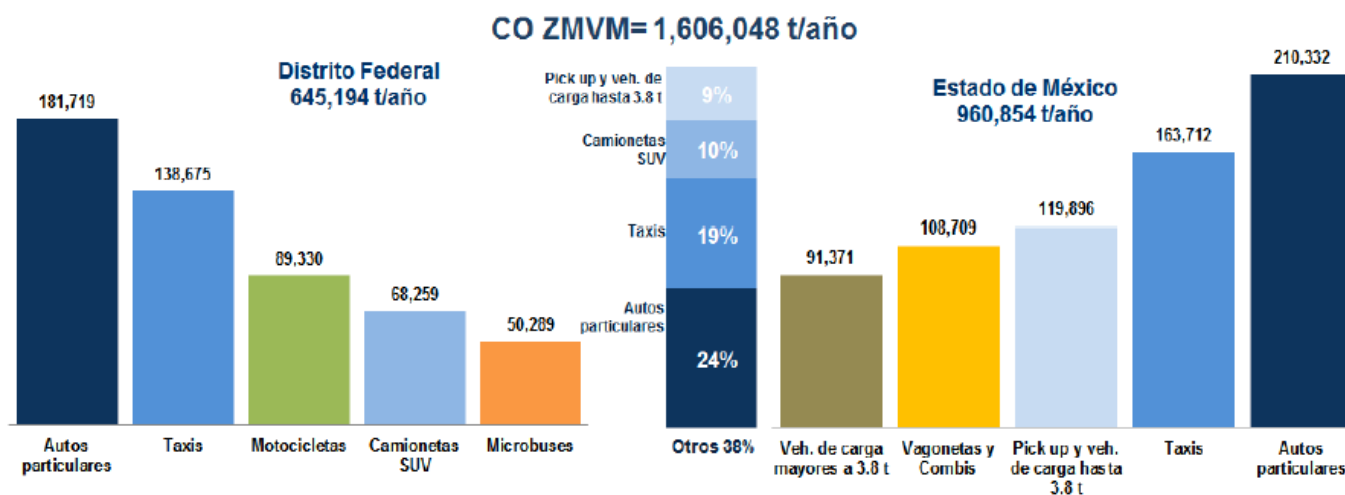
Figura 3.7.6 Distribución espacial de COV en la ZMVM. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es generado casi en su totalidad (98%) por los vehículos automotores (Figura 3.7.7), siendo los principales emisores los autos particulares, los taxis y las camionetas particulares tipo SUV, que en conjunto generan poco más de 851 mil toneladas, es decir el 53% del total de la Zona Metropolitana del Valle de México.

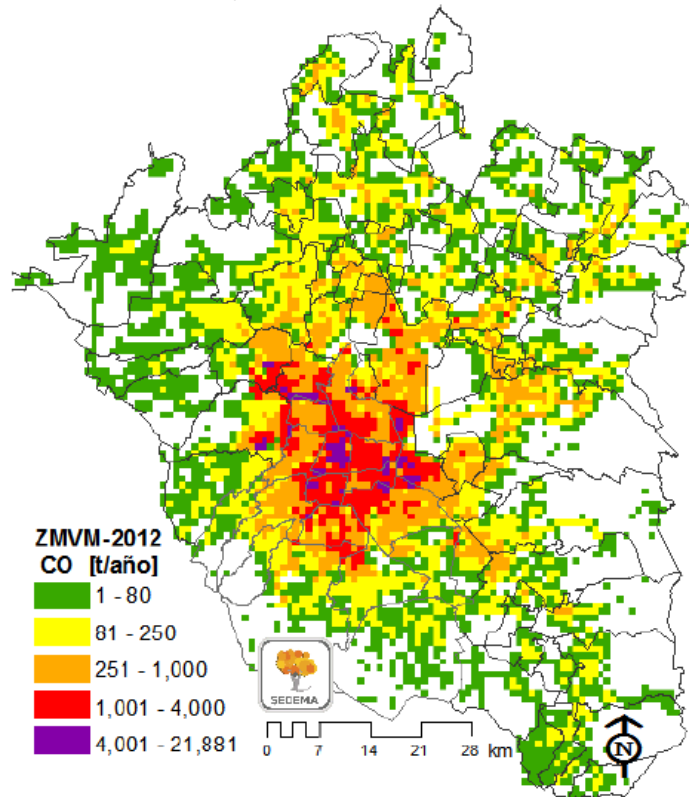
Figura 3.7.7 Principales categorías de emisión de CO. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Debido a que los vehículos emiten la mayoría del CO y éste es resultado de una combustión incompleta, las emisiones se generan en las vialidades altamente congestionadas. Como se puede observar en la Figura 3.7.8, el área central de la ZMVM

es donde se ubican las zonas de mayor generación de emisiones de CO, pues es donde se registran los flujos vehiculares más importantes.

Figura 3.7.8 Distribución espacial de CO en la ZMVM. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



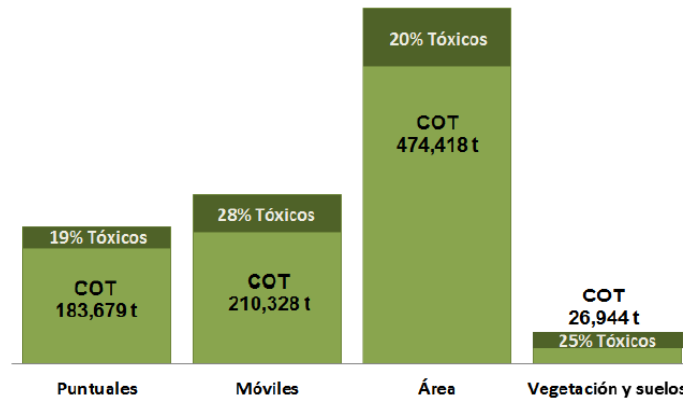
Contaminantes tóxicos

El término “contaminantes tóxicos del aire”, es utilizado para referirse a un grupo de compuestos químicos identificados por ser altamente nocivos a la salud humana y cuyos efectos pueden presentarse a corto o a largo plazo (Secretaría del Medio Ambiente, 2013). Como resultado de las actividades realizadas dentro de la ZMVM, en el año 2012 se generaron cerca de 196 mil toneladas de contaminantes tóxicos. Casi la totalidad de estas emisiones provienen de los compuestos orgánicos totales (COT) y menos del 1% en peso son metales tóxicos contenidos en las partículas suspendidas.

Contaminantes tóxicos provenientes de los COT

La figura 3.7.9 muestra un desglose de las emisiones de COT que emite cada sector, así como el porcentaje de contaminantes tóxicos que presenta. Se observa que, las emisiones por fuentes móviles son las que contienen un mayor porcentaje de compuestos tóxicos, sin embargo, a pesar de que las fuentes de área presentan un porcentaje menor, se debe notar que el total de COT emitido es mucho mayor, por lo tanto, en términos de toneladas totales se puede concluir que es este sector el que contribuye en mayor medida con la emisión de sustancias tóxicas.

Figura 3.7.9 Proporción de contaminantes tóxicos respecto a los COT por fuente (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

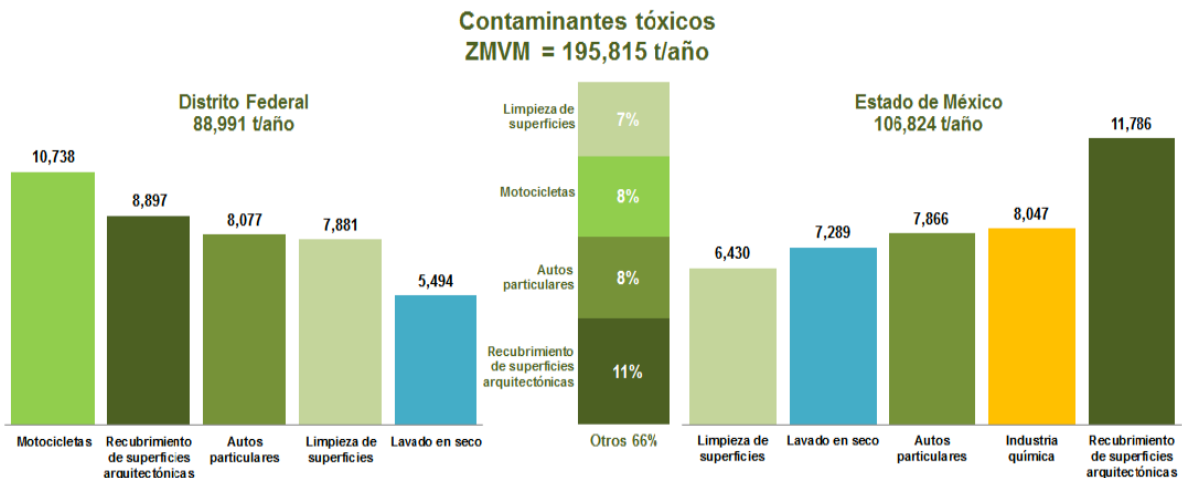


Principales categorías de emisión de contaminantes tóxicos

La generación de contaminantes tóxicos involucra tanto actividades de combustión, como procesos simples de uso de solventes o productos que los contienen y que son utilizados en diversas actividades de la industria, transporte vehicular, comercios, servicios y dentro del mismo hogar.

Los vehículos de uso particular como el automóvil y las motocicletas, se encuentran entre los de mayor generación de contaminantes tóxicos, son responsables de contribuir con 9,980 toneladas de tolueno, 5,589 de isómeros de xileno y 4,465 de metil ter-butyl éter. En general, estas unidades contribuyen con el 16% del total de compuestos tóxicos de la Zona Metropolitana del Valle de México (Figura 3.7.10)

Figura 3.7.10 Principales categorías de emisión de contaminantes tóxicos. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



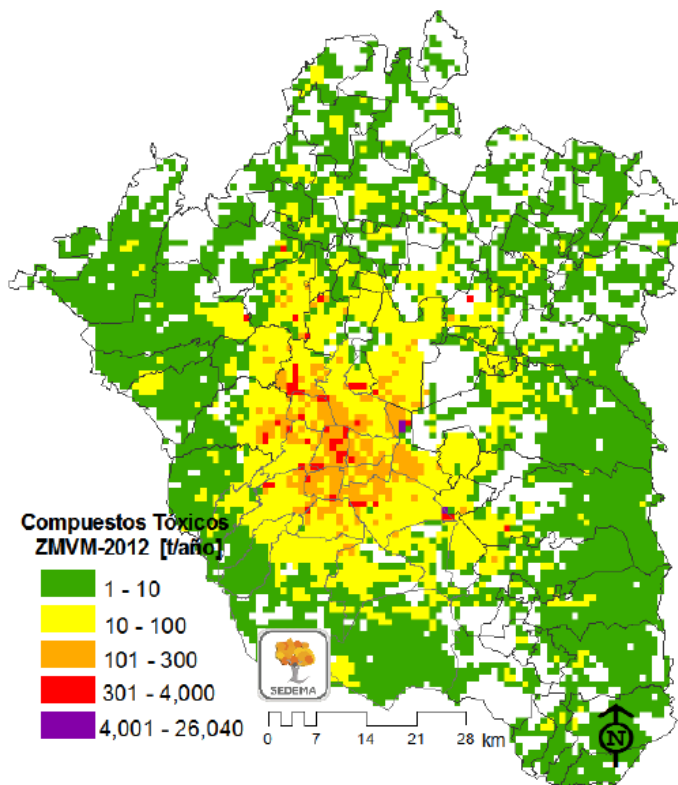
Las categorías de generación de contaminantes tóxicos que se presentan tanto en el Distrito Federal como en el Estado de México, deben ser consideradas claves para el desarrollo de estrategias de reducción de estos contaminantes, entre las cuales se tienen:

- Autos particulares,
- Motocicletas,

- Industria química,
- Lavado en seco,
- Limpieza de superficies industriales,
- Recubrimiento de superficies arquitectónicas.

Debido al gran número de vehículos que transitan dentro de la delegación Cuauhtémoc, y su conurbación, se tienen áreas importantes de distribución de estos contaminantes (Figura 3.7.11)

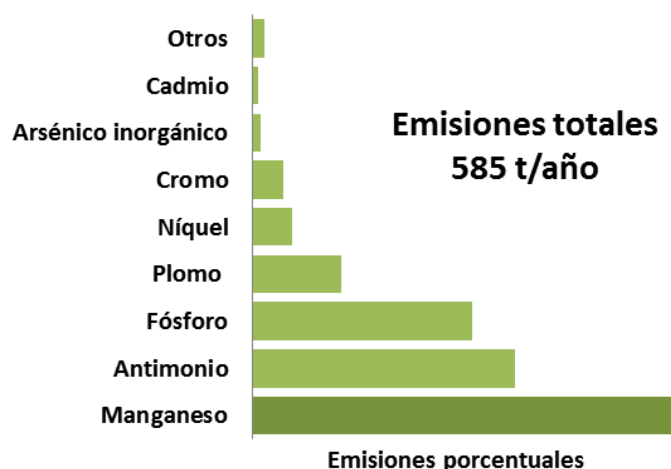
Figura 3.7.11 Distribución espacial de contaminantes tóxicos en la ZMVM. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Metales tóxicos provenientes de las partículas

A pesar de que los metales tóxicos constituyen en peso sólo el 6% de las PM2.5, es importante analizarlos por separado, debido a sus posibles afectaciones a la salud humana. Los resultados de estudios atmosféricos realizados por el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), reportan la detección de manganeso, cromo y plomo, entre los principales metales encontrados en la atmósfera de la ZMVM (Figura 3.7.12)

Figura 3.7.12 Emisiones de metales tóxicos en la ZMVM (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



En la Tabla 3.7.13 se presenta el aporte de metales tóxicos por tipo de fuente y contaminante, donde se muestra que el sector industrial es el principal emisor, con 509 mil kilogramos anuales que representan el 87% del total.

Tabla 3.7.13 Emisiones de metales tóxicos por fuente (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

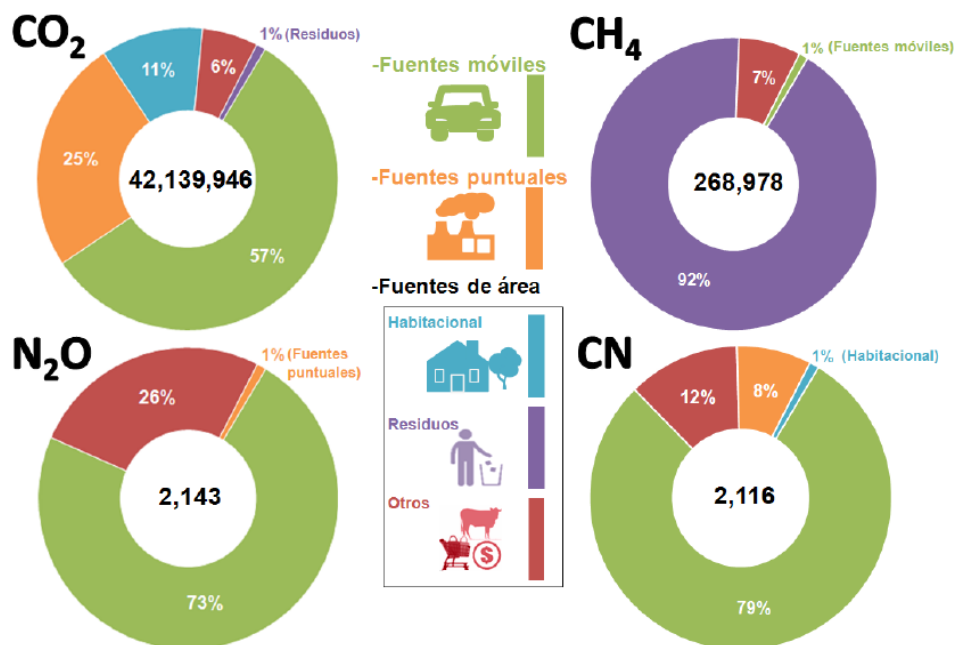
Contaminante		Emisión [kg/año]				Total	%
		Puntuales	Área	Móviles	Naturales		
Mn	Manganeseo	206,000	19,000	85	1,730	226,815	38.8
Sb	Antimonio	140,000	1,000	N/A	12	141,012	24.1
P	Fósforo	80,000	38,000	N/A	N/A	118,000	20.2
Pb	Plomo	43,000	3,000	N/A	1,460	47,460	8.1
Ni	Níquel	18,000	3,000	187	103	21,290	3.6
Cr	Cromo	13,000	3,000	252	377	16,629	2.8
As	Arsénico inorgánico	3,000	1,000	269	34	4,303	0.7
Cd	Cadmio	2,000	1,000	N/A	50	3,050	0.5
	Otros	4,000	2,000	242	280	6,522	1.1
Total		509,000	71,000	1,035	4,046	585,081	100
		87.0%	12.1%	0.2%	0.7%	100%	

Los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Además de estos gases, existen contaminantes como el carbono negro (CN) el cual se considera un compuesto de vida corta, ya que dura pocos días en la atmósfera, sin embargo tiene un potencial de calentamiento 460 veces mayor que el del CO₂. (INECC, 2012)

Se estima que en la ZMVM en el año 2012, se emitieron 42.1 millones de toneladas de dióxido de carbono y 2,145 toneladas de óxido nitroso, las cuales provienen principalmente de la combustión de la gasolina y diesel en el transporte, y la quema de gas natural en el sector industrial. También se generaron casi 269 mil toneladas de metano que se asocian en su mayoría a la descomposición de la materia orgánica en rellenos

sanitarios. Respecto al carbono negro, se tienen 2,116 toneladas, de las cuales el 79% proviene del transporte, en donde tan sólo los tractocamiones aportan más de mil toneladas, es decir, esta categoría contribuye con el 49% de las emisiones totales de la ZMVM (Figura 3.7.14)

Figura 3.7.14 Emisiones de GEI y carbono negro por sector en 2012 (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



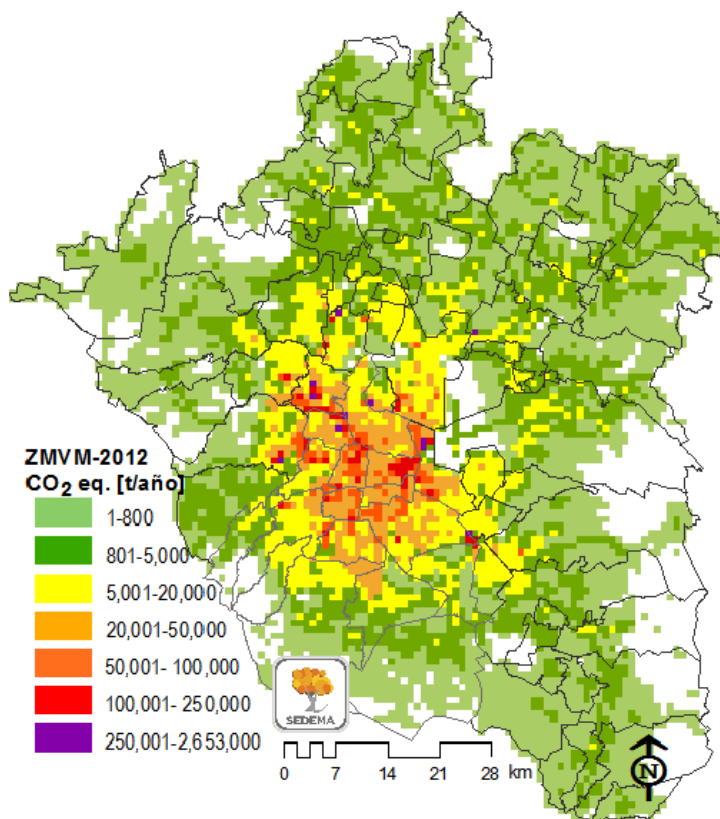
Emisiones de CO₂ equivalente

Con la finalidad de expresar las emisiones en unidades de CO₂ equivalente (CO₂ eq.), se consideraron los respectivos potenciales de calentamiento de los diferentes gases de efecto invernadero. Por otra parte y a manera de referencia, de acuerdo con estimaciones de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, nuestro país emite más de 748 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

De las emisiones generadas en la ZMVM, el transporte contribuye con más de 24 millones de tCO₂ eq, lo que representa el 49% de las emisiones totales; es importante mencionar que tan sólo los autos y camionetas particulares junto con los taxis, aportan el 27% de la emisión total de GEI, los cuales utilizan básicamente gasolina como combustible.

En la Figura 3.7.15, se presenta la distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero, la cual muestra que dichas emisiones se generan básicamente en las áreas urbanas de las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero y Azcapotzalco, así como los Municipios de Tlalnepantla de Baz, Naucalpan de Juárez y Atizapán de Zaragoza.

Figura 3.7.15 Distribución espacial de gases de efecto invernadero en la ZMVM. (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)



Por último, se muestra una tabla (Tabla 3.7.16) donde se enlistan las principales fuentes de emisión de contaminantes y que, por lo tanto, son las categorías en las cuales hay una mayor necesidad de implementar medidas que ayuden a mejorar la calidad del aire.

Tabla 3.7.16 Principales categorías para mejorar la calidad del aire (Secretaría del Medio Ambiente, 2013)

Número de medida	Categoría	Emisiones [%]							
		Partículas		Precusores de ozono			Tóxicos	Carbono negro	GEI CO ₂ eq.
		PM10	PM2.5	CO	NO _x	COV			
1	Autos particulares	1.6	2.7	24.4	21.2	9.3	8.1	3.4	14.8
2	Tractocamiones	4.6	14.8	1.7	7.4	0.7	0.4	49.2	2.8
3	Taxis	0.7	1.2	18.8	16.4	3.8	3.9	1.4	5.6
4	Vialidades sin pavimentar	30.4	11.2	N/A	N/A	N/A	0.0	0.6	N/A
5	Vialidades pavimentadas	20.4	18.2	N/A	N/A	N/A	0.0	2.6	N/A
6	Vehículos de carga mayores a 3.8 t	1.9	6.0	7.4	5.9	1.7	1.3	13.6	3.4
7	Autobuses	1.0	3.2	3.0	12.2	1.2	0.7	7.7	4.8
8	Camionetas particulares SUV	0.5	0.8	9.8	7.5	3.2	2.8	1.0	6.2
9	Industria química	4.5	2.6	0.0	0.3	9.7	5.9	0.8	1.6
10	Motocicletas	0.3	0.6	8.1	1.4	4.8	8.0	0.7	0.2
11	Combustión habitacional	2.6	9.3	0.3	1.8	0.1	0.2	0.8	9.0
12	Microbuses	0.2	0.6	8.5	4.7	2.3	1.0	0.5	3.0
13	Vagonetas y combis	0.2	0.5	7.4	5.2	1.7	1.7	0.6	3.4

3.8 Índice de calidad del aire

El índice de calidad del aire es un indicador diseñado para informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, muestra qué tan contaminado se encuentra el aire y cuáles podrían ser los efectos en la salud (SEDEMA, 2014). El índice se calcula para cinco de los contaminantes criterio: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas; se representa con una escala que va de 0 a 500, donde, como se muestra en la tabla 3.8.1 el valor de 100 se asigna al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante. Un valor menor a 100 se considera satisfactorio y con un bajo riesgo para la salud. Cualquier nivel superior a 100 implica algún riesgo para la salud, entre más grande es el valor del índice, mayor es la contaminación y el riesgo.

Tabla 3.8.1 Categorías del índice de calidad del aire

Categoría	Intervalo	Mensaje	Significado	Recomendaciones
BUENA	0-50	Sin riesgo	La calidad del aire es satisfactoria y existe poco o ningún riesgo para la salud.	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre.
REGULAR	51-100	Aceptable	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, en el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles, pueden presentar síntomas moderados.	Las personas que son extremadamente sensibles a la contaminación deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MALA	101-150	Dañina a la salud de los grupos sensibles	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general usualmente no es afectado.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MUY MALA	151-200	Dañina a la salud	Todos pueden experimentar efectos en la salud; quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.	Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre. La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
EXTREMADAMENTE MALA	>200	Muy dañina a la salud	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.	La población en general debe suspender los esfuerzos al aire libre.

Monitoreo del aire en la ZMVM

El monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM se realiza mediante 42 estaciones repartidas en toda la zona. Las estaciones de monitoreo de la calidad del aire que integran el Sistema de Monitoreo Atmosférico se indican en la Tabla 3.8.2.

Tabla 3.8.2 Estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SEDEMA, 2014)

Clave	Nombre	Delegación o municipio	Entidad
<u>ACO</u>	Acolman	Acolman	Estado de México
<u>AJU</u>	Ajusco	Tlalpan	Distrito Federal
<u>ATI</u>	Atizapán	Atizapán de Zaragoza	Estado de México
<u>CAM</u>	Camarones	Azcapotzalco	Distrito Federal
<u>CCA</u>	Centro de Ciencias de la Atmósfera	Coyoacán	Distrito Federal
<u>TEC</u>	Cerro del Tepeyac	Gustavo A. Madero	Distrito Federal
<u>CHO</u>	Chalco	Chalco	Estado de México
<u>COR</u>	CORENA	Xochimilco	Distrito Federal
<u>COY</u>	Coyoacán	Coyoacán	Distrito Federal
<u>CUA</u>	Cuajimalpa	Cuajimalpa de Morelos	Distrito Federal
<u>CUT</u>	Cuautitlán	Tepotzotlán	Estado de México
<u>DIC</u>	Diconsa	Tlalpan	Distrito Federal
<u>EAJ</u>	Ecoguardas Ajusco	Tlalpan	Distrito Federal
<u>EDL</u>	Ex Convento Desierto de los Leones	Cuajimalpa de Morelos	Distrito Federal
<u>FAC</u>	FES Acatlán	Naucalpan de Juárez	Estado de México
<u>HGM</u>	Hospital General de México	Cuauhtémoc	Distrito Federal

Clave	Nombre	Delegación o municipio	Entidad
<u>IZT</u>	Iztacalco	Iztacalco	Distrito Federal
<u>LPR</u>	La Presa	Tlalnepantla de Baz	Estado de México
<u>LAA</u>	Laboratorio de Análisis Ambiental	Gustavo A. Madero	Distrito Federal
<u>IBM</u>	Legaria	Miguel Hidalgo	Distrito Federal
<u>LOM</u>	Lomas	Miguel Hidalgo	Distrito Federal
<u>LLA</u>	Los Laureles	Ecatepec de Morelos	Estado de México
<u>MER</u>	Merced	Venustiano Carranza	Distrito Federal
<u>MPA</u>	Milpa Alta	Milpa Alta	Distrito Federal
<u>MON</u>	Montecillo	Texcoco	Estado de México
<u>MCM</u>	Museo de la Ciudad de México	Cuauhtémoc	Distrito Federal
<u>NEZ</u>	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	Estado de México
<u>PED</u>	Pedregal	Álvaro Obregón	Distrito Federal
<u>SAG</u>	San Agustín	Ecatepec de Morelos	Estado de México
<u>SJA</u>	San Juan de Aragón	Gustavo A. Madero	Distrito Federal
<u>SNT</u>	San Nicolás Totolapan	La Magdalena Contreras	Distrito Federal
<u>SUR</u>	Santa Úrsula	Coyoacán	Distrito Federal
<u>SFE</u>	Santa Fe	Cuajimalpa de Morelos	Distrito Federal
<u>SHA</u>	Secretaría de Hacienda	Miguel Hidalgo	Distrito Federal
<u>TAH</u>	Tláhuac	Xochimilco	Distrito Federal
<u>TLA</u>	Tlalnepantla	Tlalnepantla de Baz	Estado de

Clave	Nombre	Delegación o municipio	Entidad
			México
<u>TPN</u>	Tlalpan	Tlalpan	Distrito Federal
<u>TLI</u>	Tultitlán	Tultitlán	Estado de México
<u>UIZ</u>	UAM Iztapalapa	Iztapalapa	Distrito Federal
<u>UAX</u>	UAM Xochimilco	Coyoacán	Distrito Federal
<u>VIF</u>	Villa de las Flores	Coacalco de Berriozábal	Estado de México
<u>XAL</u>	Xalostoc	Ecatepec de Morelos	Estado de México

A manera de referencia técnica en la tabla 3.8.3 se enlistan los métodos de monitoreo utilizados para determinar la cantidad de contaminantes presentes.

Tabla 3.8.3 Métodos utilizados para determinar la cantidad de contaminantes presentes (SEDEMA, 2014)

Contaminante	Principio de operación	Descripción del método
Dióxido de azufre (SO₂)	Fluorescencia UV	Método equivalente: medición de la fluorescencia emitida por las moléculas de SO ₂ cuando son excitadas por una fuente de radiación ultravioleta.
Monóxido de carbono (CO)	Absorción en el infrarrojo	Método de referencia: medición de la absorción de luz infrarroja por parte del monóxido de carbono en una celda de correlación.
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	Quimioluminiscencia	Método de referencia: medición de la luz emitida durante la reacción entre el NO y el O ₃ . La separación de las especies nitrogenadas se realiza a través de la medición diferencial de NO y NO ₂ (previa reducción catalítica). El valor de NO _x corresponde a la suma de NO+NO ₂ .
Ozono (O₃)	Fotometría UV	Método equivalente: absorción de luz ultravioleta en una longitud de onda de 254 nm, la disminución en la intensidad es proporcional a la concentración de ozono de acuerdo a la ley de Beer-Lambert.
Partículas suspendidas PM₁₀, PM_{2.5}	Gravimetría	Método equivalente: determinación de la masa de partículas presente en un flujo de aire, las partículas son separadas de la corriente y depositadas sobre un filtro colocado en un elemento oscilante, la variación en la frecuencia de oscilación es proporcional a la masa. El tamaño de partícula está determinado por la entrada selectiva y el flujo de muestra.
Partículas suspendidas PM₁₀, PM_{2.5}	Atenuación de radiación beta	Método equivalente: atenuación en la intensidad de la radiación beta por las partículas depositadas sobre un filtro continuo

Los estándares para la protección de la salud pública se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM describen los límites permisibles para los contaminantes criterio (Tabla 3.8.4).

Tabla 3.8.4 Estándares para la protección de la salud pública (SEDEMA, 2014)

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-022-SSA1-2010	8 de septiembre de 2010	0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas 0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas 0.025 ppm, promedio anual
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	11.0 ppm máximo anual como promedio móvil de 8 horas
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	0.210 ppm promedio horario
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1-1993	30 de octubre de 2002	0.110 ppm promedio horario 0.080 ppm quinto máximo anual como promedio móvil de 8 horas
Partículas suspendidas totales (PST)	NOM-025-SSA1-1993	26 de septiembre de 2005	210 µg/m ³ , valor del percentil 98 como promedio 24 horas
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	NOM-025-SSA1-1993	26 de septiembre de 2005	120 µg/m ³ , valor del percentil 98 como promedio 24 horas 50 µg/m ³ , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-1993	26 de septiembre de 2005	65 µg/m ³ , valor del percentil 98 como promedio 24 horas 15 µg/m ³ , promedio anual
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	23 de Diciembre de 1994	1.5 µg/m ³ en un periodo de tres meses como promedio aritmético

4. Infraestructura ciclista como alternativa de solución.

La bicicleta es un vehículo de tracción humana a pedales, de bajo costo en su adquisición y mantenimiento, altamente eficiente en el consumo de energía y de bajo impacto por el espacio que requiere para circular y estacionarse. Además no emite contaminantes al aire y produce muy poco ruido al circular (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

A pesar de los esfuerzos de diversas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, el modelo de movilidad actual de muchas ciudades en el mundo, se basa en el uso excesivo de los vehículos motorizados lo que impacta negativamente en la calidad de vida de los habitantes. Una solución parcial a este complejo problema es, el uso de la bicicleta como modo de transporte cotidiano. Es bien sabido que las bicicletas son la mejor solución de movilidad personal para distancias de hasta 15 km, pues son muy fáciles de operar, ocupan poco espacio, el ruido que emiten es mínimo, disminuyen la contaminación, entre otros muchos beneficios. Como se demostró en el capítulo anterior, el transporte es una de las principales fuentes de emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero. A esto se le debe añadir que los vehículos motorizados son los responsables del 80% de la contaminación acústica en las zonas urbanas. Para poder justificar la importancia de un plan integral de desarrollo de infraestructura ciclista en la ciudad, en este capítulo se explicarán más a detalle los múltiples beneficios que presenta este modo de transporte.

Desde la visión de la ingeniería, es necesario que las personas encargadas de diseñar y construir la infraestructura para las bicicletas conozcan a fondo las características de éstas, así como el comportamiento de los usuarios de la localidad y la normatividad en materia de tránsito que se aplique para las bicicletas.

4.1 Ventajas sociales y ambientales de utilizar la bicicleta

Los automóviles producen en promedio 0.3 kg de CO₂ por cada kilómetro recorrido, tomando en cuenta que, cuando se usa la bicicleta no se emite ningún tipo de gas, se puede argumentar que, por cada kilómetro recorrido en bicicleta, se evita la emisión de 0.3 kg de CO₂ (Bicycle Federation of Australia, 2007). Al usar las bicicletas para reemplazar los viajes cortos en auto es cuando se está beneficiando en mayor medida a la calidad del aire de las ciudades, pues los viajes cortos, en los que los autos se detienen constantemente, provocan una menor eficiencia del uso de combustible y un mayor nivel de emisiones de contaminantes. Otro enfoque, desde el cual se pueden abordar las ventajas de utilizar la bicicleta, se encuentra al comparar la energía incorporada en un auto y una bicicleta. El concepto de energía incorporada se refiere a toda la energía necesaria en la manufactura y entrega de un producto. Esto incluye la energía para la extracción de los recursos naturales, su procesamiento y el transporte. Se debe tomar en cuenta que, en cada etapa de la fabricación, se producen gases contaminantes y de efecto invernadero. Un automóvil promedio de aproximadamente \$250,000 incorpora 41 toneladas de CO₂ equivalente y un millón de litros de agua. En contraste, una bicicleta de \$2,000 incorpora sólo 0.75 toneladas de CO₂ equivalente y 19,000 litros de agua (Bicycle Federation of Australia, 2007).

Existe además, la idea de la cadena de impacto, es decir, la energía que se requiere para disponer la infraestructura y los servicios que cada modo de transporte requiera, como lo son, caminos, estacionamientos, intersecciones, etc. Partiendo de esta idea, se puede hacer la comparación en ese sentido entre una bicicleta y un auto; la bicicleta es mucho más pequeña, los usuarios viajan a menores velocidades y el mantenimiento de la infraestructura necesaria para una vía ciclista es muchas veces menor a la que se necesita para las calles y avenidas.

En algunos países como Dinamarca, Holanda, China, entre muchos otros más, la bicicleta ya es usada como un medio de transporte cotidiano para los ciudadanos. Se estima que en todo el mundo se usan diariamente 800 millones de bicicletas (SURA, 2014). Este número tiende a aumentar cada vez más rápido por las ventajas que ofrece la bicicleta tanto para los usuarios como para el medio ambiente.

Utilizar la bicicleta como medio de transporte tiene múltiples ventajas para la salud (SURA, 2014), entre las que destacan:

- Ayuda al funcionamiento del sistema cardiovascular, tonifica los músculos y mejora la capacidad pulmonar.
- Reduce niveles de colesterol en la sangre.
- Ayuda a mejorar la coordinación motriz.
- Reduce el riesgo de sufrir sobrepeso y obesidad.
- Reduce los niveles de estrés y mejora el estado de ánimo.

Además de disminuir los contaminantes presentes en las ciudades, las bicicletas disminuyen el ruido provocado por los autos y camiones, lo que se traduce en menores niveles de estrés al conducir en la calle e inclusive al estar en zonas cercanas a los arroyos vehiculares.

La bicicleta tiene la ventaja de ser mucho más barata que un automóvil o una motocicleta, por lo que se trata de un vehículo que es accesible a prácticamente cualquier estrato socio-económico. Tampoco requieren ningún tipo de combustible y su costo de mantenimiento es muy bajo. Si a esto le sumamos que no hay una edad mínima reglamentada para conducir la bicicleta por la vía pública, se trata de una opción de transporte muy apropiada para menores de 16 años siempre y cuando se trate de trayectos cortos y sobre rutas seguras.

Especialistas del Massachusetts Institute of Technology (MIT) y del Centro de Investigación en Epidemiología Ambiental (Creal) de Barcelona, España, presentaron los resultados de un estudio en el que demuestran que el uso habitual de la bicicleta disminuye 24 por ciento el número de muertes anuales vinculadas a enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias, incluso de desarrollar cáncer por exposición crónica de tóxicos generados, principalmente, por los vehículos motorizados.

Un estudio denominado Air Quality Variation Based on Distance from Traffic and Route Choice, llevado a cabo en Singapur, Distrito Federal y Nueva York, consistió en que más de mil participantes fueron monitoreados con aparatos que registraron sus viajes durante casi un año, además de que médicos vigilaban su estado de salud al usar un medio activo

de transporte en lugar de un auto para desplazarse a sus casas, escuelas, trabajo u otras actividades.

Para el estudio de la Ciudad de México se registró la cantidad de partículas dependiendo la cercanía con el arroyo vehicular. Los resultados arrojados indicaron que a 4.5 metros del arroyo vehicular, se presentó una reducción de 50 por ciento en el conteo de partículas y a 9 metros de 70 por ciento.

Los especialistas concluyeron que, al usar la bicicleta, las personas se exponen menos a ambientes tóxicos contaminados y además consideraron que es necesario trazar rutas que orienten a usuarios sobre la forma en la que pueden reducir el contacto con ambientes tóxicos durante sus trayectos.

Con esta información, se puede asegurar que, una ciudad diseñada para poder transitar en bicicleta de manera cómoda, rápida y segura será una ciudad más limpia, más agradable y permitirá que sus habitantes tengan una mejor calidad de vida.

Es importante señalar que, la Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta que los niveles altos de contaminación atmosférica provocan la muerte prematura de 14 mil 700 mexicanos cada año, los cuales desarrollan enfermedades por estar expuestos a los contaminantes de automotores, y que en el mundo se eleva a 200 mil casos anuales. (Grupo Milenio, 2014)

Resultados del programa ECOBICI

Para el cálculo de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero debido a la implementación del programa ECOBICI se hizo uso de la "Encuesta de Opinión a Usuarios del Sistema ECOBICI". Con base en los resultados arrojados, se utilizó el porcentaje de cambio modal correspondiente a los automóviles particulares, taxis y motocicletas. A partir de la información sobre los viajes realizados en ECOBICI en el 2010, 2011 y 2012, se estimó la cantidad total de kilómetros recorridos por los usuarios de este sistema de bicicletas públicas. Haciendo uso de los distintos modos de transporte que los usuarios sustituyeron por ECOBICI, se obtuvieron los kilómetros-persona de recorrido evitados en automóvil, taxi y motocicleta. La metodología partió de una línea base de emisiones previamente realizada para obtener las emisiones de CO₂ promedio por cada modo de transporte durante 2010, 2011, 2012. Para obtener el ahorro en emisiones que el sistema de ECOBICI generó, se obtuvieron las emisiones de la Línea Base sin la implementación del sistema y se realizó un escenario con la implementación de ECOBICI lo cual redujo las emisiones de la Línea Base. Con una resta se pudo obtener la diferencia que hay entre las emisiones con el sistema ECOBICI y la proyección de éstas si no se hubiera implementado el programa.

Resultados de reducciones de emisiones de GEI por el programa ECOBICI

En la tabla (Tabla 4.1.1) se puede observar que el total de emisiones evitadas gracias a ECOBICI entre febrero de 2010 y diciembre de 2012 es de 232 toneladas de CO₂ equivalente.

Tabla 4.1.1 Emisiones de CO₂ equivalente evitadas por programa ECOBICI

Modo de transporte	Año	Distancia de recorrido de los vehículos evitada (miles de km)	Emisiones evitadas por el sistema ECOBICI (TonCO ₂ e)
Automóvil	2010	704	22
	2011	2623.5	83
	2012	4037.1	127
Total		7364.6	232

Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)

Reducción de contaminantes criterio

En la tabla 4.1.2 se muestra la reducción de los contaminantes criterio debido a la ejecución de ECOBICI.

Tabla 4.1.2 Reducción de contaminantes criterio por programa ECOBICI

Contaminante criterio	2010	2011	2012	Total
PM	1.5	5.4	8.3	15.2
SO ₂	0.38	1.43	2.2	4.01
CO	1576	5874	9039	16489
NO _x	173	645	993	1811
COT	156	580	893	1629
COV	150	558	859	1567
NH ₃	5.9	21.9	33.8	61.6

Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)

Reducción de tiempo de traslado

Puesto que los tiempos de traslado en la ciudad se han incrementado considerablemente en los últimos años por el incremento del parque vehicular, este tema se ha convertido en un rubro de suma importancia para la elección del modo de transporte.

La reducción de tiempo de traslado total se calculó con base en la disminución de la congestión vehicular por ECOBICI. Se utilizaron los kilómetros recorridos en la línea base y en el escenario, así como las velocidades promedio de los vehículos de pasajeros obteniéndose los días ahorrados (Tabla 4.1.3).

Tabla 4.1.3 Reducciones de tiempo de traslado por año por la implementación de ECOBICI

Año	Días ahorrados
2010	57
2011	776
2012	1232
Total	2065

Fuente: (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)

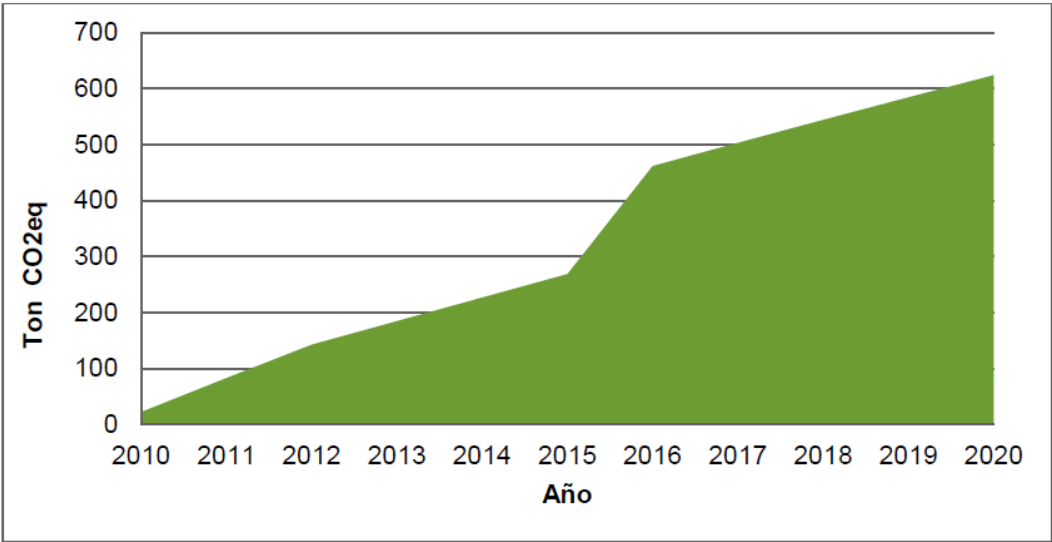
La Secretaría de Hacienda y Crédito Público utiliza un parámetro llamado el valor social del tiempo (VST) para contabilizar cuánto es que los individuos estarían dispuestos a pagar en promedio por evitar el tiempo que asignan a viajar. Con el VST se determinó que el ahorro total es de \$1,075,412 en el período de febrero 2010 a diciembre 2012. Se considera un ahorro porque el tiempo de traslado se disminuyó sin que la población en estudio tuviera que destinar alguna cantidad de dinero.

Proyección del Sistema ECOBICI a 2020

Como se observó en las secciones previas de este estudio, el sistema ECOBICI tiene múltiples ventajas tanto para los usuarios como para los todos los habitantes de la ciudad. Habiendo establecido estas ventajas, es lógico que, si se realiza una proyección con un incremento similar a 2015 y 2020 la reducción de emisiones es mucho mayor.

Para calcular la mitigación del periodo 2010-2020, se utilizó una extrapolación de los kilómetros recorridos y de los usuarios desde febrero de 2010 a diciembre de 2012. En la Figura 4.1.4 se puede observar la posible reducción de emisiones GEI de acuerdo al ritmo de crecimiento considerado. En total la reducción de CO₂eq sería de 3,641 Ton, lo que equivale a la plantación de 10,938 árboles durante este lapso de tiempo.

Figura 4.1.4 Proyección de Reducción de Emisiones GEI en el período 2010 por la implementación del Sistema ECOBICI (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)



Del mismo modo se prevé una disminución considerable en los contaminantes que afectan la calidad del aire, en las figuras 4.1.5, 4.1.6 y 4.1.7 se muestra la reducción de contaminantes criterio proyectada para 2020, observándose que, la reducción de este tipo de contaminantes sería de 339,613 kg del total de contaminantes criterio con respecto a la línea base.

Figura 4.1.5 Reducción de Contaminantes Criterio (kg) PM, SO₂ y NH₃ a 2020. (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)

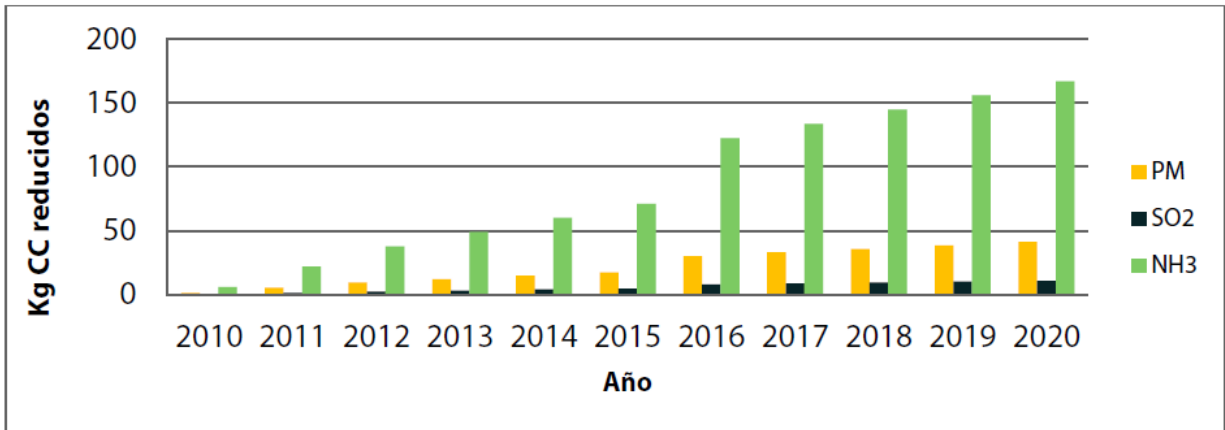


Figura 4.1.6 Reducción de Contaminantes Criterio (kg) NO_x, COT y COV a 2020 (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)

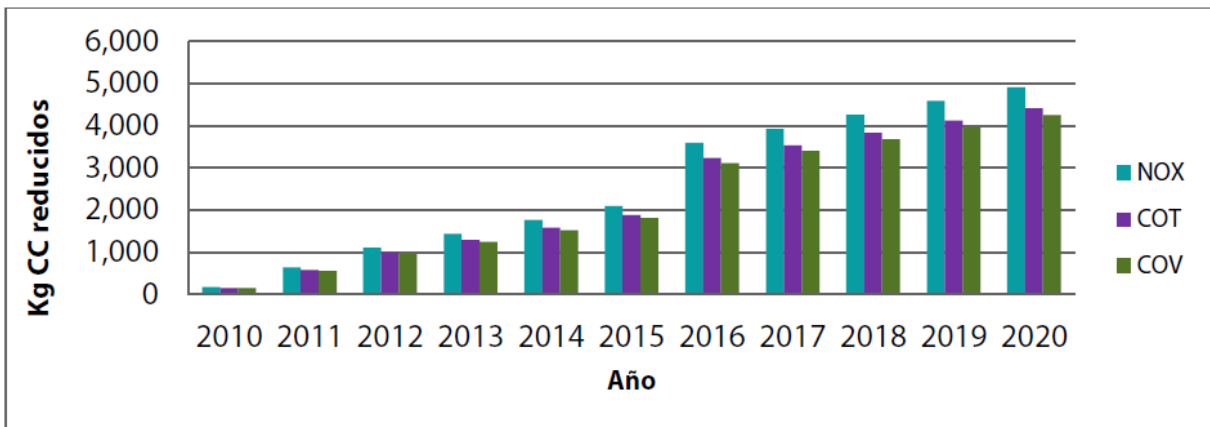
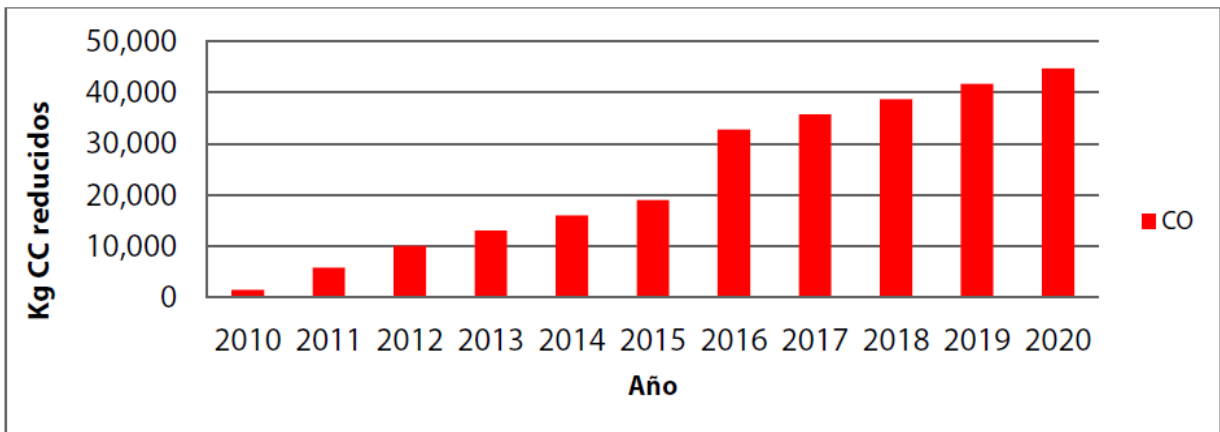


Figura 4.1.7 Reducción de Contaminantes Criterio (kg) CO a 2020 (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2013)



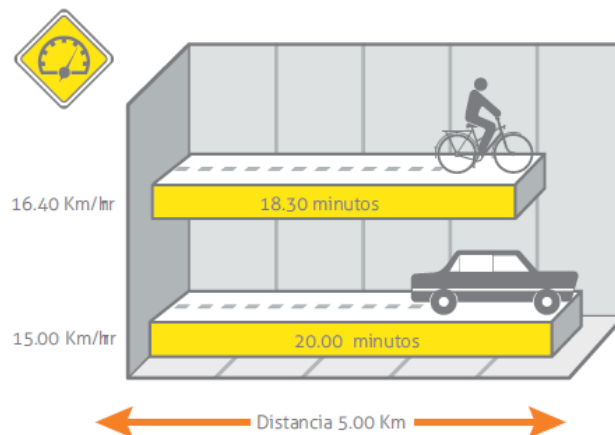
Del mismo modo se realizó una proyección para considerar el ahorro de tiempo de traslado. Se obtuvo como resultado una reducción global de 84 años lo que equivale a un ahorro económico de \$15,928,884.

5. Principios básicos de la infraestructura ciclista

La infraestructura vial ciclista es la combinación de vías para la circulación exclusiva o preferente de ciclistas como los son: intersecciones, puentes, túneles y otros elementos de infraestructura vial, así como dispositivos para el control de tránsito (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011). Las vías ciclistas deben garantizar el acceso a los destinos de forma continua, sin que haya necesidad de que el ciclista deba esperar para incorporarse o de que realice maniobras que los pongan en riesgo.

En varias ciudades alrededor del mundo se han realizado estudios donde se ha demostrado que la bicicleta es el modo de transporte más eficiente en recorridos de hasta cinco kilómetros. En el 2007 el Instituto Nacional de Estadística y Geografía realizó una Encuesta Origen-Destino, en el cual se determinó que la velocidad promedio de los viajes en bicicleta es de 16.4 km/hr (Figura 5.1), mientras que los recorridos en automóvil promedian una velocidad de 15 km/hr (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011).

Figura 5.1 (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



La bicicleta como vehículo para traslados cotidianos

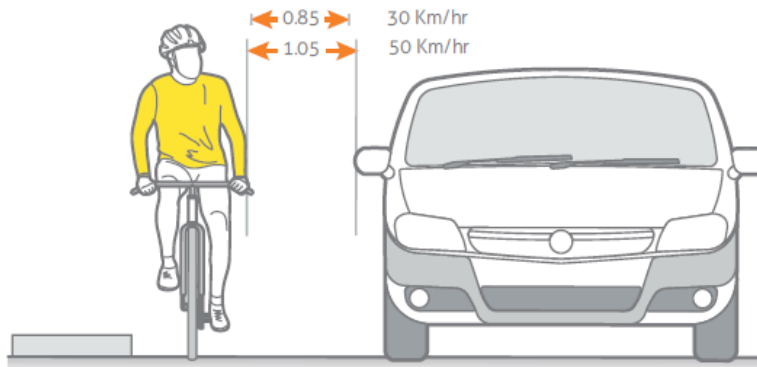
La bicicleta es un vehículo de tracción humana a pedales de bajo costo en su adquisición y mantenimientos, el cual además, es de bajo impacto urbano por el poco espacio que requiere para circular y estacionarse. También tiene la ventaja de que no emite contaminantes y el ruido que puede llegar a emitir es mínimo.

En zonas urbanas que cuentan con zonas predominantemente planas, los ciclistas pueden alcanzar velocidades de entre 15 y 20 km/hr, cuando deben transitar en pendientes ascendentes, su velocidad se reduce a 10 km/hr. En cambio, cuando circulan sobre pendientes descendentes llegan a velocidades de 40 km/hr.

Para el diseño de ciclovías debe considerarse que, para guardar el equilibrio, los ciclistas no circulan en trayectoria recta y por lo tanto, es necesario diseñar un ancho de carril que tenga un margen que permita a los ciclistas desplazarse lateralmente para no perder el equilibrio.

Estudios realizados en Países Bajos han demostrado que si los automóviles pasan a 30 km/hr junto a un ciclista, la distancia adecuada entre ambos es de 0.85 m, si la velocidad del auto aumenta a 50 km/hr, la distancia debe incrementarse a 1.05 m. (Figura 5.2)

Figura 5.2 Distancia para un rebase cómodo y seguro (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



5.1 Requisitos para una infraestructura ciclo-incluyente

Existen cinco requisitos para diseñar y construir una infraestructura ciclista adecuada, éstos son: debe ser coherente, directa, segura, cómoda y atractiva (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011). A su vez, existen cuatro niveles de infraestructura ciclista:

1. Red ciclista.
2. Sección de la vialidad.
3. Intersecciones.
4. Superficie de rodamiento.

La planeación y el diseño de la infraestructura ciclista siempre debe considerar tanto las necesidades de los usuarios como las características específicas del sitio.

Coherencia

Para que una vía ciclista sea coherente, debe presentar conexiones entre los orígenes y los destinos, de manera que los trayectos puedan ser continuos. Además la implementación y construcción de las principales vías deben corresponder con las rutas de mayor demanda para que la mayor cantidad de los recorridos en bicicleta estén cubiertos por las vías primarias. Por otro lado, la vía ciclista debe ser consistente, es decir, que no presente cambios en el ancho de la vía ni en los materiales con los que está hecho el pavimento, así también, las intersecciones similares deben ser diseñadas de la misma manera.

Rutas directas

El concepto de rutas directas incluye a todos los factores que influyen en el tiempo de viaje. Para poder trazar una ruta lo más directa posible, las demoras en las intersecciones deben ser cortas, la distancia del recorrido debe ser lo más corta posible, el ancho y alineación de la vía deben permitir una velocidad adecuada, no debe haber curvas

innecesarias, los ciclistas deben poder mantener su velocidad al cruzar intersecciones, el estado del pavimento debe ser de buena calidad tal que no reduzca la velocidad, entre otros factores. Debe tomarse en cuenta que, los ciclistas tienen poca tolerancia ante las desviaciones y los retrasos, por lo que si la ruta no provee una trayectoria cómoda, éstos buscarán otra ruta sin importar que los exponga a más peligros.

Seguridad

Al compartir el mismo espacio con los vehículos motorizados, los ciclistas se vuelven especialmente vulnerables, tanto por la poca protección que ofrece la bicicleta a los impactos como por la diferencia de velocidad que existe entre ellos. Esto se puede resolver parcialmente mediante la construcción de vías separadas físicamente o evitando los encuentros con vehículos motorizados. También se pueden crear zonas de tránsito calmado o reducir la velocidad de los automóviles en lugares de posible conflicto. Otra medida de seguridad a tomar en cuenta es la visibilidad, ya sea para que los ciclistas puedan ver todo el entorno de la ciclo vía y no verse sorprendidos por obstáculos o cambios de dirección, como también para que los conductores de vehículos motorizados tengan completa visibilidad de los ciclistas y les puedan ceder el paso con anticipación.

Comodidad

Este es un factor que determina en gran medida el nivel de atracción que presente el viaje en bicicleta comparado con los vehículos motorizados. Incluye desde los cuellos de botella, el estado del pavimento, ancho insuficiente o la falta de separación con los vehículos motorizados. Se debe trazar la ruta de manera que existan el menor número de obstáculos para los ciclistas, como por ejemplo, los autos estacionados. Otro elemento a considerar es el clima, a pesar de que en la Ciudad de México las condiciones climáticas son generalmente agradables para utilizar la bicicleta, es más comfortable utilizar la ciclo vía si ésta cuenta con protección contra los rayos del sol, la cual puede ser la misma vegetación de la ciudad.

La superficie de rodamiento tiene que ser lo más lisa posible así como evitar perfiles que provoquen encharcamientos de agua.

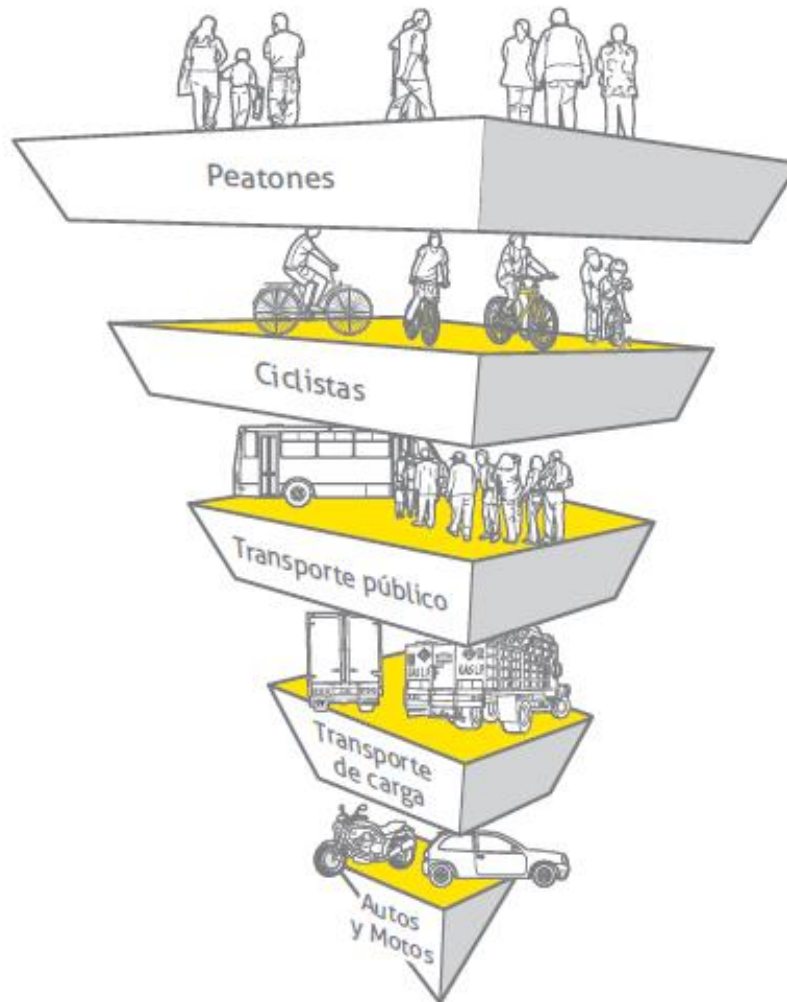
Rutas atractivas

Las rutas que resultan atractivas para los ciclistas suelen ser determinadas por factores subjetivos porque cada usuario tiene distintas prioridades. A pesar de esto, se ha detectado que, en general, para que una vía sea atractiva debe presentar una estética apropiada para disfrutar del trayecto y un entorno natural agradable. De preferencia se deben seleccionar rutas que pasen por áreas verdes que relajen y hagan del trayecto una experiencia fresca. La seguridad urbana se ha convertido en un rubro muy importante, ya que la inseguridad de ciertas zonas puede provocar que la ruta no se utilice.

Para que la infraestructura ciclista conviva de manera correcta con los la infraestructura establecida para los otros modos de transporte, se debe establecer una jerarquía de usuarios de manera tal que, los usuarios más vulnerables y/o los que lleven una velocidad

menor sean los privilegiados en cuanto a seguridad, comodidad y velocidad. De acuerdo a este criterio la asignación de recursos para mejorar la infraestructura debe ser de la siguiente manera:

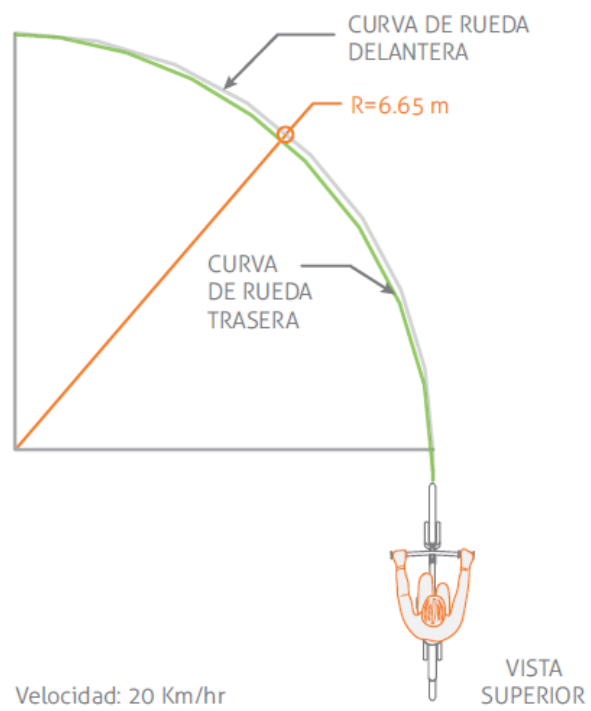
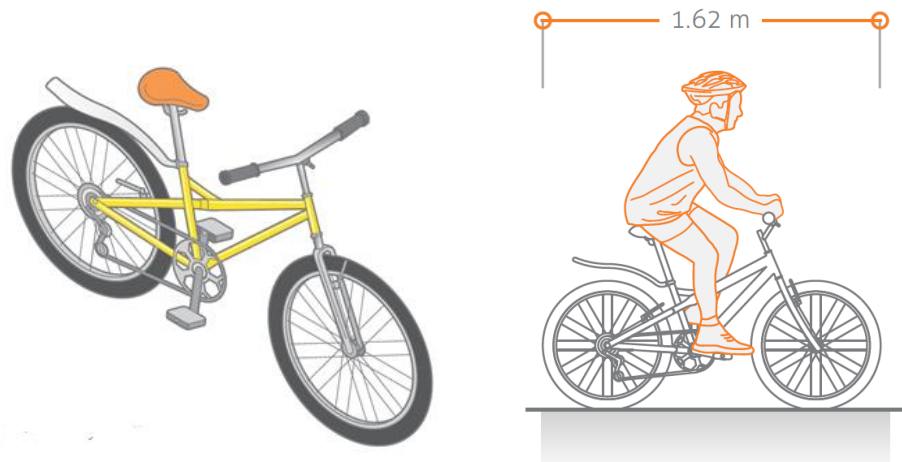
Figura 5.1.1 Jerarquía de usuarios (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



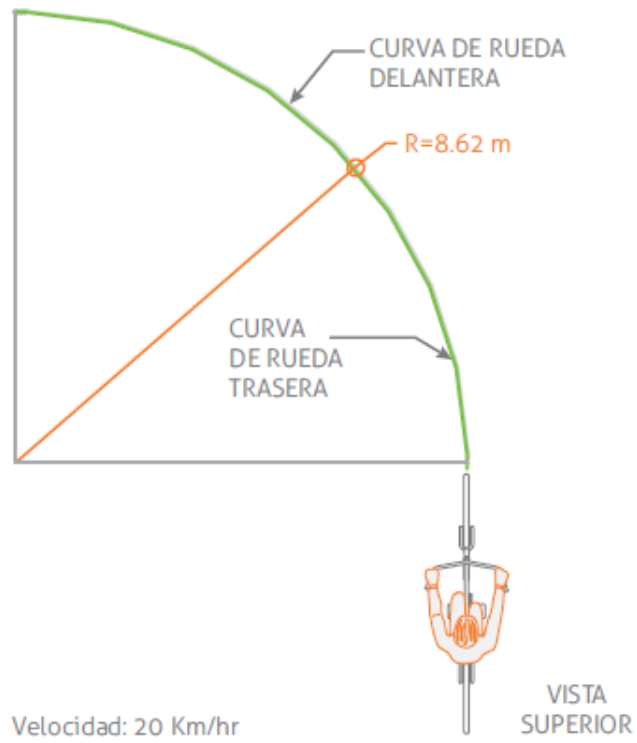
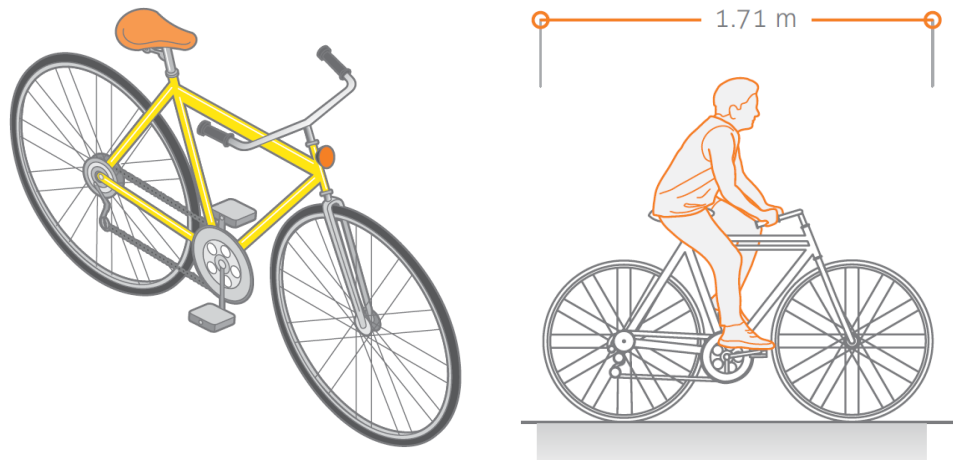
5.2 Tipos de bicicletas utilizadas en México

En México es muy común la utilización de bicicletas adaptadas para ciertas necesidades específicas y que llegan a tener diferentes velocidades que las usuales o que ocupan más espacio de lo normal. En la ciudad los tipos de bicicletas más usadas son (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

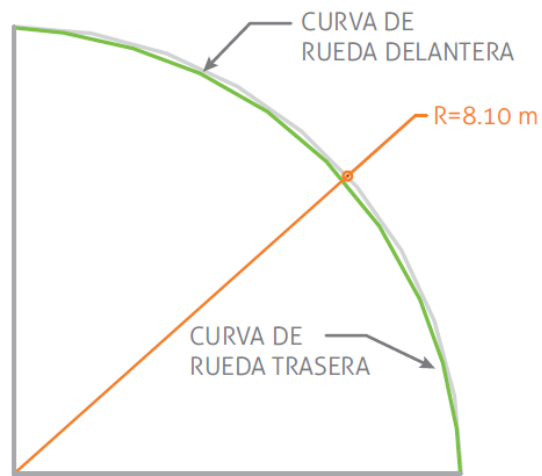
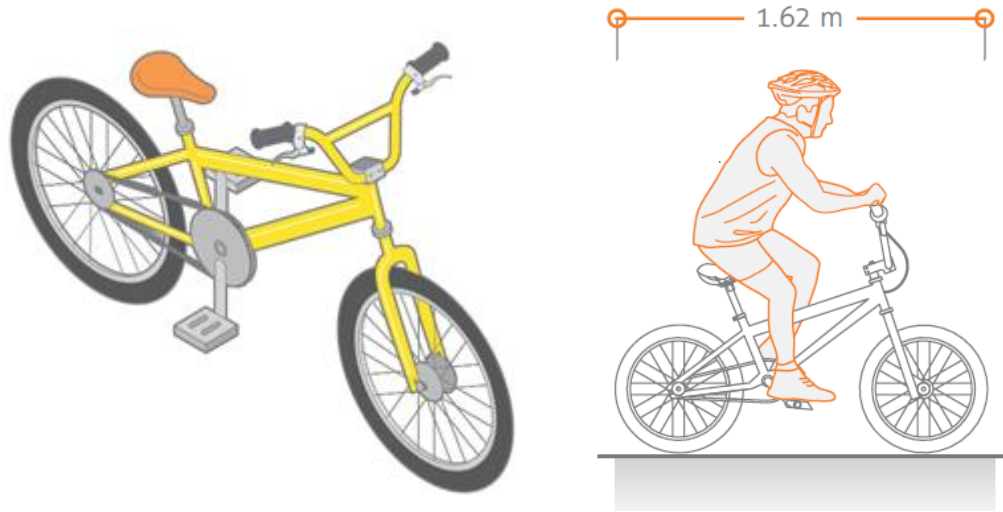
- De montaña (Figura 5.2.1)



- Para turismo (Figura 5.2.2)



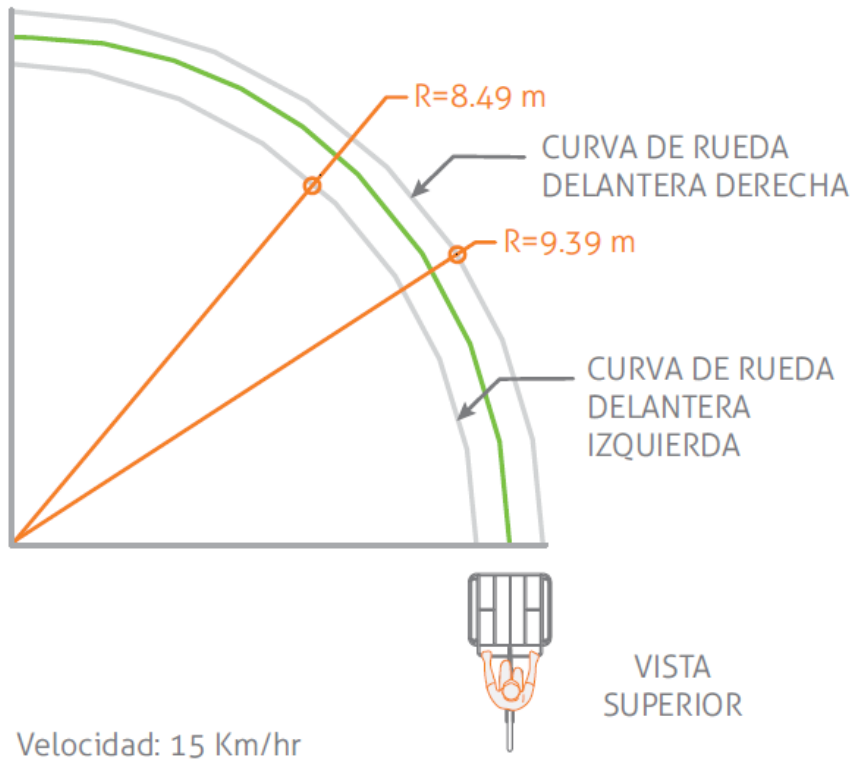
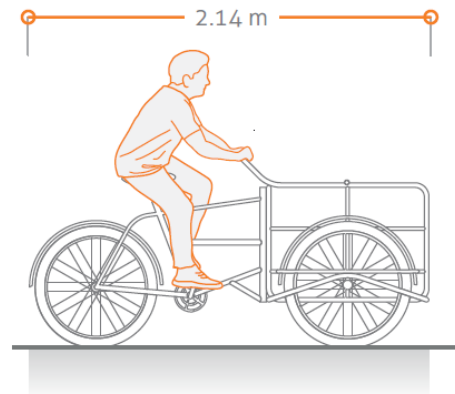
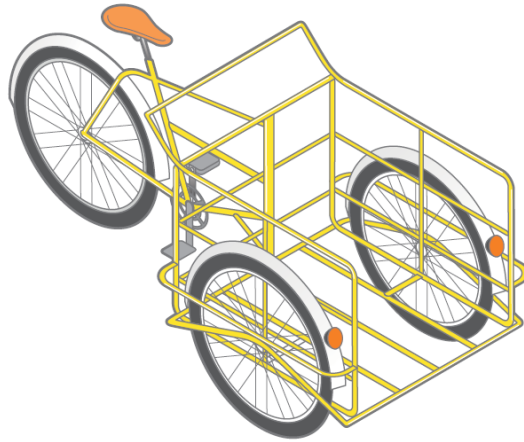
- BMX (Figura 5.2.3)



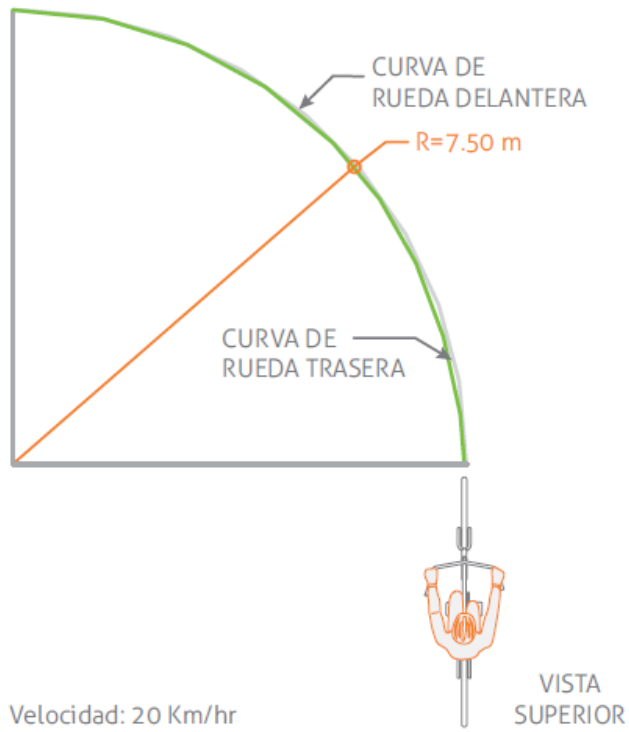
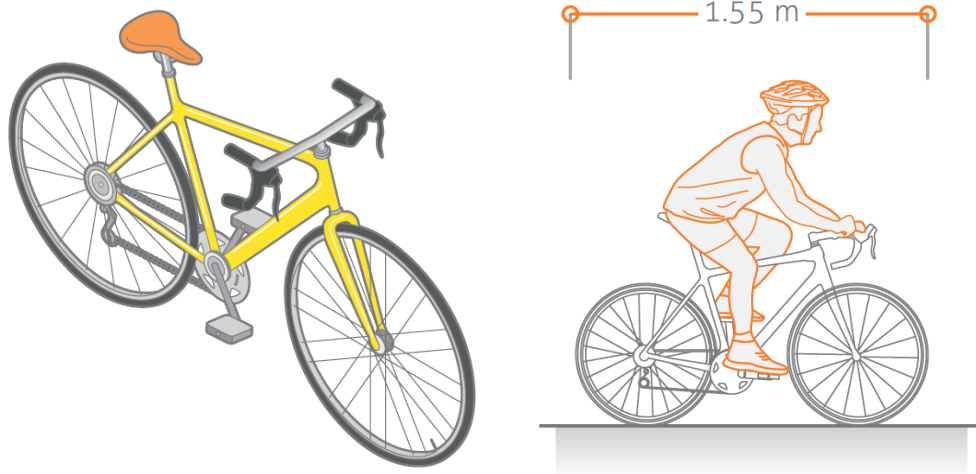
Velocidad: 20 Km/hr

VISTA SUPERIOR

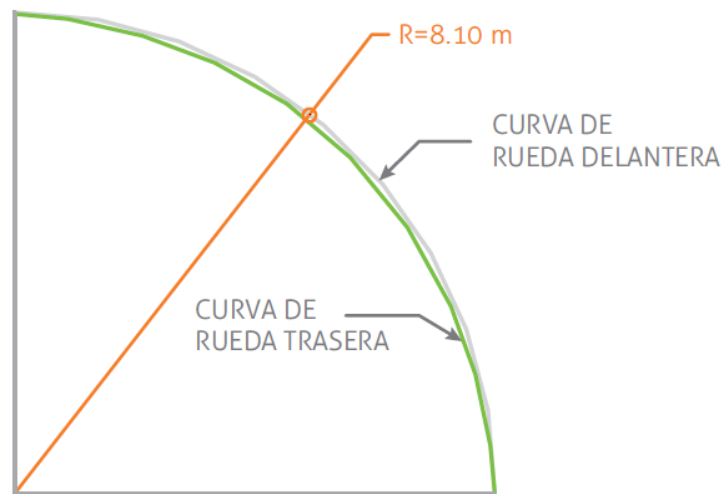
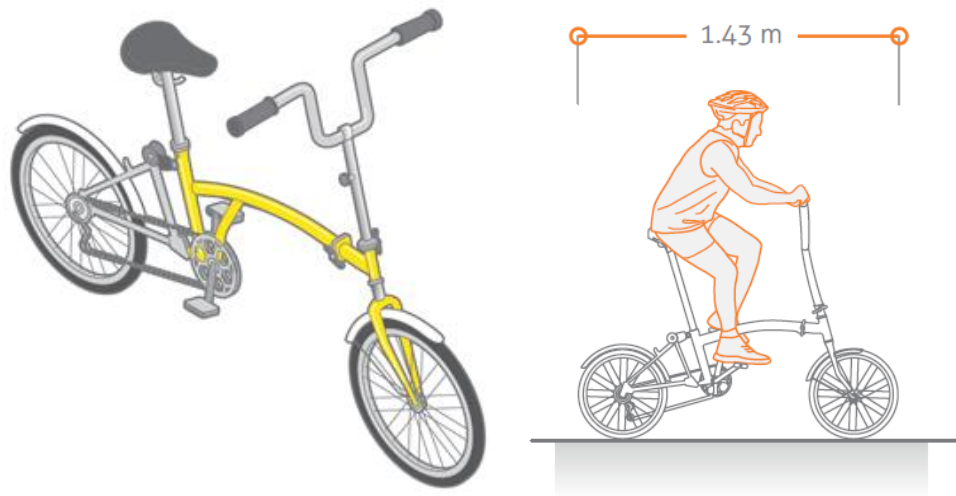
- Triciclo de carga (Figura 5.2.4)



- De ruta (Figura 5.2.5)



- Plegable (Figura 5.2.6)



Velocidad: 20 Km/hr



Obsérvese que, debido a las dimensiones y características de cada tipo de bicicleta, su radio de giro es diferente en cada caso y, por lo tanto, dependiendo del tipo de bicicleta

que se vaya a utilizar, las especificaciones técnicas de la infraestructura serán distintas, por lo que se debe encontrar una solución que integre a los distintos tipos de vehículos.

5.3 Diseño geométrico

Para lograr un diseño óptimo de propuesta de cualquier tipo de infraestructura vial, se deben seguir un procedimiento de diseño que consiste en cuatro pasos (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011):

- **Diseño conceptual:** Se refiere a realizar un estimado de costo y trazo de la vía que permita conocer los requerimientos en escala amplia del proyecto.
- **Diseño funcional:** Es un diseño con alcances medios para identificar la interacción entre los inmuebles, infraestructura actual y servicios públicos presentes en la zona de estudio.
- **Diseño preliminar:** Pretende llegar a una escala más pequeña que los diseños anteriores, esto involucra un trazo más detallado de la vía que se realizará.
- **Diseño final:** Se hace en una escala real, de tal manera que se pueda proveer una geometría exacta de los trabajos a realizar, así como una estimación de costos específicos de cada concepto necesario y los esquemas de construcción que permitan establecer un calendario de obra

Elementos del proyecto geométrico

Un proyecto geométrico del trazo de una vía cualquiera contiene los siguientes elementos:

- **Alineamiento vertical:** Se trata de una proyección del trazo de la vía sobre un plano vertical que permita definir los desniveles que se presentarán.
- **Alineamiento horizontal:** A diferencia del elemento anterior, en este caso la proyección de la vía se hace sobre un plano horizontal, con el cual se conocerá la trayectoria y curvas necesarias del proyecto.
- **Sección transversal:** Es un corte con respecto a un plano vertical que abarque el ancho de la vía y sus elementos adyacentes de manera que permita observar la disposición y dimensiones de los elementos desde la vista que tendrán los usuarios.

Velocidad de diseño

En un proyecto de construcción de una vialidad es indispensable establecer la velocidad a la que se espera circulen los vehículos para así, determinar el radio y peralte de las curvas y las distancias mínimas de visibilidad. En entornos urbanos como la Ciudad de México, es recomendable utilizar una velocidad de diseño de 30 km/hr, ya que proporciona un margen de seguridad pues la velocidad real con que circulan normalmente los ciclistas es de 20 km/hr.

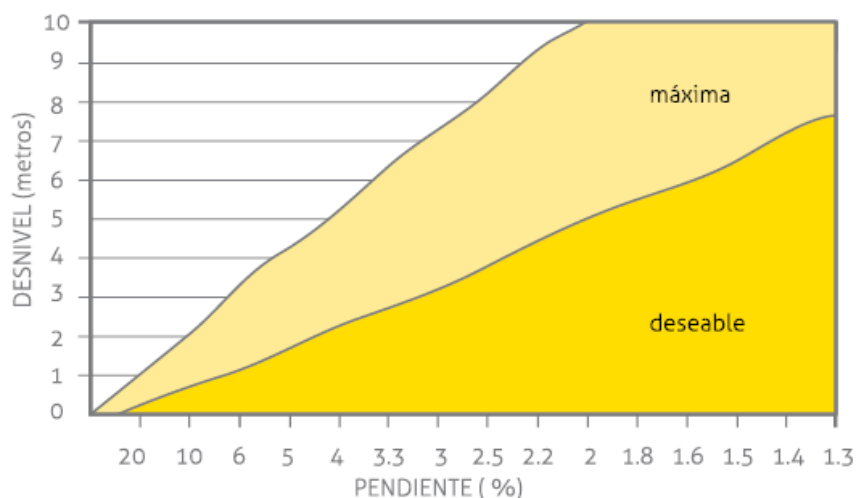
Pendientes

Para diseñar las pendientes se deben de considerar dos aspectos (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011):

- El esfuerzo para ascender.
- La seguridad en los descensos.

En el ascenso se debe considerar que algunos ciclistas irán en zigzag para mantener el equilibrio e inclusive algunos, optarán por bajar de la bicicleta y llevarla caminando lo que demanda un mayor ancho de vía. A continuación se presenta una gráfica (Figura 5.3.1) que indica las pendientes deseables y máximas que se deberán tener de acuerdo al desnivel que se presente.

Figura 5.3.1 (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Abordando el tema de la longitud, se debe considerar que una pendiente de 3% es muy aceptable para distancias largas sin que cause fatiga en los usuarios. Sin embargo, al llegar a una pendiente de 6% las distancias deberán de ser muy cortas pues requieren un esfuerzo considerable. Como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 5.3.2), la longitud permisible de las pendientes disminuye en función del crecimiento de la pendiente.

Tabla 5.3.2

Pendientes máximas	
3-6%	Hasta 500 m
6%	Hasta 240 m
7%	Hasta 120 m
8%	Hasta 90 m
9%	Hasta 60 m
10 %	Hasta 30 m
11-20%	Hasta 15 m

(Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

Peraltes y radios de curvatura

Un diseño adecuado de una vía ciclista debe considerar que, de acuerdo a la geometría del vehículo, la velocidad y la pericia del ciclista, será necesario tomar en cuenta un radio de curvatura que permita a la mayor cantidad de tipo de bicicletas tomar una curva sin que afecte en gran medida su velocidad y que, al mismo tiempo, permanezca la sensación de seguridad y comodidad en los usuarios. Debido al efecto de la fuerza centrífuga, que afecta a los vehículos al tomar una curva, se debe elevar la parte exterior de la curva, llamada peralte. Esta elevación no puede rebasar el valor de 12% pues se convierte en una inclinación muy pronunciada que puede provocar inseguridad en los usuarios. Se debe considerar también que, los ciclistas tienden a inclinarse para contrarrestar la fuerza centrífuga entre 15° a 20°. De acuerdo a este ángulo de inclinación y a la velocidad de diseño, se puede obtener el radio de curvatura mínimo con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{0.0079 V^2}{\tan \theta} \quad (\text{Ecuación 5.3.3})$$

Donde:

R= Radio de curvatura (m)

V=velocidad de diseño (km/hr)

Θ= Ángulo de inclinación

Sin embargo, para un diseño preliminar, se puede considerar un ángulo de inclinación de 20° fijo, por lo que la ecuación para calcular el radio mínimo de curvatura se convierte en función del peralte, velocidad de diseño y el coeficiente de fricción entre las ruedas y la superficie de rodamiento, de tal manera que la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$R = \frac{V^2}{127 (e + f)} \quad (\text{Ecuación 5.3.4})$$

Donde:

R=Radio de curvatura (m)

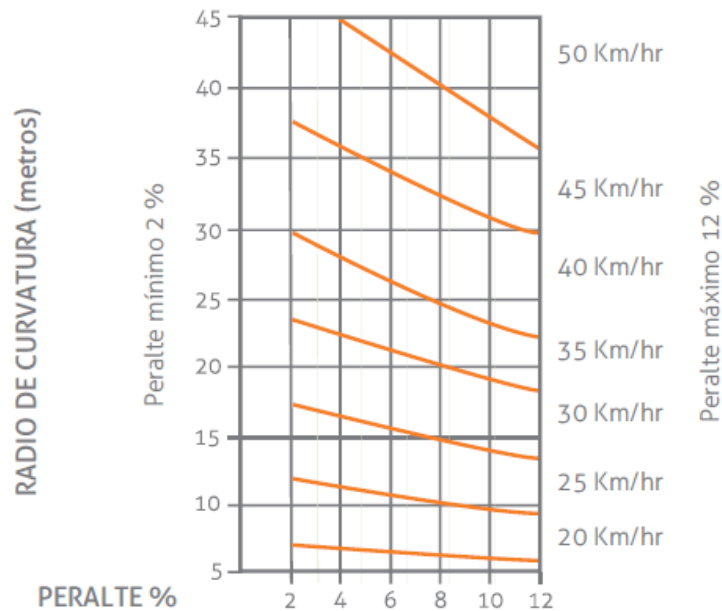
V=velocidad de diseño (km/hr)

e= peralte

f= coeficiente de fricción.

Sabiendo que, en la mayoría de los casos se usan superficies duras para las vías ciclistas, se puede asignar un coeficiente de fricción de 0.40. En la Figura 5.3.5 se han graficado los radios de curvatura mínimos para diferentes combinaciones de velocidad y de peralte.

Figura 5.3.5 (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Debe tomarse en cuenta también que, cuando un ciclista toma una curva estrecha, los ciclistas tienden a inclinarse, por lo que deberá diseñarse un sobreebanco que evite las colisiones y permita que los usuarios puedan tomar la inclinación necesaria para no accidentarse. A continuación, a manera de ejemplo, se muestra la tabla 5.3.6 con los sobreebanco requeridos de acuerdo a determinados radios de curvatura y considerando una pendiente entre 0% y 3%.

Tabla 5.3.6

Sobreebanco en el interior de la curva	
Radio de curvatura	Sobreebanco requerido (Pendiente entre 0% y 3%)
24 a 32 m	0.25 m
16 a 24 m	0.50 m
8 a 16 m	0.75 m
0 a 8 m	1.00 m

(Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

Distancia de visibilidad

Un factor especialmente importante para poder satisfacer la seguridad necesaria en cualquier tipo de vialidad es la distancia de visibilidad, es decir, la distancia que tendrá el usuario para percatarse de posibles obstáculos que los obliguen a disminuir la velocidad o a detenerse por completo. Esta distancia de visibilidad determina la distancia de frenado

para el diseño, la cual se toma en cuenta a partir del momento en que el usuario percibe el obstáculo en su trayectoria hasta que logra estar completamente detenido (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011). Para obtener la distancia de visibilidad, es necesario determinar el tiempo de percepción y reacción del ciclista, la pendiente de la vía, la velocidad de diseño y el coeficiente de fricción entre las ruedas de la bicicleta y la superficie de rodadura. Para fines de diseño, se ha concluido que un tiempo de percepción-reacción de 2.5 segundos y un coeficiente de fricción de 0.25 son adecuados para tomar en cuenta la incertidumbre del comportamiento de cada usuario. Con estos valores la distancia de visibilidad se puede obtener de la siguiente forma:

$$S = \frac{V^2}{255 (G + f)} + 0.694 V \quad (\text{Ecuación 5.3.7})$$

Donde:

S=Distancia de visibilidad (m)

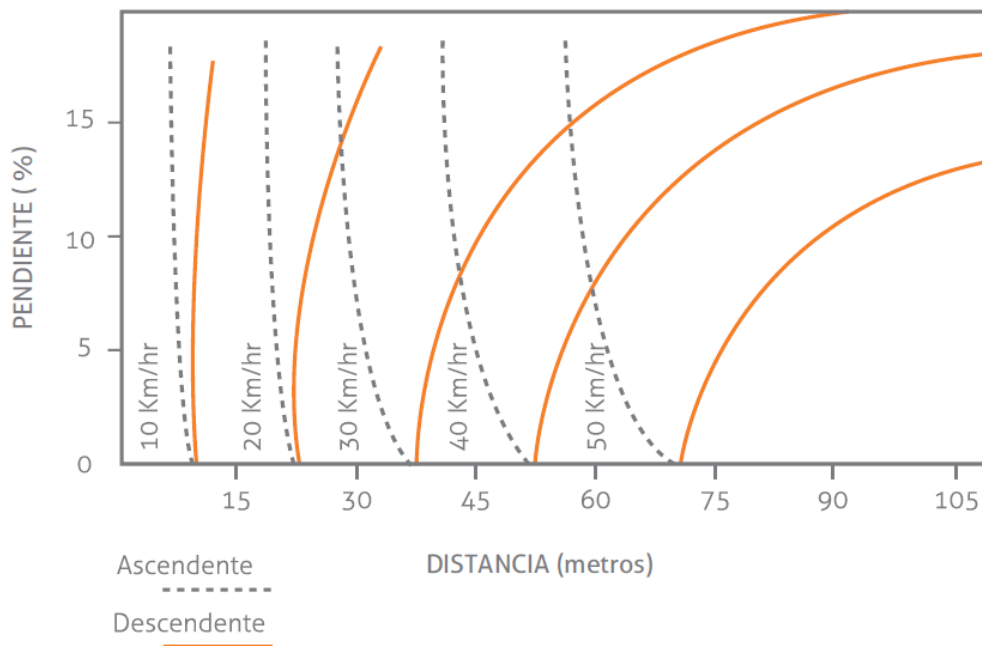
V=Velocidad de diseño (km/hr)

f=Coeficiente de fricción (0.25)

G=pendiente

Si se grafican los valores más utilizados para valores de diseño considerando las pendientes ascendentes y descendentes se obtiene la figura 5.3.8.

Figura 5.3.8 Distancias de visibilidad (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



En presencia de curvas se debe realizar un análisis diferente, ya sean curvas horizontales o verticales, pues se trata de elementos de la ruta donde hay un mayor riesgo de tener un accidente por la falta de visibilidad.

Distancia de visibilidad en curvas horizontales

Por la naturaleza de una curva vertical, la distancia de visibilidad se ve reducida en gran medida, por lo que debe proporcionarse un despeje lateral (figura 5.3.9). Este despeje se refiere a una zona libre de obstáculos para el campo visual haciendo un corte transversal en la vía de tal manera que los ciclistas puedan observar el final de la curva con una distancia que les permita reaccionar en caso de presentarse un obstáculo. Para obtener este despeje lateral se debe utilizar la ecuación 5.3.10:

$$M = R \left[1 - \cos \left(28.65 * \left(\frac{S}{R} \right) \right) \right] \text{ Ecuación 5.3.10}$$

Donde:

M=Despeje lateral (medido desde el centro de la línea del carril interior (m)

S=Distancia de visibilidad (m)

Radio en el centro del carril interior.

Nuevamente se han graficado diferentes valores requeridos de despeje lateral con determinadas combinaciones de distancia de visibilidad y pendientes (figura 5.3.11).

Figura 5.3.9 Despeje lateral (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

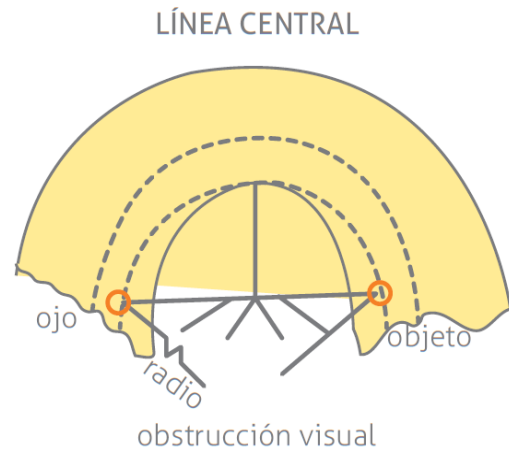
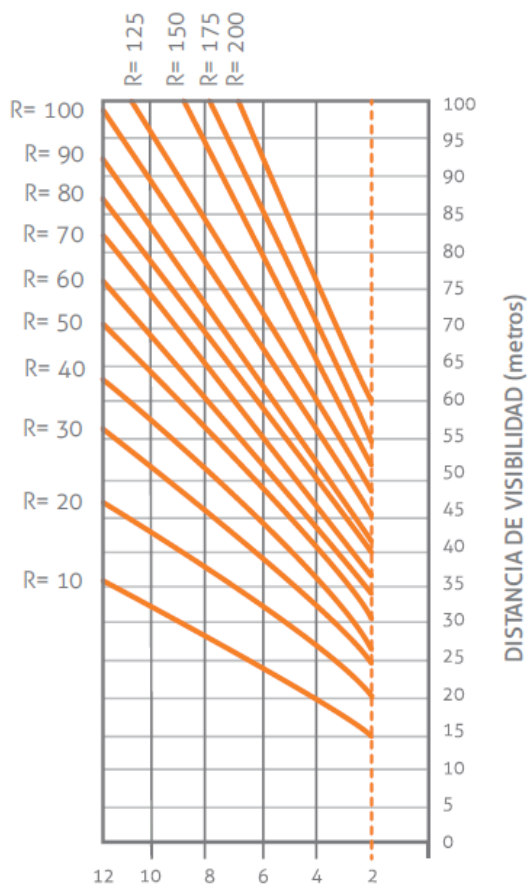


Figura 5.3.11 Despeje lateral (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Distancia de visibilidad en curvas verticales

En el caso de una curva vertical, se debe mantener una longitud adecuada que permita observar una buena proporción de la elevación y posterior cambio de pendiente. Esta distancia es función de la distancia de visibilidad y la diferencia algebraica entre las pendientes a cada lado de la cresta. Al hacer el cálculo no debe olvidarse que, la longitud de la curva no debe ser menor que 0.38 veces la velocidad de diseño.

$$L = 2S - \frac{200 h_1}{A} \quad \text{Ecuación 5.3.12}$$

Donde:

L=Longitud de la curva vertical (m)

S= Distancia de visibilidad (m)

h₁= Altura de los ojos del ciclista (1.40 m)

A=Diferencia algebraica de las pendientes = P₁ – P₂

P_1 = Pendiente de la tangente de entrada (m/m)

P_2 = Pendiente de la tangente de salida (m/m)

Intervenciones para convertir las vialidades en rutas más seguras para los ciclistas

En ciertas zonas donde predomine el tránsito local se pueden realizar cortes o adecuaciones a los sentidos de circulación para reducir los volúmenes vehiculares e incentivar los viajes a pie, en bicicleta y en transporte público. También se puede controlar el estacionamiento en vía pública mediante la prohibición total en ciertas zonas o cobrarlo, implementando algún sistema como los parquímetros.

Otra metodología es utilizar barreras físicas que provoquen el cierre total de la vialidad local, de manera tal que únicamente sea utilizada por los habitantes de la calle y se genere un ambiente propicio para utilizar la bicicleta.

Por otro lado, controlar la velocidad de los vehículos motorizados es un recurso muy utilizado en la ciudad para garantizar que se respete la normatividad aplicable. Para que la vialidad sea amigable con las bicicletas se recomienda reducir la velocidad de los autos a 30 km/hr, lo que permite que ambos tipos de vehículos compartan la infraestructura sin necesidad de construir carriles especiales. Existen dos opciones para controlar la velocidad (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011):

- Modificar la reglamentación para limitar la velocidad.
- Aplicar técnicas de diseño que impidan la circulación a velocidades mayores que la permitida.

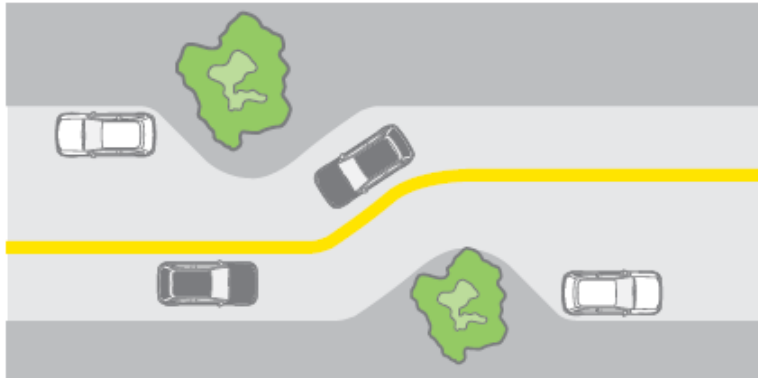
La selección de la mejor opción, dependerá del tipo de vialidad a tratar, por ejemplo, si se trata de una vía rápida es preferible aplicar rigurosamente un límite de velocidad reglamentado, pues resulta costosa y complicada la colocación de dispositivos reductores de velocidad. Para ciudades como la Ciudad de México, donde la normatividad no es muy respetada, se recomienda el uso de radares móviles. Por otro lado, si se trata de una zona residencial, la reducción de velocidad de dispositivos físicos es recomendable pues son zonas con bajos volúmenes vehiculares.

Una opción de modificación de la infraestructura para reducir la velocidad es cambiar el tipo de pavimento, ya que la sensación de un pavimento con poca fricción para el frenado provoca que los automovilistas sientan un mayor riesgo de provocar un accidente. Un ejemplo claro es el adoquín, suele ser usado en zonas residenciales o turísticas donde las calles son más estrechas y existe una presencia considerable de peatones y ciclistas. Otra opción son las superficies blandas, es decir las que son hechas con materiales granulados, sin embargo, resultan ser muy incómodas para los peatones y ciclistas por lo que no se recomienda su uso si lo que se pretende es incentivar este tipo de viaje.

Circulación en zigzag

Al construir una avenida en trayectoria sinuosa que provoque la circulación en zigzag, los vehículos motorizados se ven obligados a reducir la velocidad para seguir con trayectoria de la vía (figura 5.3.13). También se puede lograr esto modificando las zonas de estacionamiento.

Figura 5.3.13 Trazo en de una vía en zigzag (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

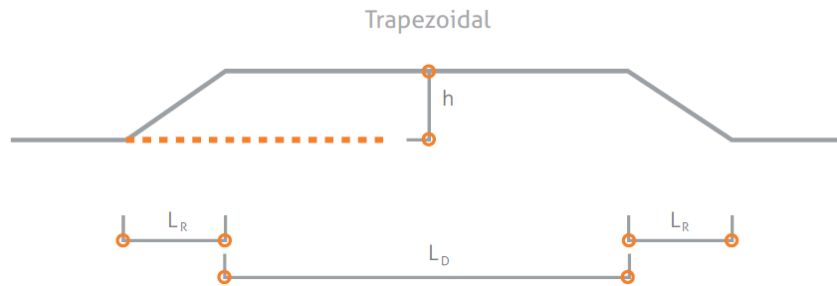


Reductores de velocidad

Se trata de uno de los recursos más exitosos para disminuir la velocidad, que se han aplicado vastamente en la ciudad. A pesar de existir una gran variedad de reductores, todos comparten la característica de crear incomodidad y riesgo de dañar el automóvil si se pasa sobre ellos a altas velocidades. Debe tomarse en cuenta que, este tipo de elementos, debe de ir acompañado de la señalización horizontal y vertical pertinente para dar previo aviso a los conductores y que éstos puedan disminuir la velocidad gradualmente sin ponerse en riesgo.

Los cruces peatonales elevados o también llamados lomos, son elevaciones de la vía en zonas donde previamente existía un cruce peatonal (Figura 5.3.14). De esta manera se obliga a los autos a disminuir la velocidad en ese punto forzándolos a dar la preferencia de paso a peatones. El diseño no debe ser demasiado agresivo para los ciclistas ni para los autobuses ni tampoco deberá provocar que los vehículos de emergencia se tengan que detener por completo.

Figura 5.3.15 Diseño estándar de un lomo (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



En la tabla 5.3.16 se muestran como referencias las dimensiones recomendadas en Dinamarca para lomos de perfil trapezoidal.

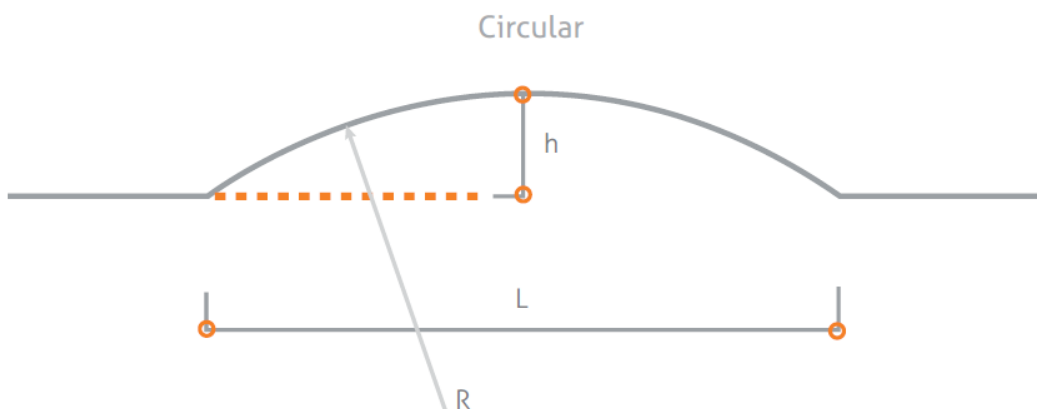
Tabla 5.3.16

Velocidades de diseño (km/hr)	20	30	50
Altura (m)	0.10	0.10	0.12
Longitud de la rampa (m)	0.70	1.00	2.40
Gradiente de las rampas	14%	10%	2.5%
Longitud del desarrollo (m)	4.00	4.00	5.2

Con las dimensiones señaladas, los vehículos que sobrepasen en más de 5 km/hr las velocidades de diseño sufrirán cierta incomodidad (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011).

Los topes son un tipo de lomos con forma circular (figura 5.3.17), con el inconveniente de que obliga a los autos a prácticamente tener que detenerse por completo. Su uso no es recomendable a menos que se busque el efecto previamente descrito. En caso de que sea necesaria la implementación de un tope, se puede dejar un área libre junto a las guarniciones que permita la libre circulación de las bicicletas sin detenerse por el tope.

Figura 5.3.17 Diseño estándar de un tope (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Nuevamente se muestran en la tabla 5.3.18 como referencias las dimensiones recomendadas en Dinamarca para lomos cilíndricos o de perfil circular (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

Tabla 5.3.18

Velocidades de diseño (km/hr)	20	30	50
Altura (m)	0.10	0.10	0.10
Radio (m)	11.0	20.0	113.0
Longitud de la cuerda (m)	3.00	4.00	9.50

(Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

Otro recurso que suele ser utilizado en zonas residenciales son los vados (figura 5.3.19). Éstos son un tipo de lomo inverso y al igual que los lomos trapezoidales son muy efectivos para reducir la velocidad, aunque es necesario cuidar que no se presenten encharcamientos.

Figura 5.3.19 Vado en zona residencial (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



También existen los dispositivos llamados cojines (figura 5.3.20). Son pequeños montículos con espacios entre ellos, los cuales se instalan a todo lo ancho de la calle. Tienen la gran ventaja de que permiten el paso de bicicletas, autobuses o algunos vehículos de emergencia sin que tengan que reducir la velocidad (figura 5.3.21). Además, sus costos son menores que los otros tipos de reductores de velocidad y su eficacia es muy similar. Para permitir el paso de los vehículos de emergencia, los cojines deben ser calculados en base a las dimensiones de éstos. Pueden ser de asfalto, concreto e inclusive materiales plásticos.

Figura 5.3.21 Dimensiones de cojines (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

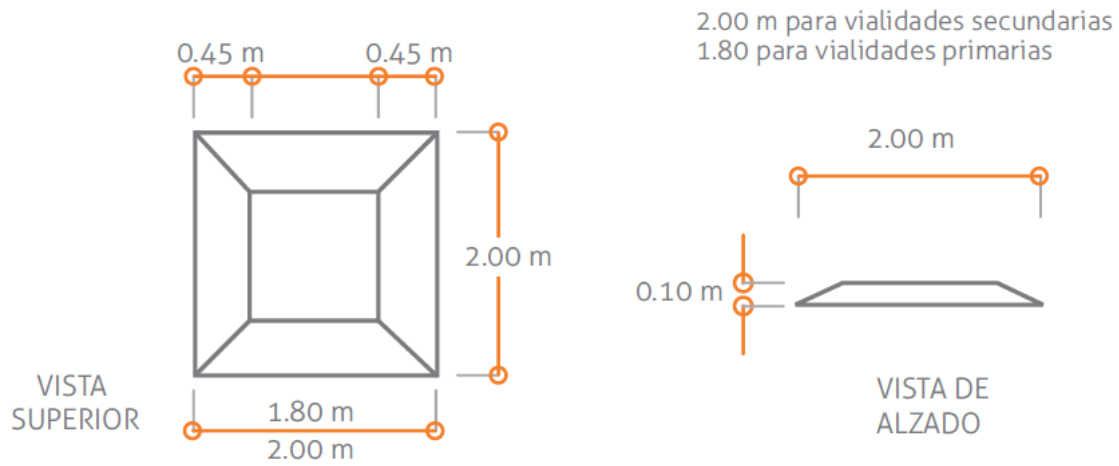
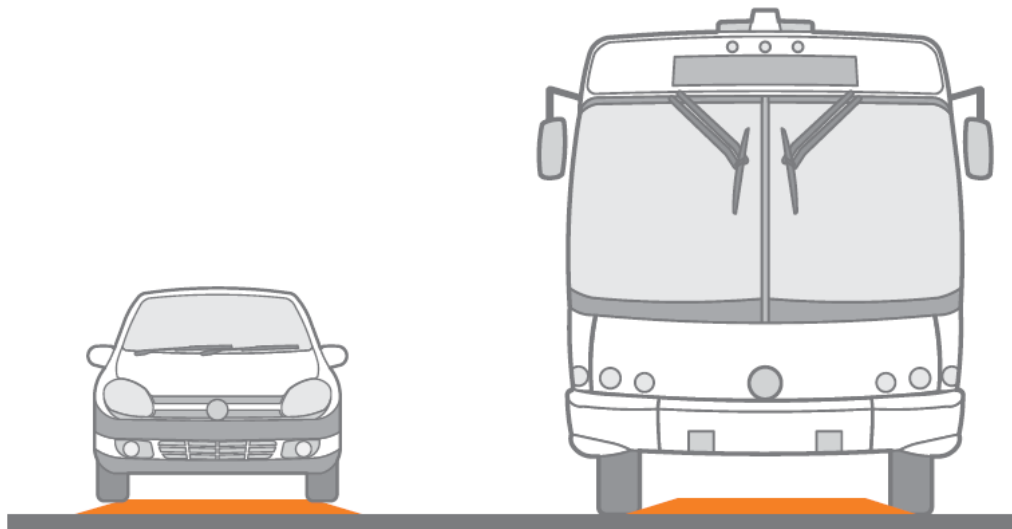


Figura 5.3.22 Efecto del cojín en diferentes tipos de vehículos (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

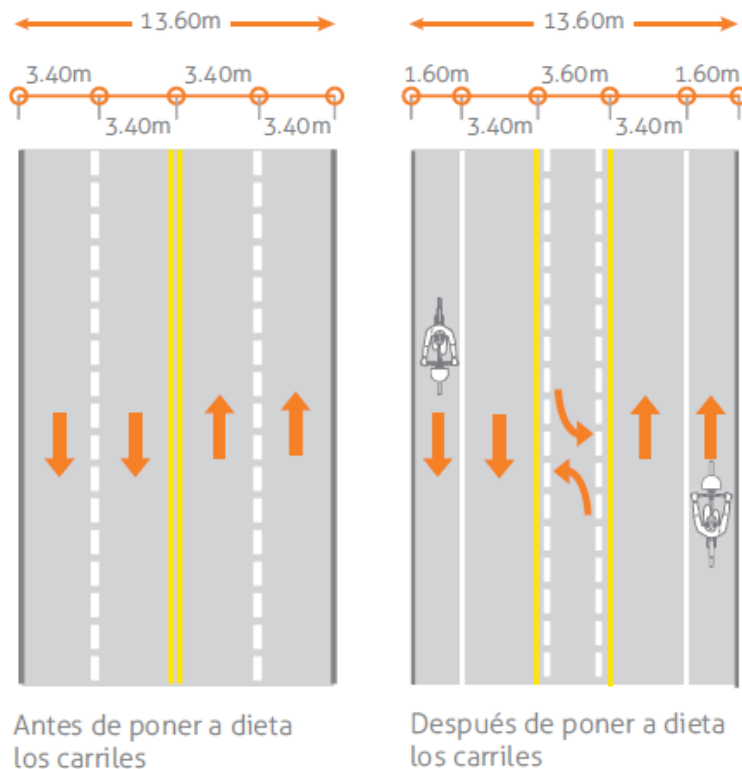


Los vibradores son un tipo de reductores, que más que reducir la velocidad, se utilizan para recordar a los automovilistas que deben reducirla. Se forman por resaltes o rugosidades en el pavimento generando vibración y ruido que alertan a los conductores. Este elemento no es muy recomendable para la ciudad pues es bien sabido que a pesar del recordatorio de los límites de velocidad, éstos no suelen ser respetados.

Redistribución del espacio de la vialidad

Como consecuencia de la mala planeación, el espacio público de las vialidades es ocupado casi en su totalidad por los automóviles, por lo que en muchas ocasiones se debe replantear el espacio para incluir a los peatones y a los ciclistas. El espacio que cada tipo de vehículo necesita para una adecuada circulación es proporcional a su tamaño y velocidad, es por esto que los autos ocupan tanto espacio de vialidad en un parámetro de kilómetro por pasajero. Para alcanzar una recuperación del espacio vehicular se utiliza un método llamado “dieta de calle” (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011). Éste consiste en reducir el espacio de circulación vehicular motorizado y proporcionarlo a los peatones y ciclistas, tomando en cuenta que también se puede utilizar el carril central para acumulación de vueltas izquierdas (Figura 5.3.23). A pesar de que en un principio parecería un método contraproducente, la capacidad total no disminuye en gran medida y al incentivar el uso de la bicicleta se disminuyen los períodos de congestión. Además, presenta la ventaja de tener un costo mínimo, pues en muchos casos sólo se requiere repintar la distribución de carriles.

Figura 5.3.23 Ejemplo para poner calle “a dieta” (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Un último recurso que se puede aplicar es una política de estacionamientos controlada donde se reasigne el espacio que ocupan los autos estacionados en vía pública, ya sea para bici estacionamientos o para áreas verdes. Hay que recordar que el estacionamiento gratuito es uno de los factores que puede fomentar el uso del automóvil, por lo que el control de éstos debe de ir acompañado de una política de

mejoramiento del transporte público y de las condiciones que tendrán ciclista y peatones en las rutas que deban recorrer.

Criterios de selección de infraestructura ciclista

Para poder comenzar a pensar en un diseño de algún tipo de infraestructura vial se deben conocer las principales características que tiene la vialidad que se pretende implementar. Los criterios de selección de infraestructura vial ciclista dependen de los siguientes factores:

- La vialidad existente que se seleccionará será de acuerdo a su tipo (arteria, colectoras o de acceso⁷), volumen y velocidad de los vehículos motorizados.
- La intervención a realizar debe garantizar la comodidad y seguridad de los usuarios ciclistas.
- Asegurarse de que la geometría de la vialidad existente permita destinar el espacio necesario a los anchos establecidos para los carriles ciclistas.

En ciertas vialidades será posible integrar a los ciclistas sin segregarlos por completo de los demás vehículos, ya que el ancho de vialidad y la velocidad que alcanzan los vehículos motorizados serán adecuados para que los ciclistas se sientan seguros para transitar.

Otro elemento importante a considerar es si el diseño será unidireccional o bidireccional. El diseño bidireccional se refiere a que los dos sentidos de circulación ciclista se encuentran en un mismo cuerpo vial, buscando concentrar a los ciclistas en un solo lado de la vialidad (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011). El diseño bidireccional generalmente se implementa sobre el camellón central o sobre las banquetas de manera que los ciclistas puedan realizar las maniobras necesarias para circular minimizando los riesgos de sufrir algún accidente con los vehículos motorizados. Sin embargo, en el diseño bidireccional se debe poner especial atención con las intersecciones, pues debido a la naturaleza de las vialidades, los ciclistas pueden llegar a circular en sentido contrario y para los conductores de los vehículos motorizados resulta más difícil percatarse de ellos.

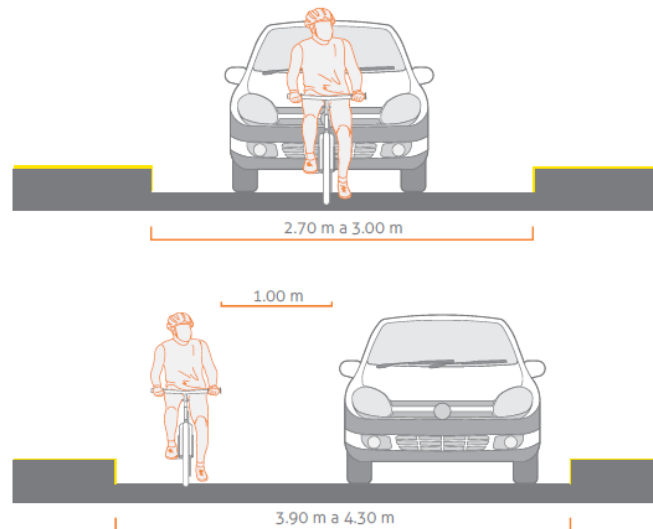
Infraestructura ciclista compartida

Debido a que gran parte de la red vial de las ciudades corresponde a vialidades de tránsito local, donde se circula a 30 km/hr, las velocidades y volúmenes de los autos son compatibles con los ciclistas. Sin embargo, hay ciertos aspectos de geometría y seguridad que se deben revisar para asegurar una plena convivencia de los distintos medios de transporte (Figura 22). El ancho de carril requerido para que los autos puedan rebasar con seguridad a los ciclistas es de 3.90 a 4.30 metros como se muestra en la siguiente figura 5.3.24. En caso de no poder proporcionar este ancho, es preferible reducir que esta dimensión sea de entre 2.70 y 3.00 m, pues de esta manera no hay posibilidad de que los

⁷ Las vialidades conocidas como arterias forman el sistema que mueve a toda una ciudad y tienen la función de conectarse con el sistema de autopistas y de conectar los principales puntos de la ciudad. Las vialidades colectoras sirven como enlace entre las zonas residenciales y las arterias. Las vialidades de acceso o locales son aquellas que llevan a los habitantes hasta sus residencias (Facultad de Ingeniería UNAM, 2010).

autos realicen un rebase que ponga el riesgo a los ciclistas y éstos a su vez podrán circular por el centro del carril.

Figura 5.3.24 Dimensiones recomendadas para carriles con o sin rebase (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Vialidad compartida ciclista

Cuando, por los bajos volúmenes de vehículos motorizados, hay posibilidad de darle prioridad a la circulación ciclista de modo que se comparta la vialidad con los autos, ésta

Figura 5.3.25 Ejemplo de vialidad compartida ciclista (www.labicikleta.com)



se convierte en vialidad compartida ciclista (figura 5.3.25). En este caso las vías que presentan más facilidades para esta intervención son las colectoras o de acceso donde las velocidades no rebasan los 30 km/hr. Se recomienda también que, por lo menos el carril de prioridad ciclista no sea de más de 3 metros de ancho pues de esta manera los autos no podrán hacer rebases forzosos y tendrán que cambiar de carril.

Para poder considerar este tipo de infraestructura hay que tomar en cuenta que ésta funciona adecuadamente cuando las vialidades están conectadas en varios puntos de tal manera que los ciclistas puedan encontrar rutas directas que hagan de la bicicleta una opción viable y rápida para transportarse en la zona. Además, es necesario que

existan vialidades adecuadas para que el tránsito pesado circule por ellas y se minimice la convivencia con los ciclistas.

Existen cinco elementos a considerar para este tipo de infraestructura (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011):

1. Señalización vertical: Señalamientos informativos indicando a todos los vehículos que la vía es de tránsito compartido para tomar las debidas precauciones.
2. Señalamiento horizontal: Marcas en el pavimento indicando que los ciclistas tienen prioridad de paso.
3. Tratamiento de intersecciones: Instalar dispositivos que favorezcan la circulación continua o que aseguren los cruces sin riesgos para ciclistas.
4. Pacificación del tránsito: Implementación de técnicas y de elementos que obliguen a los vehículos motorizados a respetar los límites de velocidad establecidos.
5. Desviación de tránsito: Si es factible, se pueden implementar algunos elementos que puedan desviar el tránsito que no sea local a otras vialidades primarias.

Para fines comparativos, a continuación se enlistan las ventajas y desventajas de este tipo de vialidad:

Ventajas:

- Funciona como ruta alternativa a vialidades primarias donde es más complicado hacer intervenciones que privilegien la infraestructura ciclista.
- Es sencilla de aplicar y de bajo costo.
- Mejora la calidad de vida de la zona al reducir el tránsito y el ruido.

Desventajas:

- Los ciclistas inexpertos pueden tener una gran sensación de inseguridad por la cercanía de los autos y se pueden resistir a utilizarla.

Carril compartido ciclista

Se trata de un sólo carril donde los automotores y los ciclistas comparten el espacio sin olvidar la preferencia que se debe otorgar a las bicicletas (Figura 5.3.26). Se deben de implementar en los carriles de extrema derecha y en el sentido de circulación establecido en la vialidad. Las vías susceptibles a intervenir son las arterias y vías colectoras donde las velocidades no deben rebasar los 50 km/hr. En este caso, a diferencia de la

Figura 5.3.26 Ejemplo de carril compartido ciclista (www.milenio.com)



vialidad compartida ciclista, los carriles de circulación deben de tener un ancho de entre 3.90 y 4.30 metros, de tal manera que los automóviles puedan realizar los rebases dejando aproximadamente 1.00 metro de distancia con el ciclista. En el caso de que se permita el estacionamiento en la vía, se deberá contemplar un espacio de 0.5 metros entre los autos estacionados y la circulación de bicicletas para evitar accidentes con la apertura de puertas de los autos.

Los elementos que requiere este tipo de carril son los siguientes:

- Redistribución del espacio vial: Se tiene que ajustar el ancho de carriles de la vía de modo que se satisfaga el requerimiento previamente mencionado.
- Señalización vertical: Con fines informativos para todos los usuarios de la vía, se deberán colocar señalamientos que indiquen la naturaleza del carril y que todos tomen sus precauciones necesarias.
- Tratamiento de intersecciones: Se deberán colocar áreas de espera para los ciclistas para permitirles un arranque preferente.
- Control de velocidad: De ser posible, se tendrán que colocar reductores de velocidad que disminuyan la circulación a 30 km/hr.

Por otro lado las ventajas que ofrece este tipo de infraestructura son las siguientes:

- El espacio de circulación para los ciclistas es cómodo y bastante seguro.
- La implementación es rápida y económica.
- Puede servir como proceso de educación a los automovilistas para que estén conscientes de la circulación de ciclistas y que se acostumbren a manejar con precaución y cediendo el paso a los usuarios más vulnerables.

Las desventajas que se presentan son:

- Al seguir siendo infraestructura compartida con los automóviles, se torna difícil atraer a ciclistas inexpertos a utilizarla.
- Es complicado supervisar que todos los autos respeten la normatividad y que no pongan en riesgo a los ciclistas.

Infraestructura ciclista delimitada

Ciclocarril

Es una franja dentro de la vialidad que se destina al uso exclusivo de los ciclistas para que circulen en el sentido de la vialidad (Figura 5.3.27). Se delimitan en el costado derecho de la vía mediante el pintado de una raya doble en el límite izquierdo del carril. Las vías que tienen potencial para esta infraestructura son las arterias y vías colectoras con velocidades máximas de 50 km/hr, el ancho mínimo del carril ciclista

Figura 5.3.27 Ejemplo de ciclocarril
(www.elarsenal.net)



debe ser de 1.50 metros.

Los elementos para la implementación de un ciclocarril son:

- Redistribución del espacio vial: Ajustar los anchos de carril o en su caso, eliminar un carril de circulación o de estacionamiento.
- Señalamiento vertical: Indicando que el carril es de uso exclusivo de los ciclistas.
- Señalamiento horizontal: Mediante la colocación de pintura o marcas en el pavimento para delimitar el ciclocarril en ambos extremos.
- Tratamiento de intersecciones: Colocar áreas de espera para ciclistas tanto para permitir un arranque prioritario o para girar a la izquierda.

Ventajas:

- Costo bajo y poco tiempo de implementación.
- Resulta más atractiva para usuarios nuevos que las opciones anteriores.

Desventajas:

- Al no tener ninguna barrera física, es muy fácil que los autos invadan en ciclocarril.
- Algunos ciclistas, al observar un carril exclusivo, aumentan su velocidad de circulación y disminuyen las precauciones necesarias.

Infraestructura ciclista segregada

También llamada ciclo vía unidireccional, es un carril exclusivo para la circulación de ciclistas, con la característica de que está físicamente separada del arroyo vehicular (figura 5.3.28). Las vialidades que pueden ser sujetas a una intervención de este tipo son

Figura 5.3.28 Ejemplo de ciclo vía unidireccional
(www.obrasweb.com)



las arterias y vías colectoras, las cuales presentan velocidades de entre 50 a 70 km/hr. El ancho de carril de la ciclo vía debe ser de mínimo 2.00 metros y hasta 4.00 metros dependiendo del número de usuarios previsto. Se deberán colocar elementos de confinamiento con un ancho mínimo de 0.50 metros con rayas dobles pintadas sobre el pavimento. Existen varios elementos que se pueden utilizar para la segregación de vehículos, como las

guarniciones, elementos prefabricados, elevación del pavimento o algún elemento de vegetación. Los puntos que necesitan cumplirse para integrar una ciclo vía son:

- Ajustar los anchos de carril o eliminar un carril de circulación o estacionamiento para asignarlo a la ciclo vía.

- Señalamiento verticales indicando al existencia de la ciclovía y restringiendo al circulación de motocicletas en este espacio.
- Colocación de elementos de confinamiento físico y raya doble para delimitar el carril exclusivo. En caso de permitirse el estacionamiento en la vía pública, se debe dejar un espacio de 0.50 m para apertura de puertas.
- En las intersecciones es necesario colocar área de resguardo para los ciclistas, tanto para el arranque prioritario como para permitir el giro a la izquierda. Se deberá pintar el área de cruce ciclista en las intersecciones, de modo que los diferentes tipos de usuarios sepan por dónde deben circular.

Ventajas que presenta:

- Percepción de comodidad y seguridad suficiente para que los ciclistas menos experimentados la utilicen.
- Obliga a los vehículos motorizados a respetar el espacio ciclista.
- Mejora la imagen de la zona.
- Permite a los ciclistas conducir con mayor facilidad a una velocidad más alta sin que implique mayores riesgos.

Desventajas:

- La implementación es más costosa y requiere más tiempo para su realización.
- Es muy probable que los automovilistas se opongan a este tipo de infraestructura, pues en muchos casos, reduce la capacidad de la vía.
- Resulta complicado encontrar vialidades que cumplan con las características necesarias para recibir una ciclovía.

Infraestructura ciclista de trazo independiente

Son vialidades exclusivas para circulación ciclista, con la peculiaridad de que su trazo se diseña totalmente apartado de las vialidades para los vehículos motorizados y donde no se necesita una redistribución de la vía, además de que suelen ser bidireccionales (figura 5.3.29).

Figura 5.3.29 Ejemplo de vía ciclista de trazo independiente (revistaazimut.com)



Las áreas donde se suelen construir estas vías son áreas verdes, zonas federales, áreas naturales protegidas, entre otras, las cuales deben proveer un entorno amigable y agradable para transitar. También es posible implementar este tipo de vías en camellones, siempre y cuando no haya más de una intersección cada 500 metros y el ancho de la avenida no sea mayor de 3 carriles para permitir el cruce seguro de los ciclistas. Además, al construir una ciclovía bidireccional en camellones, es probable que sea invadida por peatones y convertirse en un espacio obsoleto. El ancho del carril debe ser entre 2.60 y 4.00 metros, dependiendo el número de usuarios. En este caso en particular, se debe analizar si el trazo que se le dé a la vía provocará que también sea usada por peatones. En dicho caso, es necesario considerar un espacio de circulación peatonal con un área de amortiguamiento de 2.00 metros respecto a la vía ciclista.

En este caso se requieren los siguientes elementos para una correcta implementación:

- Señalamientos indicando la existencia de la ciclovía y de la restricción de paso a motocicletas.
- Pintado de raya separadora de sentidos de circulación y delimitadora del espacio de circulación.
- En las intersecciones se deberán colocar o pintar marcas en el pavimento indicando el cruce ciclista. En caso de que la vía se coloque junto a una vialidad para automóviles, se tendrá que considerar una franja que separe a los dos elementos.

Ventajas:

- Es una opción altamente viable cuando se pretende conectar una o más zonas suburbanas o zonas suburbanas con urbanas.
- Presenta condiciones ideales para realizar viajes con fines turísticos o recreativos.

Desventajas:

- Su implementación es más costosa y requiere un plazo mayor de tiempo.
- Al ubicarse en zonas despobladas, se debe cuidar que el derecho de vía se respete y que se garantice la seguridad de los usuarios.
- El mantenimiento puede ser más complejo por su extensión y por las condiciones de las zonas en donde se ubica.

Conflictos con la infraestructura para el transporte público

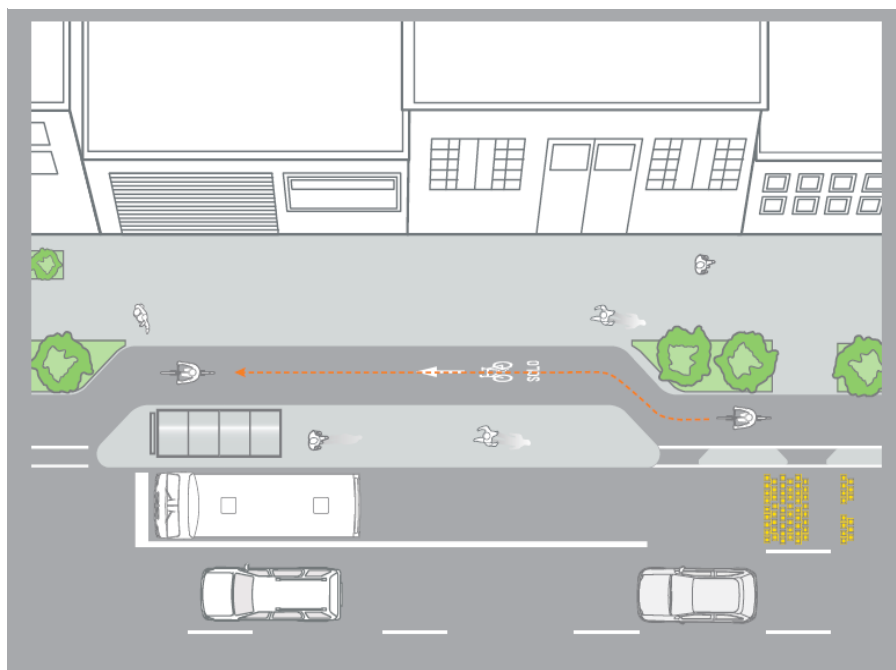
Por restricciones del espacio disponible para implementar cualquier tipo de infraestructura ciclista, en varias ocasiones se presentan zonas de conflicto entre los diferentes usuarios de la vía, especialmente con el transporte público, pues estos dos tipos de transporte suelen circular en el carril de extrema de derecha.

Es muy común encontrarse con que el trazo de la vía se sobrepone al espacio utilizado por el transporte público para hacer las paradas de ascenso y descenso de pasajeros, por lo que se debe escoger alguna opción que resuelva el conflicto de espacio y de circulación.

Parada de transporte público con desvío ciclista

Esta opción es recomendable cuando el mobiliario que integra a la parada del transporte público se pueda colocar sobre la trayectoria de la ciclovía pues consiste en desviar dicha trayectoria de manera que los ciclistas se vean obligados a rodear la parada para posteriormente volverse a incorporar al trazo de la vía (figura 5.3.30). Esta opción permite que el transporte público y sus pasajeros realicen las maniobras necesarias para su circulación sin interponerse al camino de los ciclistas. Cabe mencionar que, esta opción requiere de un amplio espacio de banqueta de manera que aún con el desvío de la circulación ciclista, no se invada el área de circulación peatonal.

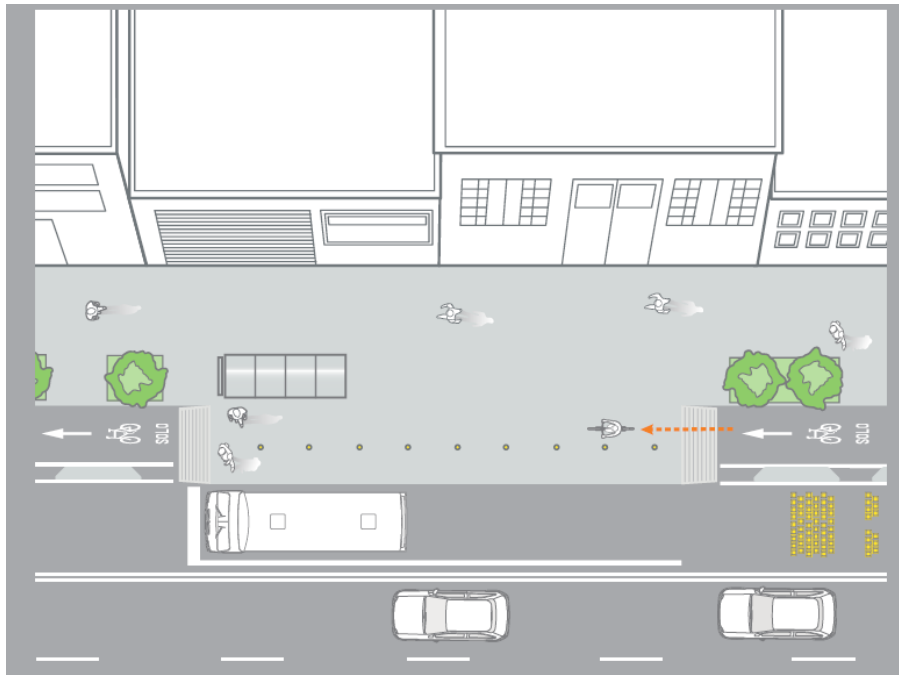
Figura 5.3.30 Diseño del desvío ciclista por una parada de transporte público (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Parada de transporte público con área compartida peatón-ciclista

Esta alternativa se basa en la elevación del carril ciclista a nivel de banqueta, de manera que se forma una especie de oreja para que los pasajeros del transporte público puedan acceder a él (figura 5.3.31). Debido a estas características, no es necesario modificar la ubicación del mobiliario de la parada, sin embargo, considerando la preferencia de paso de los peatones, los ciclistas tendrán que reducir su velocidad o detenerse por completo entorpeciendo su circulación.

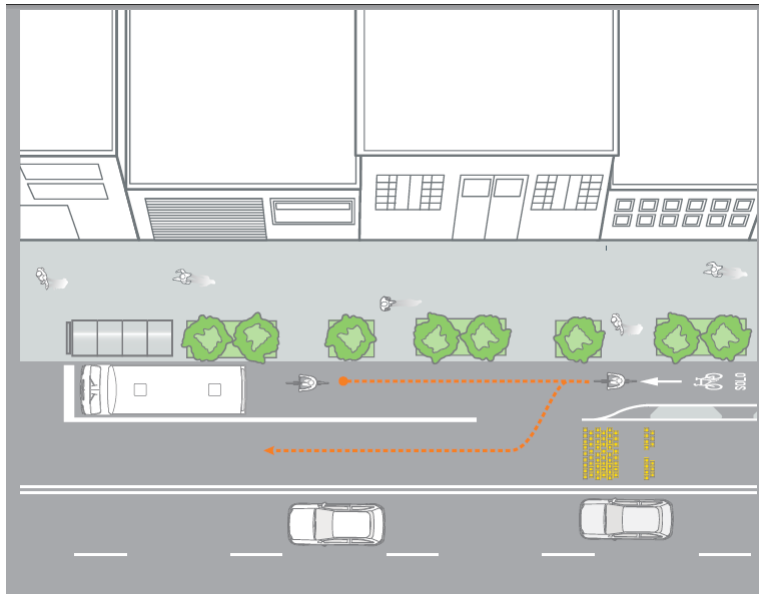
Figura 5.3.31 Diseño de una parada de transporte público con área compartida peatón-ciclista (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Parada de transporte público con bahía compartida bus-bicicleta

Esta solución requiere que se interrumpa el confinamiento del carril ciclista para permitirle a las unidades del transporte público aproximarse a la zona de ascenso y descenso de pasajeros. Esto obliga a los ciclistas a detenerse en caso de encontrarse algún vehículo del transporte público realizando maniobras (figura 5.3.32). Al igual que la opción anterior se tiene la ventaja de que no se debe mover la posición del parabús, pero resulta ser una opción riesgosa, pues las unidades del transporte público se aproximan a la parada desde puntos que resultan difíciles de observar por los ciclistas.

Figura 5.3.32 Diseño de una bahía compartida bus-bicicleta (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Carril ciclista compartido con transporte público

Es un carril preferente para la circulación ciclista donde el espacio es compartido con el transporte público (figura 5.3.33). Por esta naturaleza de este carril se deben ubicar en el extremo derecho de la vialidad. Esta opción ha resultado sumamente exitosa para evitar la invasión del carril por parte de los automóviles, pues por las dimensiones de los autobuses, los conductores evitan las maniobras prohibidas. Además, cuando se trata de un carril de contraflujo, los automóviles son más conscientes de esta condición y se aumenta la seguridad de los ciclistas. Esta es una excelente alternativa cuando se requiere respetar el espacio destinado a vehículos motorizados, añadido al bajo costo y facilidad de implementación.

Figura 5.3.33 Ejemplo de carril compartido con transporte público (www.logismarket.es)



Las vías que presentan condiciones para ser intervenidas son las arterias y vías colectoras que cuenten con un carril exclusivo para el transporte público en el extremo derecho y/o en contraflujo. Los carriles deberán tener un ancho de entre 4.30 m a 4.60 m para permitir el rebase entre los usuarios y los autobuses. Es importante resaltar que los carriles mayores a 4.60 no son recomendables pues al ser un espacio más amplio, pueden invitar a los autos a invadir el carril. También se debe tomar en cuenta que este tipo de carril requiere que existan elementos de confinamiento acompañados de raya doble pintada para separar el carril. Además de que en varios casos se deberá redistribuir el espacio o número de carriles para darle al carril compartido las dimensiones necesarias.

Carriles ciclistas en vías con sistema de autobuses de tránsito rápido

Cuando exista una avenida donde se coloque un sistema de autobuses de tránsito rápido (P ej. Sistema de Metrobús), es muy frecuente encontrarse que los ciclistas usen el carril destinado para estos autobuses, pues aprovechan el bajo volumen de autobuses entorpeciendo la circulación del transporte público y exponiéndose a accidentes muy graves. Por este motivo, es necesario colocar infraestructura ciclista que evite la invasión del carril exclusivo para autobuses. Por la naturaleza de las avenidas con autobuses de este tipo, se recomienda implementar ciclovías unidireccionales por cada sentido a lo largo del corredor (figura 5.3.34). En caso de que, por cuestiones de espacio no sea posible utilizar esta alternativa, es conveniente convertir un carril por sentido en carril compartido para dar preferencia a la circulación de los ciclistas (Figura 5.3.35).

Figura 5.3.34. Implementación de ciclovías unidireccionales en una avenida con sistema de autobuses de tránsito rápido (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

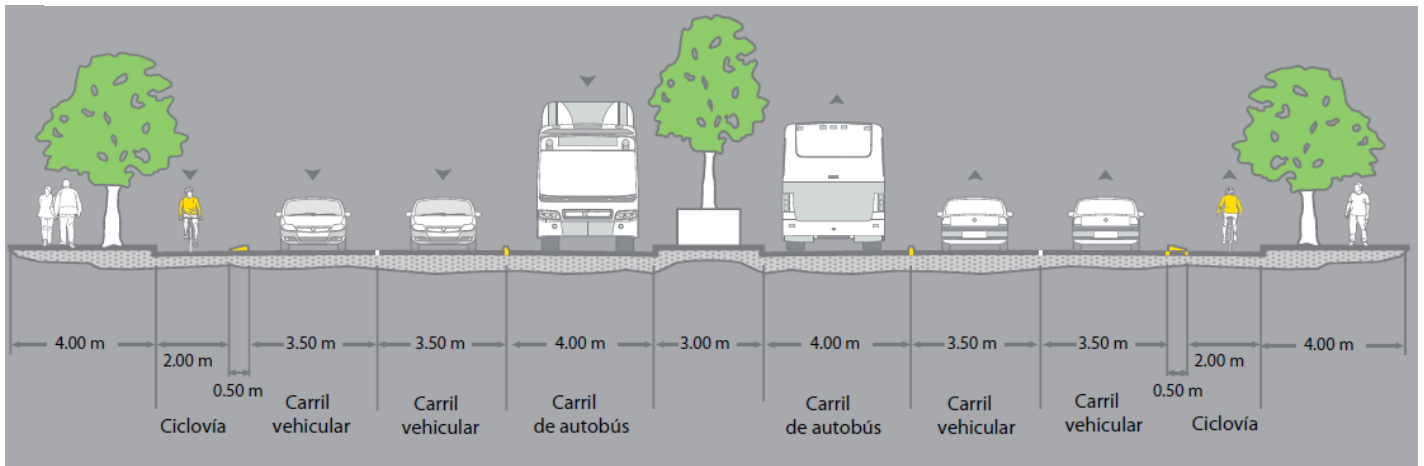
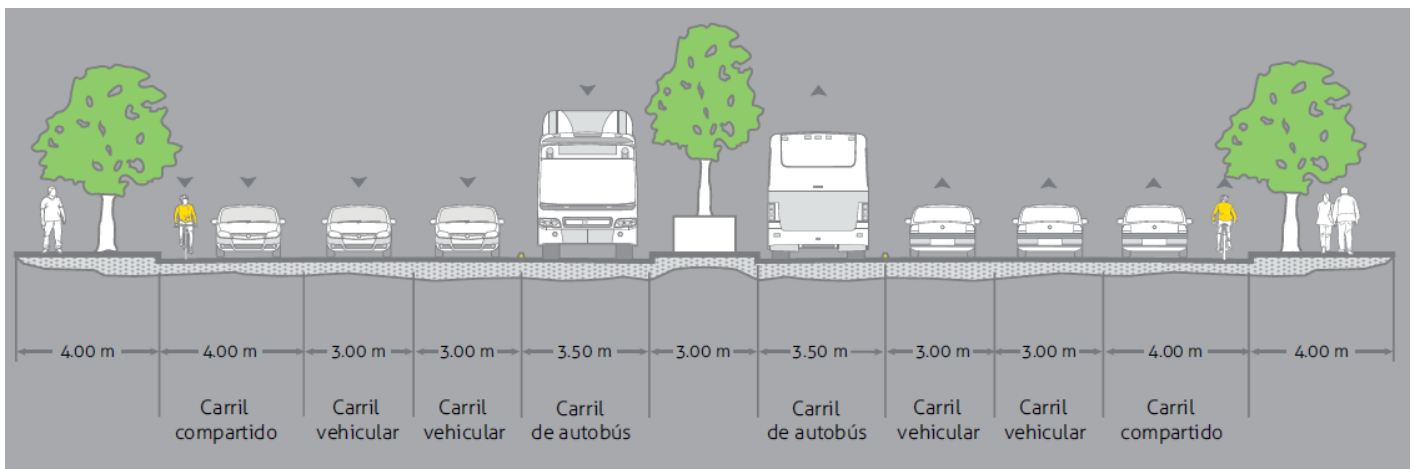


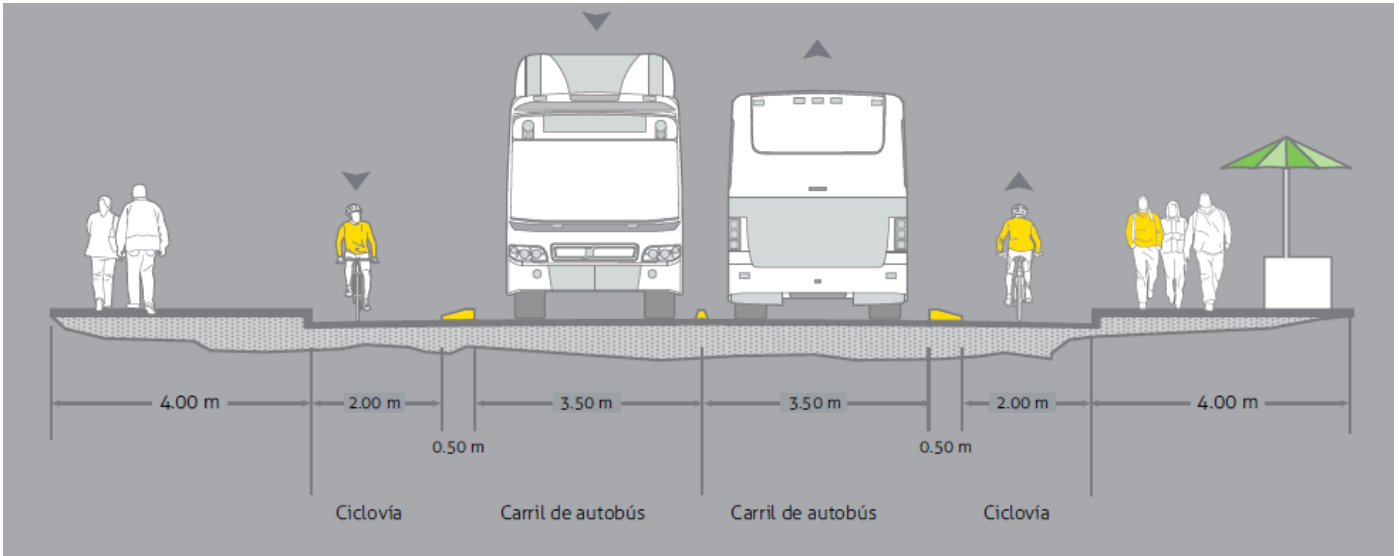
Figura 5.3.35 Implementación de carril compartido en avenida con sistema de autobuses de tránsito rápido (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Calles de transporte público y no motorizado

Se trata de una opción sumamente efectiva cuando lo que se pretende es incentivar el uso del transporte público y la bicicleta, ya que consiste en, restringir por completo la circulación a los vehículos motorizados particulares y adecuar la vía de tal manera que tanto los peatones, ciclistas y unidades del transporte público tengan el espacio suficiente para circular sin contratiempos ni riesgos de colisión. En la figura 5.3.36, se aprecia que esta opción tiene la ventaja de no necesitar grandes dimensiones en el ancho total de la vía, además de que, si se coloca en zonas turísticas o comerciales se incrementa la actividad económica del área. Para garantizar una convivencia segura entre todos los usuarios, la velocidad de los vehículos de transporte público deberá ser limitada a un máximo de 30 km/hr.

Figura 5.3.36 Diseño de una calle exclusiva para el transporte público y los vehículos no motorizados (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Tratamiento de intersecciones

Las intersecciones son el elemento más complejo de las vialidades cuando se trata de la convivencia de varios tipos de vehículos y la seguridad de los usuarios. Como referencia, se sabe que en Estados Unidos se reporta que del 40% al 60% de los accidentes ciclistas suceden en las intersecciones (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011).

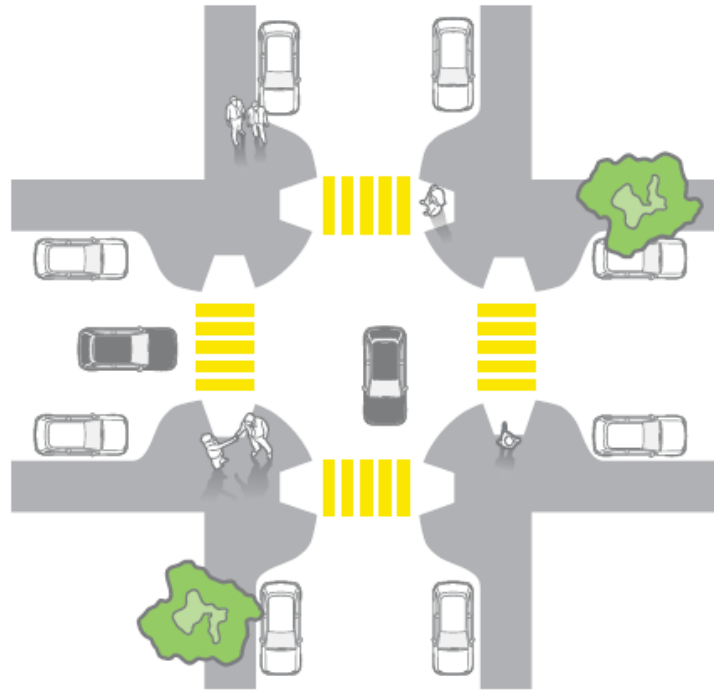
Con base en varios años de estudios se ha concluido que existen ciertos elementos que disminuyen el riesgo de accidentes para los peatones y ciclistas, entre los más destacados se encuentran:

1. Reducción de distancia de cruce peatonal y ciclista.
2. Reducción de velocidad de los vehículos.
3. Mejoramiento de condiciones de velocidad.

Para integrar adecuadamente estos elementos a las intersecciones existen varias opciones de modificación.

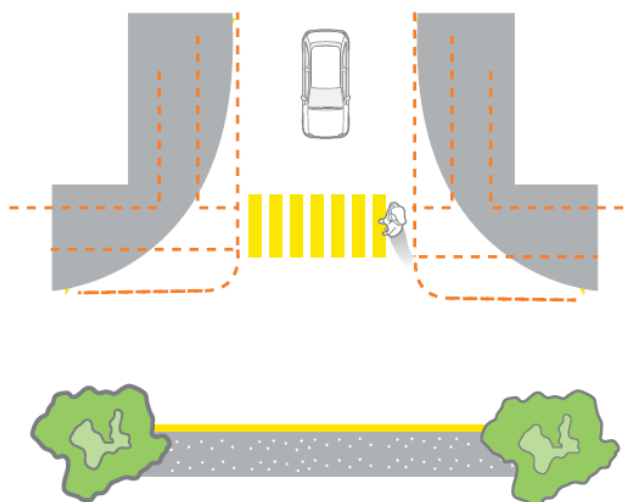
Las orejas son extensiones de la banqueta en las esquinas donde usualmente se estacionan los últimos autos de la cuadra (Figura 5.3.37). Estas orejas permiten disminuir la distancia de cruce peatonal y al mismo tiempo mejoran la visibilidad de los conductores.

Figura 5.3.37 Intersección con orejas (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



Un recurso similar es la modificación de los radios de giro, ya que éstos pueden tener un gran impacto en el comportamiento de peatones y conductores (figura 5.3.37). Este comportamiento sigue el principio básico de que entre menor sea el radio de giro, menor deberá ser la velocidad de los autos al girar y mayor será la condición de seguridad para los otros usuarios más vulnerables. El valor usual del radio de giro para proveer condiciones de seguridad es de 6 m.

Figura 5.3.37 Modificación de radios de giro (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



A continuación se muestra una tabla (tabla 5.3.38) con los radios de giro y las velocidades que presentan dependiendo del tipo de vehículo, por lo que se debe analizar las características de los vehículos predominantes en la vialidad antes de realizar algún cambio a los radios de giro.

Tabla 5.3.38

Radios de giro	
Radio de la esquina	Características de operación
< 1.50 metros	No apropiado, ni siquiera para automóviles particulares. Se debe utilizar cuando no exista giro en esta esquina.
3.00 metros	Vuelta a velocidad baja de automóviles particulares
6.00-9.00 metros	Vuelta a velocidad moderada de automóviles particulares; vuelta a velocidad baja de camiones medios
12.00 metros	Vuelta a velocidad alta de automóviles particulares; vuelta a velocidad moderada de camiones medios
15.00 metros	Vuelta a velocidad moderada de camiones pesados

(Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)

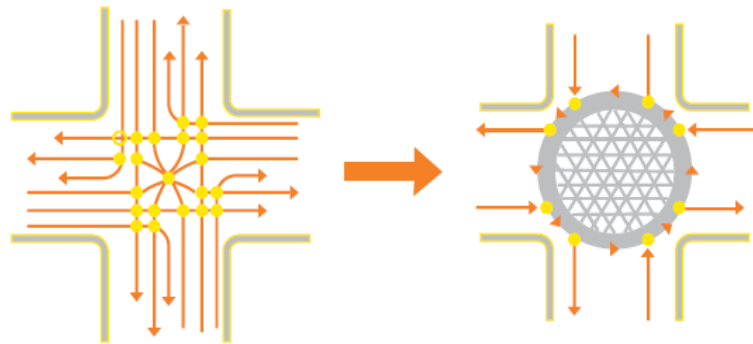
Cuando se analizan las intersecciones con radios de giros amplios se observa que hay una zona que no es utilizada por los autos, ya sea por los que siguen una trayectoria recta o por los que giran a la derecha. Cuando se presenta este caso, es posible colocar un área de resguardo peatonal que permita acortar la distancia de cruce (figura 5.3.39). La geometría de esta área debe ser tal que, la visibilidad sea adecuada en ambas direcciones y la velocidad de los autos sea moderada para poder tener una reacción adecuada ante cualquier eventualidad. En la figura se observan dos ejemplos de la implementación de este resguardo y la geometría adecuada para un giro cómodo de los automóviles

Figura 5.3.39 Implementación correcta de un área de resguardo peatonal



Las glorietas son un tipo de intersecciones en la que los giros se suelen hacer en sentido contrario a las manecillas del reloj para incorporarse a la calle deseada, de tal manera que se eliminan los giros directos a la izquierda. Tiene la peculiar característica de que la circulación de vehículos es constante, por lo que a

Figura 5.3.40 Conflictos reducidos por el uso de glorietas (Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo, 2011)



pesar de que se debe disminuir la velocidad su capacidad es mayor que la de las intersecciones ordinarias. En la Figura 5.3.40, se explica cómo se resuelven los múltiples conflictos presentados en una intersección común cuando se sustituye por una glorietta.

Biciestacionamientos

Se trata de instalaciones que permitan a los usuarios colocar su bicicleta de forma segura y cómoda para continuar su trayecto en otro tipo de transporte o para dirigirse a su destino final. Para el diseño de los biciestacionamientos de la Ciudad de México, se revisaron las experiencias de varias ciudades como Portland, París y Barcelona. Con base en los resultados se determinó que la mejor opción para la ciudad son los biciestacionamientos en forma de U invertida (Figura 5.3.41).

Figura 5.3.41 (Publimetro, 2013)



6. Casos de estudio en el mundo y en la Ciudad de México

6.1 Casos de estudio en el mundo

Utrecht, Holanda

El gobierno de esta ciudad afirma ser el mejor destino que apoya a las bicicletas en el mundo. En su centro, hasta el 50% de todos los viajes se llevan a cabo en bicicleta y las autoridades locales construyen un lugar de estacionamiento de bicicletas de 12,500 espacios considerado como el mayor del mundo (CNN México, 2014). La ciudad tiene tan buena infraestructura para proteger a los ciclistas que es raro ver a los ciclistas usando prendas de alta

Figura 6.1 (www.myguiadeviajes.com, 2011)



visibilidad, se puede decir que son tratados igual que peatones. Además se puede observar a niños pequeños andando en bicicleta por el centro de la ciudad, lo que es un fiel indicador de la seguridad y comodidad con la que uno se puede desplazar.

Sevilla, España

Figura 6.2 Estación de alquiler Sevici (www.audioguiasevilla.com, 2014)



Esta era una ciudad donde las horas pico diarias podían durar hasta cuatro horas y los especialistas aseguraban que la proporción del uso de la bicicleta tardaría décadas. Sin embargo la ciudad estableció 80.4 km de carriles de ciclismo en un año y puso en marcha un plan para alquiler de bicicletas (figura 6.2) llamado Sevici (CNN México, 2014). Los resultados fueron muy notorios, pues en seis años los viajes en bicicleta aumentaron de 0.5% a 7%

Montreal, Canadá

Esta es una de las pocas ciudades norteamericanas con una clara preferencia por el uso de la bicicleta. Su interés por privilegiar a los ciclistas se remonta a 1980 y en la actualidad

Figura 6.3 (www.flickr.com, 2011)



tiene casi 643.7 kilómetros de ciclovías (CNN México, 2014). Fueron pioneros en implementar un plan para compartir bicicletas llamado Bixi, el cual fue lanzado tiempo después en París y Londres. A pesar de su tradición ciclista, Montreal tiene todavía mucho trabajo por hacer, pues los grupos de ciclistas se quejan de que el crecimiento del número de usuarios de bicicleta ha rebasado a la ciudad y se presentan muchos choques en las calles transitadas.

Copenhague, Dinamarca

Más de la mitad de los habitantes de la capital danesa va en bicicleta al trabajo o a la escuela, y con una población de bicicletas que se estima en 650,000 hay ligeramente más bicicletas que personas (CNN México, 2014). Muchas de las bicicletas están disponibles para que los turistas las renten, y las dimensiones compactas de Copenhague y el tránsito tolerable hacen que sea una ciudad perfecta para explorar en bicicleta. Es de reconocer que, los líderes de la ciudad planean exportar el modelo de la ciudad a otras partes del mundo, implementando una infraestructura segura y segregada de bicicletas que tienen carriles de ciclismo de hasta tres metros de ancho (figura 6.4).

Figura 6.4 (www.absolutdinamarca.com, 2010)



Berlín, Alemania

Figura 6.5 Estación de alquiler (www.poreuropa.com, 2014)



Aproximadamente el 13% de todos los recorridos en la ciudad se realiza en bicicletas, casi el doble del porcentaje de hace 20 años. En algunos suburbios internos esto llega al 20% (CNN México, 2014). Estos datos son aún más interesantes si se considera que en la ciudad los inviernos son largos y congelantes y existe un abundante transporte público. Es de las pocas ciudades europeas con avenidas muy amplias como consecuencia de la devastación de la Segunda Guerra

Mundial y de que la mayor parte del terreno es plano.

Portland, Oregon, Estados Unidos

Desde hace más de 20 años se comenzó a colocar infraestructura de bicicletas en la ciudad, lo que propició el uso de la bicicleta como un arraigo cultural. Esa infraestructura incluye más de 104.6 kilómetros de calles de bajo tránsito y 281.6 kilómetros de carriles de bicicleta (figura 6.6), los cuales son utilizados por el 8% de ciudadanos que afirman que ir en bicicleta es su principal forma de transporte, y por el 10% que dice que una bicicleta es su segundo vehículo (CNN México, 2014).

Figura 6.6 (www.ciclosfera.com, 2013)



Tokio, Japón

Figura 6.7 (wordpress.com, 2012)



transporte público es altamente eficiente, los paseos tienden a ser alrededor de los vecindarios que componen la ciudad (figura 6.7).

Sorprendentemente para esta ciudad tan grande, se tiene registros de que hasta un 14% de todos los viajes se realizan en bicicleta (CNN México, 2014). Una de las razones por la que es tan elevado este porcentaje, es porque en Tokio no se permite adquirir un automóvil sin probar que se es poseedor de un lugar de estacionamiento, los cuales son raros y costosos. Cabe destacar que el uso de la bicicleta es diferente al de las ciudades previamente listadas. Puesto que las distancias al trabajo o la escuela son largas y el

Bogotá, Colombia

A pesar de que esta ciudad no se considera tan amigable con las bicicletas como las otras de la lista ya que menos del 5% de los trayectos son en bicicleta, vale la pena reconocer el esfuerzo que las autoridades de Bogotá han hecho por promocionar e

Figura 6.8 (www.eltiempo.com, 2014)



incentivar el uso de la bicicleta. Esto comenzó desde que en 1998 el exalcalde de la ciudad, Enrique Peñalosa, canceló una autopista que pasaría por el centro de la ciudad y comenzó un plan integral en el cual se han construido casi 321.8 kilómetros protegidos para bicicleta y se planea que muy pronto haya un programa de renta de bicicletas.

SolaRoad, Holanda

En noviembre de 2014 se inauguró cerca de Ámsterdam la primera ciclovía, parte del proyecto SolaRoad, capaz de generar energía por medio de la instalación de paneles solares cubiertos de vidrio grueso a prueba de desgaste. Cada metro cuadrado de camino genera de 50 a 70 kW/hora de energía por año, por lo que basta un tramo de 70 metros cuadrados para dar energía a una vivienda (El Financiero, 2014). El proyecto pretende abarcar los 35 mil kilómetros de ciclovía con los que cuenta el país.

Figura 6.9. Ciclovía SolaRoad (El Financiero, 2014)



Pasados seis meses de prueba, los ingenieros reportan mejores resultados que los esperados, los 70 metros cuadrados están generando 3000 kWh (hipertextual, 2015). Por lo que a pesar del elevado costo que involucró el diseñar, construir, instalar y evaluar el rendimiento de este primer tramo, los proyectos posteriores podrían ser altamente rentables en menos de una década.

A diferencia de los paneles instalados en los techos de superficies pequeñas, en el caso de vialidades, es muy fácil interconectar los segmentos para conectarlos a la red eléctrica en lugares estratégicos.

Figura 6.10 Instalación de SolaRoad (deepresource.wordpress.com)



6.2 Infraestructura ciclista en la Ciudad de México

Actualmente la Ciudad de México cuenta con 128 km de ciclovías, un biciestacionamiento masivo semiautomatizado en el CETRAM Pantitlán así como más de mil 300 biciestacionamientos en vía pública (Gobierno del Distrito Federal, 2015)

Entre las ciclovías más utilizadas en la ciudad destacan las siguientes:

Ciclovía Reforma

Inaugurada en 2010, recorre la avenida reforma desde la calle Lieja hasta Avenida Balderas y cuenta con los siguientes elementos

- 6.8 km de longitud
- 36 cajas bici
- 1.3 km de cruces ciclistas
- 25 semáforos ciclistas
- 45 semáforos peatonales
- 14 pasos a nivel en el camellón central
- 60 rampas de accesibilidad universal
- 14 señales de destinos ciclistas
- 60 biciestacionamientos

Figura 6.2.1 Ciclovía Reforma



Ciclovía Circuito Gandhi (2012)

Se trata de una vía que recorre la calle Gandhi en la zona de Chapultepec, con una longitud total de 2.8 kilómetros

Figura 6.2.2 Ciclovía Circuito Gandhi (www.flickr.com)



Ciclovia de la Ciudad de México (Ferrocarril de Cuernavaca; 2004)

Se trata del primer proyecto ciclista de gran impacto para la Ciudad, cuenta con una longitud de 75 kilómetros. Está integrada por una vía con trazo independiente que va de la Avenida Ejército Nacional al límite con el estado de Morelos, sobre lo que es la antigua vía del ferrocarril a Cuernavaca (Fimevic). A pesar de que fue una gran iniciativa presenta algunos problemas que provocan una baja afluencia de usuarios. Hay ciertos tramos de la vía, especialmente en la zona de Polanco en que la vía es invadida por los peatones y en ocasiones se vuelve

imposible transitar en bicicleta, algunos puentes trazados para cruzar las laterales de periférico tienen una pendiente muy pronunciada y obliga a la gran mayoría de los usuarios a descender de la bicicleta y tener que subir la rampa caminando (figura 6.2.4), también hay ciertas zonas de la vía que no tienen vigilancia y se han presentado muchos casos de robos. Además, el trazo de la vía es muy criticado pues no fue pensado en las necesidades de los ciclistas, más bien parece un trazo que no interfiera con los autos, por lo que en muchos tramos no hay salidas que permitan a los usuarios poder llegar a destinos intermedios.

Figura 6.2.3 Ciclovia en un tramo del Ajusco (revistaazimut.com)



Figura 6.2.4 Pendiente pronunciada en ciclovia (www.obrasweb.mx)



Ciclovía Adolfo Prieto.

Otro ejemplo de infraestructura segregada, pero que además, fue diseñada de manera que los vehículos se pudieran seguir estacionando (figura 6.2.5). Comprende una longitud de 3.22 km sobre la Avenida Adolfo Prieto en la Delegación Benito Juárez y va desde la calle Rodríguez Saro hasta División del Norte.

Figura 6.2.5 Ciclovía Adolfo Prieto



Carril Compartido Félix Cuevas (2012)

Es un buen ejemplo de cómo implementar un carril donde las bicicletas compartan el espacio con el transporte público, en este caso el trolebús, en el sentido de la vía y en el carril de contraflujo. Dicho carril se estableció en el tramo que va de Av. Universidad hasta la Av. Patriotismo con lo que abarca 3.58 km de longitud. El ancho del carril compartido es de 4.60 m, con lo que el trolebús puede realizar rebases seguros, además de que tiene la ventaja de que su velocidad de circulación es relativamente baja por lo que no representa una gran sensación de peligro para los ciclistas (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, 2015).

Figura 6.2.6 Carril Compartido en Eje 7 Sur



Figura 6.2.7 Dimensiones de los anchos de carril en el Eje 7 Sur (diarioenbici.com)



Carril compartido con transporte público Arcos de Belén-Izazaga

En este caso las bicicletas comparten el carril con unidades del transporte público conocidas como peseras o autobuses. En contraste con el carril implementado en el Eje 7 Sur, esta infraestructura no cumple con los requisitos establecidos en el capítulo donde se explicó el diseño geométrico. El ancho de carril, el cual es el elemento más importante en este tipo de infraestructura ciclista, es de 3.6 m, por lo que resulta insuficiente para que los vehículos del transporte público realicen un rebase seguro.

Un problema particular de esta vía, es la invasión por parte del comercio informal a la altura del Mercado San Juan (Figura 6.2.8), por lo que la vía resulta inútil para el objetivo con el cual fue implementada.

Figura 6.2.8 Invasión al carril exclusivo (www.excelsior.com.mx)



Ciclovía Nuevo León-Oaxaca

Similar a la ciclovía de Reforma, es un carril confinado exclusivo para ciclistas (figura 6.2.9). Recorre la zona Roma-Condesa sobre la Avenida Nuevo León y la Avenida Oaxaca a lo largo de 5 kilómetros. También cuenta con zonas de espera ciclista así como señalización horizontal y vertical, lo que la convierte en una vía bastante adecuada para conectar a los ciclistas del sur y el centro de la Ciudad. Sin embargo, sigue presentando conflictos con las paradas de los vehículos del transporte público, pues no se hicieron adecuaciones en el mobiliario que permita a los ciclistas rodear a las unidades del transporte público sin invadir el arroyo vehicular entorpeciendo toda la vía.

Figura 6.2.9 Ciclovía Nuevo León-Oaxaca



Ciclovía Eduardo Molina

Se trata de la primera vialidad en la ciudad donde se implementó simultáneamente un carril exclusivo para un sistema de autobuses de tránsito rápido (figura 6.1210), mejor

conocido como metrobús, así como un carril segregado en la extrema derecha para los ciclistas. Como se explicó anteriormente, este tipo de proyectos buscan privilegiar al transporte público y a los ciclistas, sin temer que se reduzca la capacidad para el tránsito de automóviles particulares. Además se evita que los ciclistas circulen por el carril del metrobús y lo obliguen a detenerse o disminuir su velocidad, afectando a todo el sistema. La vialidad mantiene las mismas características a lo largo de 10 km sobre la Avenida Ing. Eduardo Molina desde la Avenida Río de los Remedios hasta la Avenida Héroe de Nacoziari.

Figura 6.2.10 Infraestructura para varios tipos de transporte en Av. Eduardo Molina (huellasenelpavimento.wordpress.com)



Otras vías para ciclistas son:

- Ciclovía FFCC Nacionales (2010): 4.46 km de longitud.
- Ciclovía: Tlatilco-Antonio Valeriano-Encarnación Ortiz (2011): 3.13 km de longitud.
- Ciclovía Durango (2012): 1.05 km de longitud
- Ciclovía Río de la Loza-Fray Servando: 1.91 km de longitud.
- Ciclovía Dakota (2013): 0.65 km de longitud.
- Ciclovía Juárez (2012): 0.92 km de longitud.
- Ciclovía Chapultepec (2012): 0.73 km de longitud.
- Ciclovía Tornel (2014): 0.65 km de longitud.
- Ciclovía José Morán (2014): 0.46 km de longitud.

Biciestacionamiento CETRAM Pantitlán

Ubicado en el Centro de Transferencia Modal (CETRAM) Pantitlán, es un biciestacionamiento que cuenta con espacio para 400 bicicletas. Es de acceso controlado por lo que para su uso los usuarios deben registrarse para poder dejar su bicicleta. Además ofrece el servicio de sanitarios, lockers y una tienda con taller para realizar reparaciones. Es el único estacionamiento de este tipo en la ciudad, pero ya se planea realizar un proyecto similar en el CETRAM de Buenavista.

Figura 6.2.11 Biciestacionamiento Pantitlán (www.mxcity.mx)



Problemáticas con la infraestructura actual

A pesar de que se han hecho esfuerzos en la dirección correcta y algunos proyectos tienen los elementos necesarios para convertirse en rutas atractivas para que los ciclistas realicen sus trayectos cotidianos, no parece existir un plan integral que de verdad logre conectar los puntos de origen y destino más demandados. Además se puede observar que no se le da el seguimiento adecuado al mantenimiento de la infraestructura ni para asegurarse de que los autos se mantengan fuera del espacio exclusivo para los ciclistas.

Como se observa en la figura 6.2.12, las vías actuales que existen en la ciudad resultan insuficientes para ofrecer rutas directas y seguras para atraer a los miles de potenciales usuarios que están a la espera de infraestructura adecuada para poder dejar el auto en casa y utilizar la bicicleta en sus viajes rutinarios. De igual manera se aprecia que las rutas están muy dispersas para poder realizar viajes continuos.

Figura 6.2.12 Mapa con las rutas ciclistas de la Ciudad de México (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo)



ECOBICI

Es un sistema de transporte individual que se puso en marcha en 2010 con el objetivo de promover la intermodalidad entre los diferentes modos de transporte y fomentar la cultura ciclista como forma de traslado cotidiano. Inicialmente el sistema contaba con 1,200 bicicletas y 90 cicloestaciones distribuidas estratégicamente en las colonias Condesa, Hipódromo Condesa, Hipódromo, Roma Norte, Cuauhtémoc, San Rafael, Juárez y Centro Histórico.

Figura 6.2.13 Estación de bicicletas ECOBICI (www.chilango.com)



Para utilizarla se debe adquirir una membresía anual de \$400 para que se haga entrega de una tarjeta intransferible con la que se pueden utilizar las bicicletas en las cicloestaciones, todos los días del año en un horario de 6:00 am a 12:30 am. El tiempo límite de uso para no generar cargos extras es de 45 minutos. Los objetivos del programa ECOBICI son los siguientes:

- Incrementar la intermodalidad con la bicicleta.
- Hacer de la bicicleta un modo de transporte accesible para la población.
- Reducir la emisión de contaminantes y gases de efecto invernadero.

La Delegación Cuauhtémoc fue elegida para implementar la fase 1 del STI-ECOBICI ya que, de acuerdo a la Encuesta Origen-Destino 2007, esta zona atrae 13.2% de los viajes totales que se realizan en la ciudad (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012), además de que 16.3% de las unidades económicas del D.F. se encuentran en esa zona.

Para el año 2012, con dos años de operaciones el sistema ECOBICI contaba con más de 40 267 suscriptores, de los cuales 26 239 son usuarios activos. Se han realizado 3.6 milloes de viajes y se tienen registros que indican que en un año el sistema tuvo un incremento de 233% en número de usuarios y de 704% en viajes. Con base en esto, se determinó que era necesario realizar una nueva ampliación dividida en dos fases:

- Fase II. Colonia Roma-Centro Histórico.
- Fase III. Colonia Polanco-Colonia Escandón.

A continuación se presenta la tabla 6.2.14 con las primeras tres fases de expansión del STI-ECOBICI:

Tabla 6.2.14 Datos generales Fases 1-3 ECOBICI

Fases de expansión del STI-ECOBICI					
	km ²	Cicloestaciones	Bicis	Usuarios	Viajes
Fase I	4.2	90	1200	30 000	9 000
Fase II	9.2	110	1600	29 000	11 000
Fase III	7.5	75	1170	20 000	7 500
Total	21	275	3970	79 000	27 500

(Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012)

A finales del 2014 el sistema se amplió a la delegación Benito Juárez con 171 ciclo estaciones, 2 mil 575 bicicletas para dar servicio 60 mil nuevos usuarios (El Financiero, 2014). Con esto se suman 13.73 kilómetros cuadrados limitando al norte con el Viaducto, al

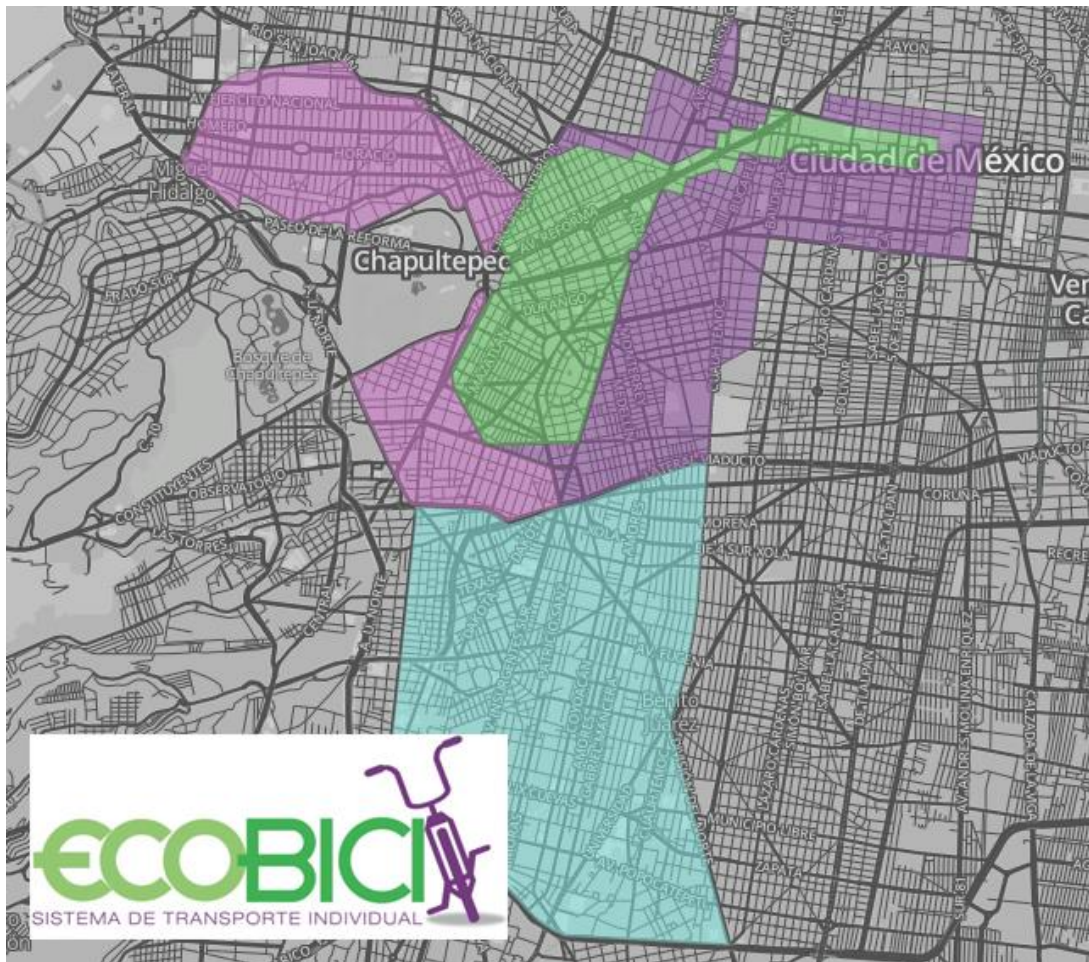
oriente con la avenida Cuauhtémoc, al sur con el Circuito Interior y al poniente con la avenida Revolución. Al mismo tiempo se adicionaron 12 cicloestaciones nuevas a la zona de Buenavista en la delegación Cuauhtémoc.

Algunas cifras relevantes del desempeño del sistema se presentan a continuación (Diario en Bici, 2015):

- Las horas pico de usuarios son de las 8 a 10 hrs, 14 a 16 hrs y de 18 a 20 hrs.
- El tiempo promedio de viaje es de 20 minutos.
- El sistema está subsidiado de manera que el usuario sólo cubre un 30% del costo real para la operación y mantenimiento del sistema.
- Una bici hace en promedio 7.5 viajes diarios.
- El índice de robos es del 5.1%, que es uno de los más bajos del mundo para sistemas similares.
- Las cicloestaciones cercanas a estaciones del STC concentran el 34% del total de viajes.

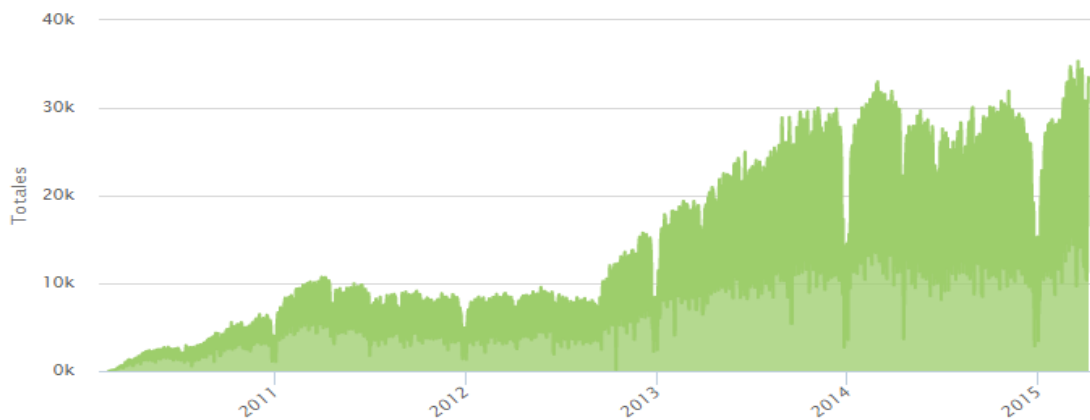
Para comprender mejor el alcance físico del sistema, así como las zonas donde se pueden encontrar cicloestaciones se presenta la siguiente figura (figura 6.2.15) que distingue las distintas fases de crecimiento del sistema.

Figura 6.2.15 Fases de implementación de Ecobici (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, 2015)



Así mismo en la figura 6.2.16 muestra el historial de viajes realizados por día con bicicletas ECOBICI desde inicios del año 2010 hasta el mes de abril de 2015

Figura 6.2.16 Histórico de usos (Ecobici, 2015)



Señalamientos para ciclistas en la Ciudad

Para que un sistema de transporte multimodal funcione adecuadamente, se deben disponer los dispositivos de control necesario de manera que todos los modos de transporte puedan convivir sin que esto implique retrasos innecesarios o accidentes. Los señalamientos deben ser uniformes para simplificar su reconocimiento e interpretación por parte de los usuarios.

El sistema de señalamientos instalado hasta ahora en la ciudad para la circulación de ciclistas se ha diseñado con el fin de optimizar el funcionamiento del sistema ECOBICI. Este sistema pretende alertar a los conductores de las zonas de alta circulación de ciclistas y peatones para asegurarse de que la normatividad correspondiente sea respetada y todos los usuarios de la vialidad puedan trasladarse en el mismo espacio.

El proyecto de instrumentación de ECOBICI se planteó como objetivo la colocación de señalamientos en aproximadamente 21 km² de infraestructura ciclista, el proyecto comprende los siguientes elementos (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012):

- 108 señales verticales en vialidades primarias
- 194 señales verticales en vialidades secundarias
- 100 señales verticales de destinos en vialidades primarias
- 200 señales de destinos en vialidades secundarias

Figura 6.2.17 Ejemplo de señalamiento ECOBICI (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012)



Estrategia de movilidad en Bicicleta de la Ciudad de México

La Estrategia de Movilidad en Bicicleta de la Ciudad de México (EMB) es una solución que propuso el Gobierno del Distrito Federal para resolver los problemas de movilidad presentes en la Ciudad, de manera que se ataquen los problemas ambientales, sociales, económicos y de salud. Tiene como objetivo crear las condiciones adecuadas de infraestructura, equipamiento y cultura ciclista que permitan posicionar a la bicicleta como una alternativa viable y segura de transporte cotidiano. (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012). En el mes de mayo de 2007, la Secretaría del Medio Ambiente inició la operación de la Ciclovía Recreativa Muévete en Bici como primer proyecto de la EMB.

Para iniciar la creación de infraestructura segura y accesible para los usuarios se inauguraron las primeras tres cicloestaciones de renta de bicicletas en el Distrito Federal.

Esto con el fin de cumplir la meta global de incrementar el porcentaje total de viajes diarios que se hacen en bicicleta del 1% al 5% en 2012.

En 2008 la Secretaría del Medio Ambiente firmó un convenio con la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para iniciar la elaboración del Plan Estratégico de Ciclovías. Se contó con la asesoría del despacho danés de arquitectos Gehl Architects, con lo que se elaboró un plan donde se plasmaron los criterios y las fases para desarrollar la red de ciclovías que se construirían en la Ciudad de México.

La Ciudad de México tiene un gran potencial para convertirse en una ciudad con una participación importante de ciclistas en los traslados diarios al trabajo, la escuela o con fines recreativos.

Sistemas de monitoreo y evaluación ciclista

Para poder tener una planeación adecuada en cuanto al desarrollo de infraestructura para la movilidad de los ciclistas, es necesario conocer el comportamiento que presentan los registros de los viajes en bicicleta, de este modo se puede realizar una proyección más precisa de la demanda que se tendrá en el futuro.

En el periodo 2008-2010 se realizó un conteo con 476 puntos de cruce, en el cual se registraron 26 586 ciclistas en 2008, 24 979 en 2009 y para 2010 se contabilizaron 26 058 ciclistas. Obsérvese que de 2008 a 2009 hubo una reducción de 6% en el volumen de ciclistas, mientras que para el 2010 aumentó en 4% respecto al año anterior.

Las delegaciones con un mayor volumen de ciclistas registrados son: Iztapalapa, con 4762; Gustavo A. Madero, con 3203 y Cuauhtémoc con 3099. En contraste, la delegación que presenta un menor número de ciclistas en Milpa Alta, con 262. Los días en que se observa un mayor uso de bicicletas son los miércoles, en cambio, los días sábado es cuando se advierte un menor uso. (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2012)

Conteo ciclista en el polígono del STI-ECOBICI

En los años 2009 y 2010 se realizó un conteo ciclista en el polígono de influencia de ECOBICI. Con este estudio se pudo conocer el impacto que el sistema tuvo en la Delegación Cuauhtémoc. Para efectos del conteo se observaron 98 cruces de vías donde, en el año 2010 se contabilizaron 7633 ciclistas, de los cuales 2187 utilizaban bicicletas del STI-ECOBICI. Cabe resaltar que si se compara este conteo con el Conteo Ciclista del Distrito Federal mencionado anteriormente, se observa que hay un mayor volumen de viajeros por punto de observación en el polígono de influencia de ECOBICI. También vale la pena hacer notar que de 2009 a 2010 se presentó un aumento de 45% en el número de viajeros registrados.

7. Propuestas de nuevas rutas ciclistas en la Ciudad de México

7.1 Propuesta Carril bus-bici en Eje 8 Sur

El Eje Vial 8 Sur en el tramo de la Av. Insurgentes a la Calzada de Tlalpan (Figura 7.1.1) presenta condiciones muy similares al Eje 7 Sur, por lo que se puede implementar una infraestructura similar, que permita que los ciclistas compartan el carril que actualmente utiliza el transporte público tanto en el sentido de la vialidad como en el contraflujo.

Figura 7.1.1. Tramo del Eje 8 Sur a modificar. (Google Earth 2015)



En la Figura 7.1.2, se puede observar un perfil de la elevación que arroja Google Earth que presenta el tramo en estudio, del cual se obtuvo la siguiente información:

- Longitud del tramo: 4.02 km
- Inclinación promedio (de poniente a oriente): -1.7%

Para poder distribuir el ancho de carriles correctamente, se debe de considerar que el ancho de la vía es de aproximadamente 19.7 m.

Si se diseñan los carriles compartidos con un ancho de 4.3 m y se consideran elementos de confinamiento de 0.5 m en cada carril, se tiene que ajustar el número de carriles para los

automóviles a 3 con un ancho de 3.37 m, los cuales son suficientes para que incluso circule el transporte de carga particular que actualmente transita.

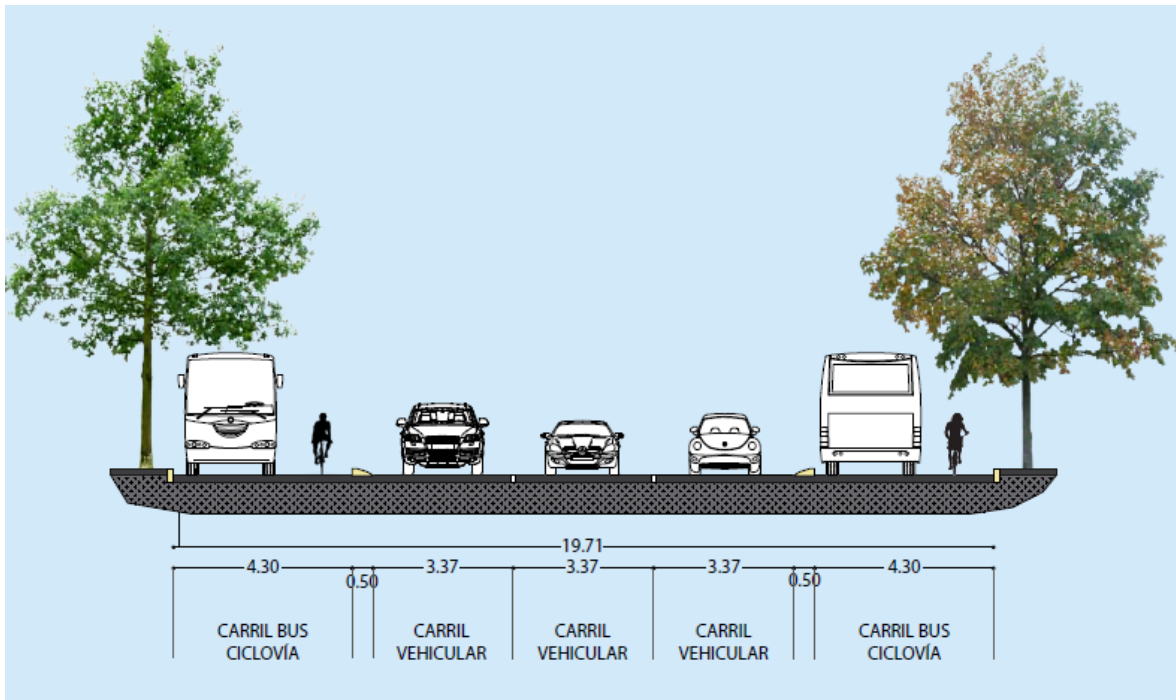
Esta propuesta tiene la ventaja de estar conectada con la Línea 1 del Metrobús en Av. Insurgentes y con la estación Ermita de las líneas 2 y 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Por esta condición, se puede plantear la construcción de biciestacionamientos en ambos sistemas de transporte que permitan a los usuarios dejar sus bicicletas para abordar cualquiera de los dos transportes.

Figura 7.1.2. Perfil de elevación del tramo en estudio (Google Earth, 2015)



A continuación se muestra una vista transversal del prototipo de vialidad que se propone (Figura 7.1.3).

Figura 7.1.3 Sección transversal de propuesta de modificación del Eje 8 Sur



Realizando un análisis integral de la vialidad se identificaron dos intersecciones, que por sus características geométricas y volúmenes de tránsito, pueden ser conflictivos con el cruce de ciclistas. Éstas son en el cruce con Av. Universidad (Figura 7.1.4) y el cruce con Av. División del Norte (Figura 7.1.5). En ambas intersecciones se presentan los mismos conflictos: Cuando los vehículos que circulan sobre el Eje 8 Sur giran a la izquierda o derecha, se cruzan con la trayectoria que sigue el transporte público, los peatones y, en el caso de esta propuesta, con los ciclistas. Para resolver este caso, se pueden instalar semáforos exclusivos para el transporte público y ciclistas, donde se implemente una fase en donde únicamente puedan avanzar estos usuarios, representados en las figuras con las flechas verdes. Como complemento a esta solución, se deberán pintar rayas indicadoras del paso de ciclistas sobre estas intersecciones.

Figura 7.1.4. Conflictos en la intersección con Av. Universidad (Google Earth, 2015)

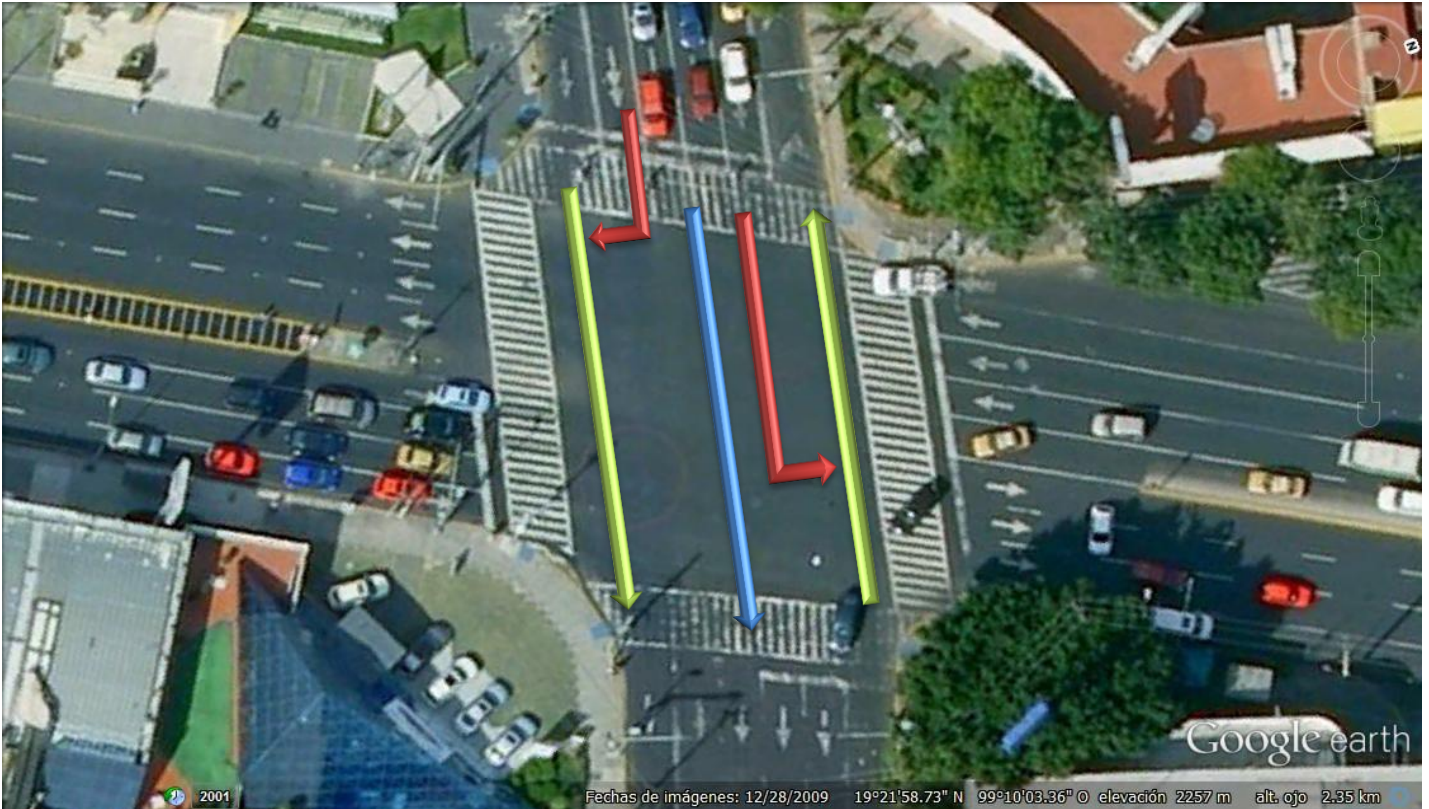


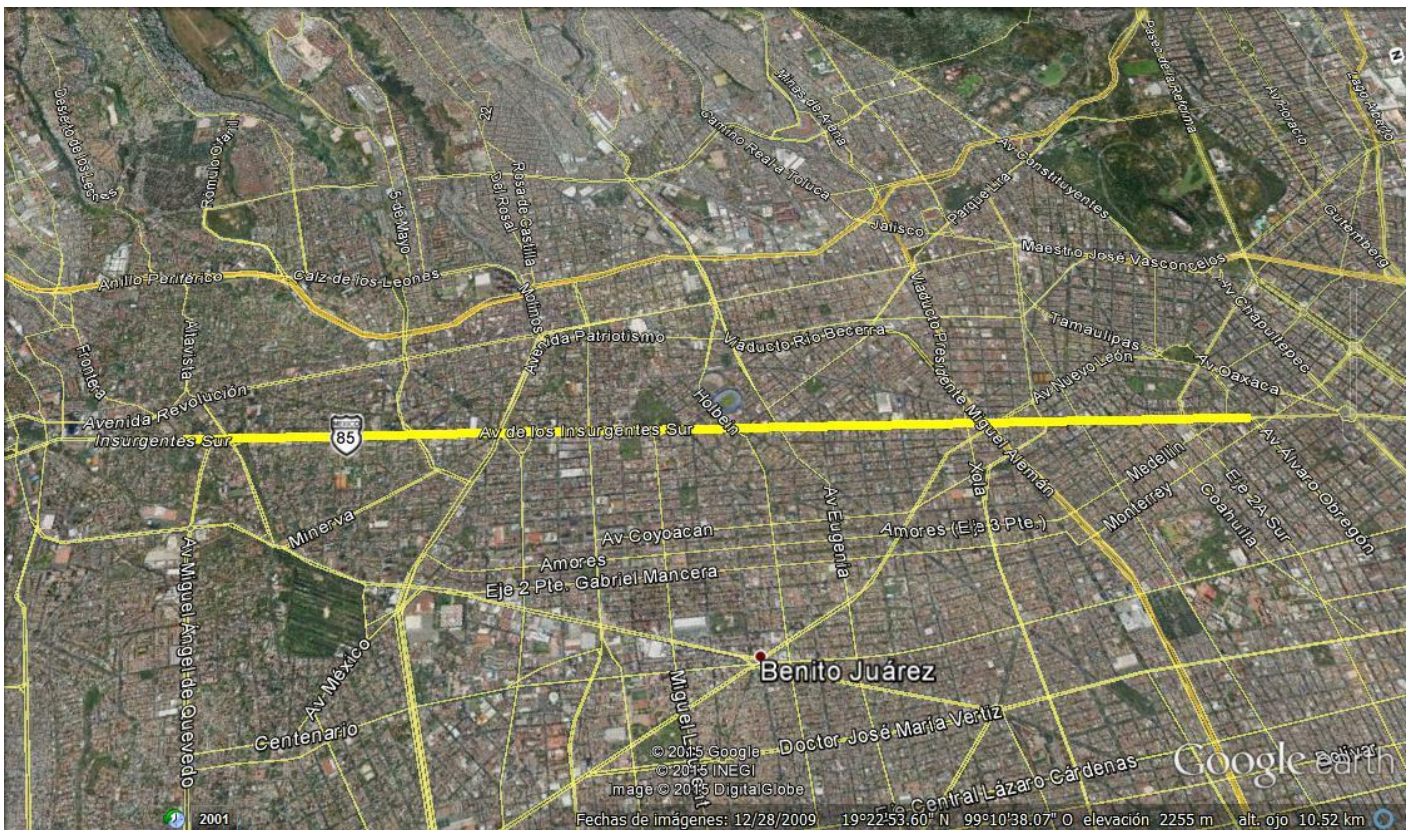
Figura 7.1.5. Conflictos en la intersección con Av. División del Norte (Google Earth, 2015)



7.2 Propuesta de carril ciclista en Av. Insurgentes (Vía con sistema de autobuses de tránsito rápido Metrobús)

Esta propuesta consiste en implementar una ciclovía segregada en ambos sentidos de la Av. Insurgentes en el tramo que va de Av. De la Paz en la estación de Metrobús La Bombilla a la Av. Álvaro Obregón, el cual tiene una longitud de 8.13 km (Figura 7.2.1). Se propone este tramo por presentar una pendiente promedio de 2.4% de sur a norte (Figura 7.2.2) y por tener una sección de tres carriles para los automóviles que permite realizar la redistribución necesaria.

Figura 7.2.1 Tramo de la Av. Insurgentes a modificar (Google Earth, 2015)

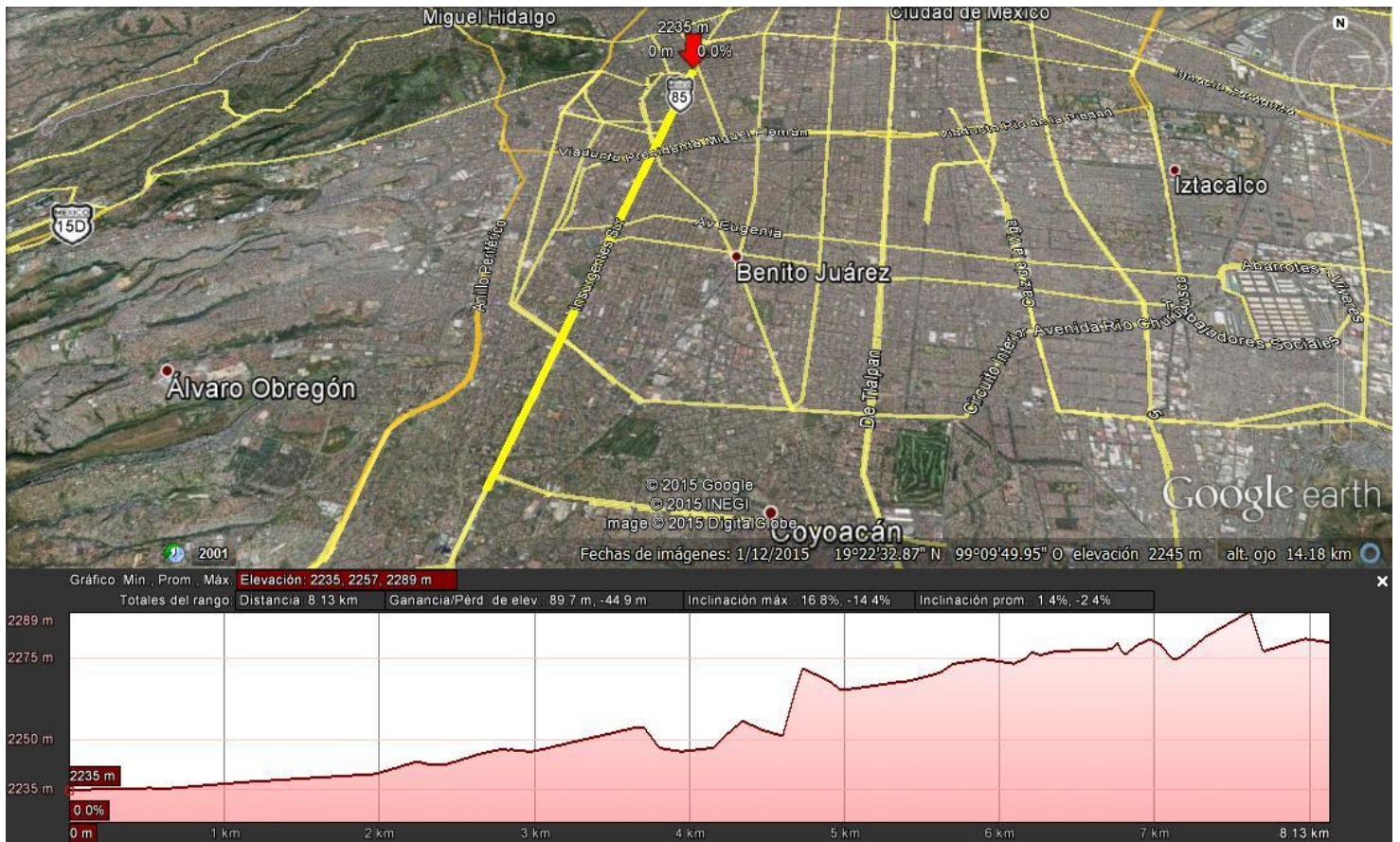


Sobre esta avenida se encuentra la Línea 1 del Metrobús, el cual cuenta con un carril confinado que le permite circular a velocidades más altas que los automóviles en las horas pico. Como se explicó anteriormente, este tipo de vialidades deben de tener un espacio para circulación de las bicicletas, de lo contrario los usuarios de éstas circularán en el carril exclusivo del Metrobús, entorpeciendo el sistema y arriesgándose a sufrir un accidente.

Considerando que la avenida tiene un ancho total de 12.1 metros, y que el carril confinado para el metrobús, considerando los elementos de confinamiento, tiene 4.3 metros de ancho. Se tienen 7.8 metros para distribuir el espacio para que circulen los automóviles y las bicicletas. Después de algunas iteraciones se determinó que el ancho del carril segregado sea de 1.5 metros con elementos de confinamiento de 0.50 m y dos

carriles para automóviles de 2.9 metros. En la Figura 7.2.3 se muestra una vista transversal de esta distribución propuesta.

Figura 7.2.2 Perfil de elevación del tramo en estudio. (Google Earth, 2015)



A pesar de que el ciclocarril no cumple con el ancho recomendado de 2.00 metros, se determinó que 1.5 metros son el ancho más conveniente, ya que al reducirse el número de carriles para los automóviles, se debe tener certeza que los dos carriles que quedaron para la circulación de éstos sean lo suficientemente anchos para que circulen con comodidad a diferencia de lo que ocurre actualmente con carriles tan reducidos de 2.6 metros.

Con la implementación de este carril se tiene la ventaja de que se evitará el estacionamiento momentáneo tan recurrente en ciertas zonas de Insurgentes, además de que esta avenida conecta puntos muy importantes de la ciudad. Esta propuesta se puede considerar como una solución parcial a la demanda por espacio de circulación que ha aumentado de manera importante en los últimos años por los edificios corporativos que se han construido.

Para que funcione adecuadamente este ciclocarril se deben pintar cajas-bici en los cruces semaforizados y en puntos intermedios en los cruces con Barranca del Muerto (Figura 7.2.4) y con Río Churubusco (Figura 7.2.5), ya que, debido a la longitud del cruce, los ciclistas corren el riesgo de quedar en medio de la intersección cuando el semáforo

pase a rojo. Además, se debe colocar y pintar señalamiento horizontal y vertical que le indique a los automovilistas que giren a la derecha, el paso y prioridad de ciclistas que seguirán una trayectoria recta.

7.2.3 Sección transversal de la propuesta de modificación en la Av. De los Insurgentes

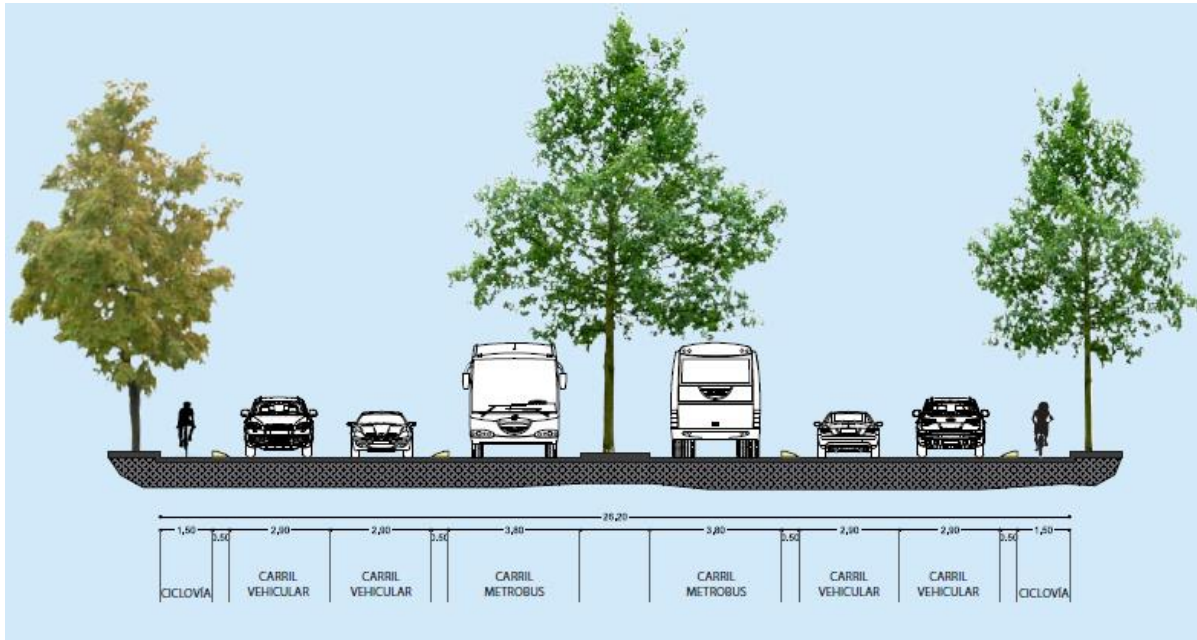


Figura 7.2.4 Intersección con Barranca del Muerto (Google Earth, 2015)

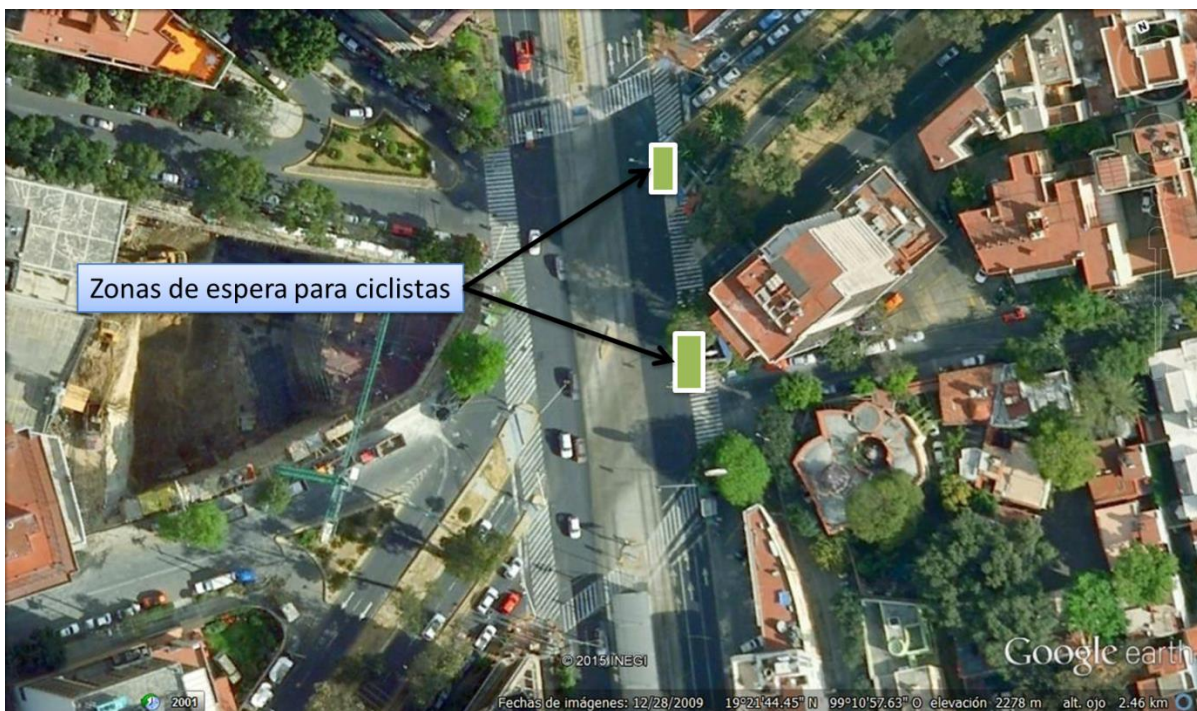
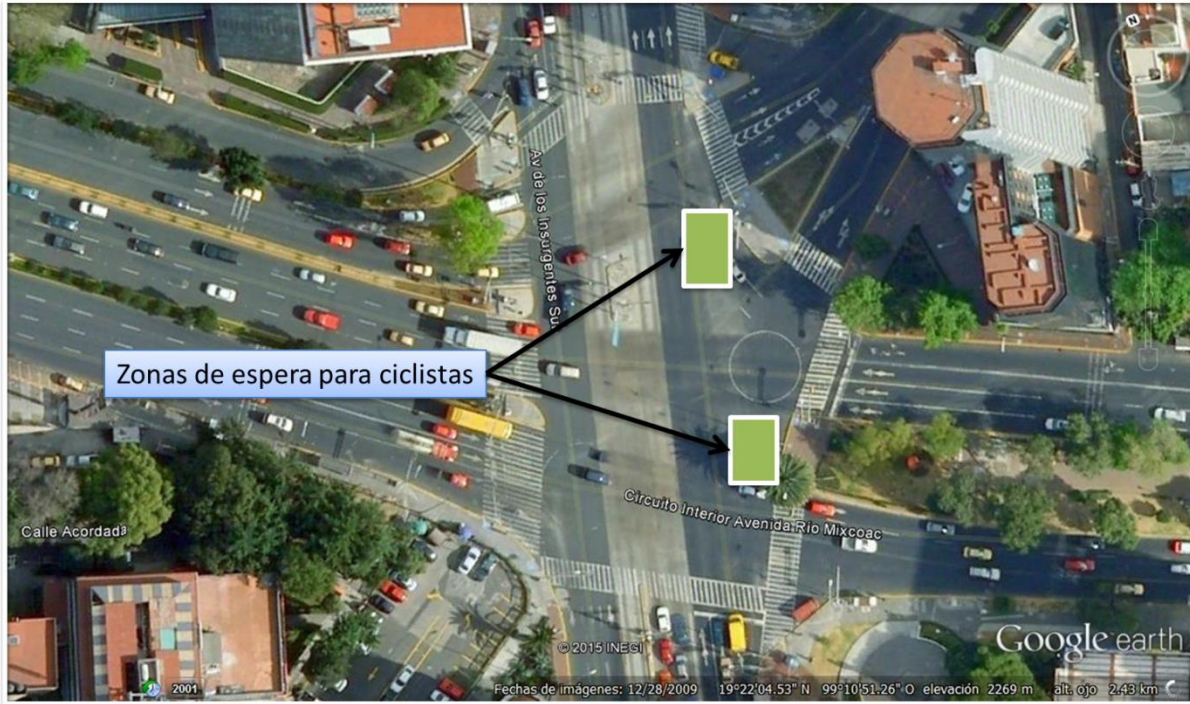


Figura 7.2.5 Intersección con Río Churubusco



7.3 Extensión de Ciclovía Segregada sobre Av. Paseo de la Reforma

Como se mencionó anteriormente, un tramo de la Av. Paseo de la Reforma ya cuenta con una ciclovía segregada. Pero se detectó que, el tramo que va de la Av. General Mariano Escobedo a la Fuente de Petróleos (Figura 7.3.1) en el cruce con Periférico presenta un volumen considerable de ciclistas, en especial usuarios de ECOBICI, que utilizan esta ruta para trasladarse a la zona de Polanco de manera más directa. Sin embargo, a pesar de que el carril de extrema derecha en ambos sentidos pretenda ser un carril compartido con prioridad ciclista, éste tiene un ancho insuficiente de 3.1 m para permitir rebases seguros y, por los altos volúmenes de automovilistas y unidades del transporte público, los ciclistas se ven obligados a circular por el pequeño espacio que queda entre los vehículos motorizados y la banqueta. Se aprecia que la pendiente promedio de 6.7% (Figura 7.3.2) es bastante aceptable, pues el esfuerzo que involucra subir esta pendiente no es tan fuerte y todos los ciclistas podrían vencerla.

La propuesta en este caso, consiste en continuar con la ciclovía presente en la lateral de la Av. Paseo de la Reforma hasta la Fuente de Petróleos con una longitud de 2.77 km. En este tramo la vía tiene un ancho total de 9.6 metros por sentido, por lo que la opción más viable es destinar 2 metros para la ciclovía y 0.5 metros a los elementos de confinamiento, quedando dos carriles de 3.55 metros para vehículos motorizados (**Figura 7.3.3**).

Figura 7.3.1 Tramo de la Av. Paseo de la Reforma a Modificar.

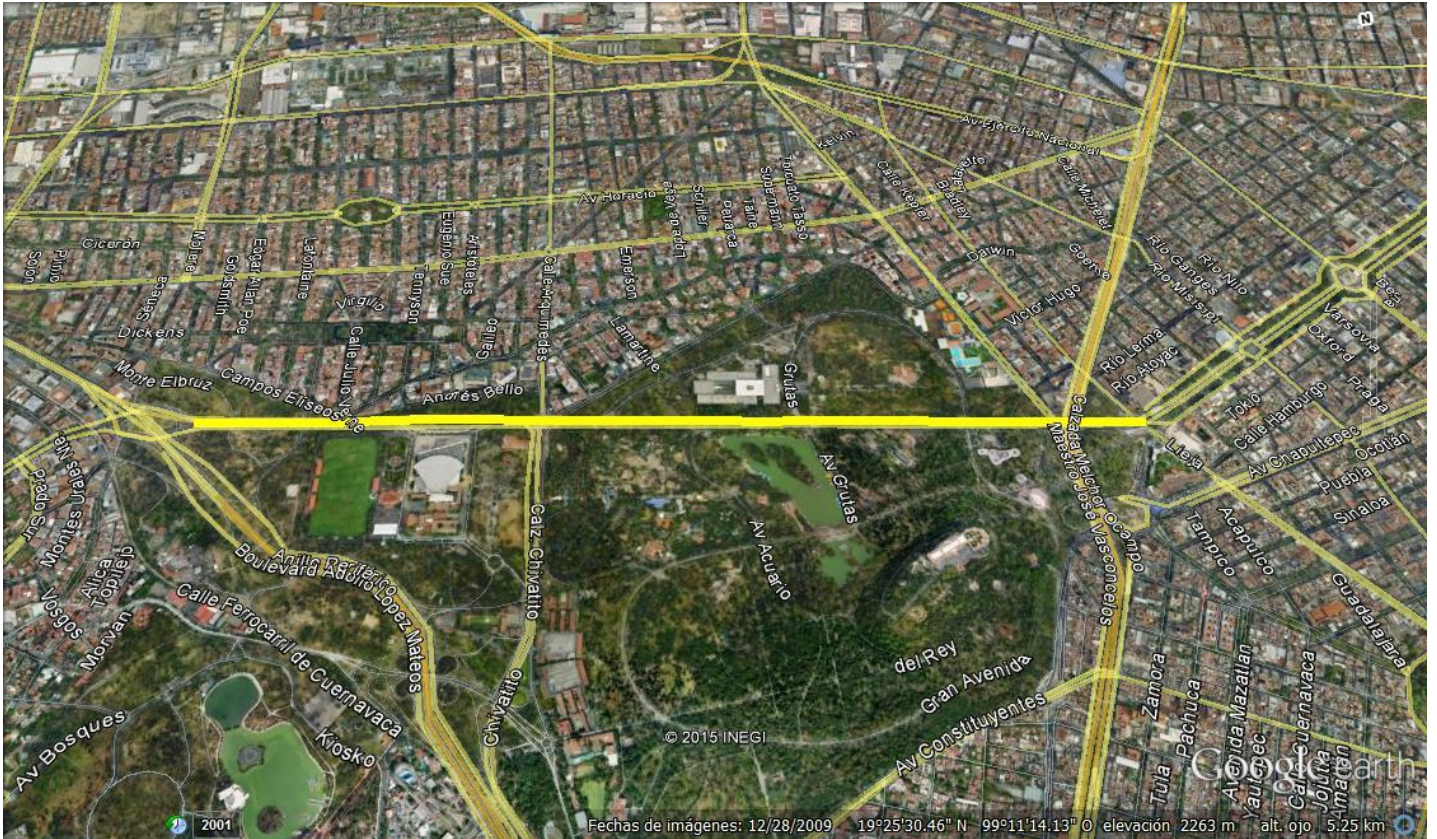


Figura 7.3.2 Perfil de elevación del tramo en estudio

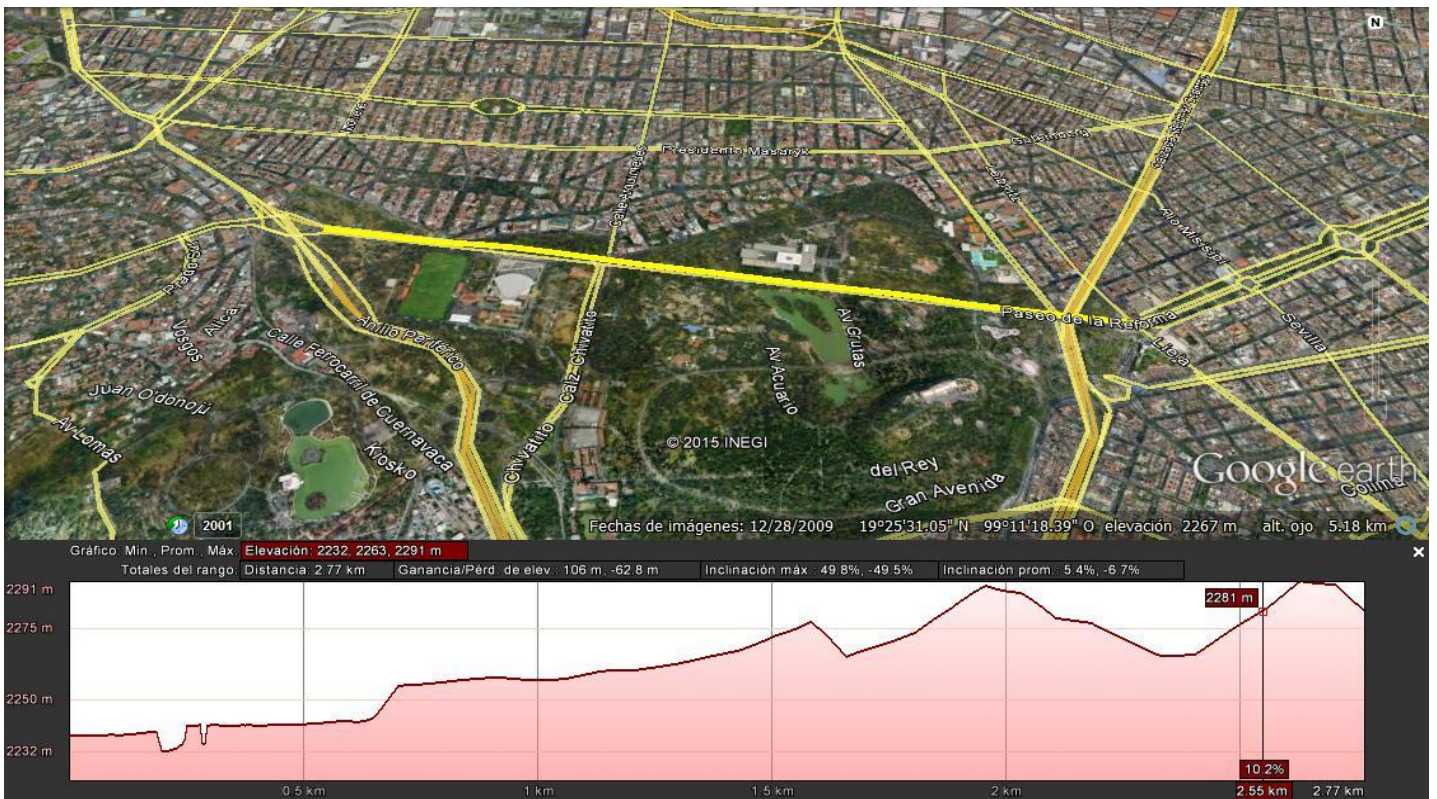
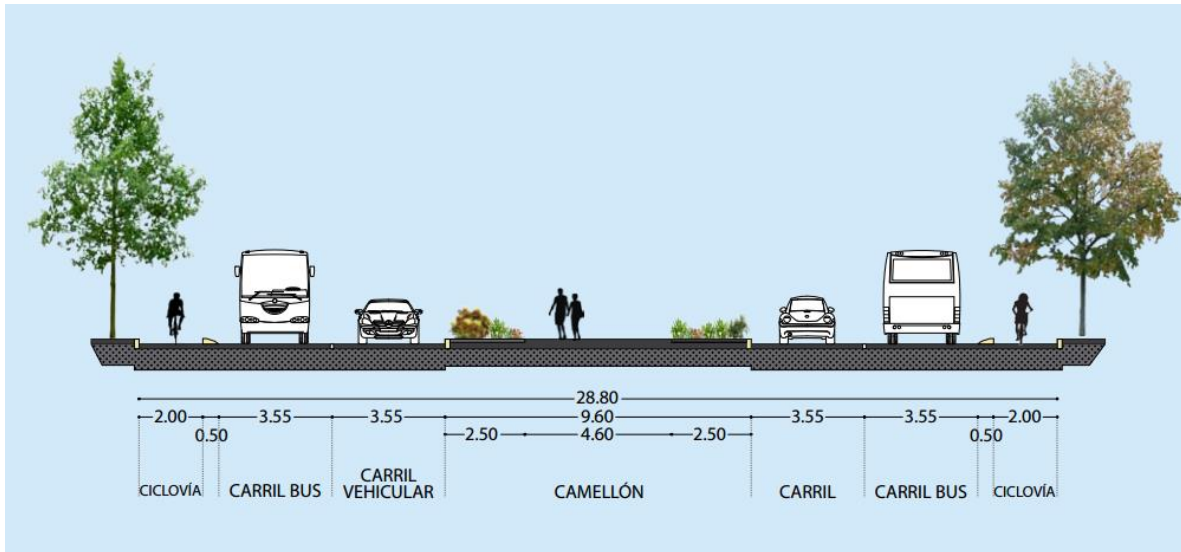
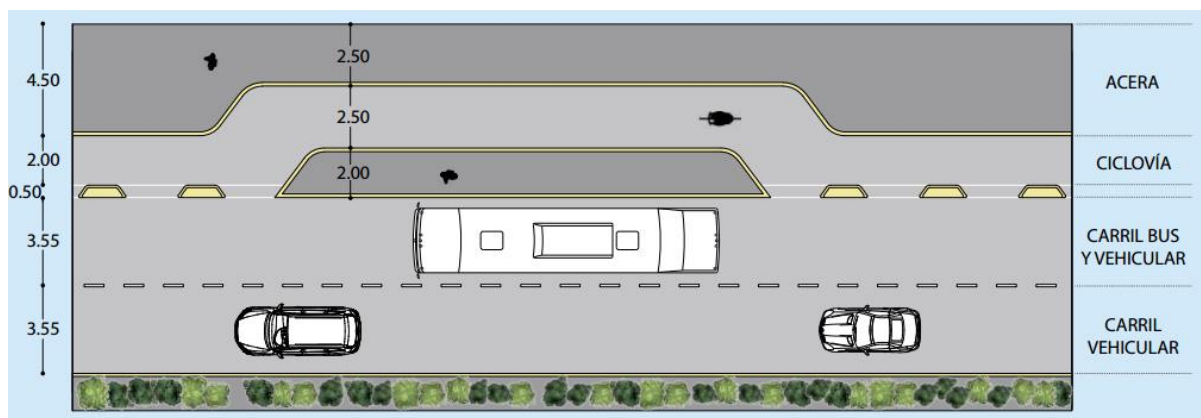


Figura 7.3.3 Sección transversal de la propuesta de extensión de la ciclovía segregada en Av. Paseo de la Reforma



Uno de los problemas actuales de este tramo, es que las paradas del transporte público obligan a las unidades de éste a interponerse en el camino de los ciclistas. Por lo tanto, de acuerdo a las opciones de diseño que se tienen, se propone que en las paradas de transporte público se diseñe el trazo de la ciclovía rodeando a estas últimas, de manera que los peatones puedan esperar a los autobuses en la bahía que se forma con este tipo de diseño. Considerando que las banquetas tienen 4.5 metros de ancho, la propuesta de diseño se observa en la Figura 7.3.4.

Figura 7.3.4 Propuesta de desvío de ciclovía en parabuses.



7.4 Ciclovía sobre Eje 2 Poniente (Gabriel Mancera)

Sobre el Eje 2 Poniente (Gabriel Mancera), en el tramo que va de Av. Universidad a la calle Casa del Obrero Mundial (Figura 7.4.1), se presentan condiciones que sugieren una ciclovía segregada por las velocidades que llegan a alcanzar los automóviles. La pendiente promedio a lo largo de una longitud 4.36 km es de 1.7% (Figura 7.4.2), lo que

hace totalmente viable la implementación de una ciclovía de 2 metros de ancho con elementos de confinamiento de 0.5 metros.

Figura 7.4.1 Tramo del Eje 2 Poniente a modificar (Google Earth, 2015)

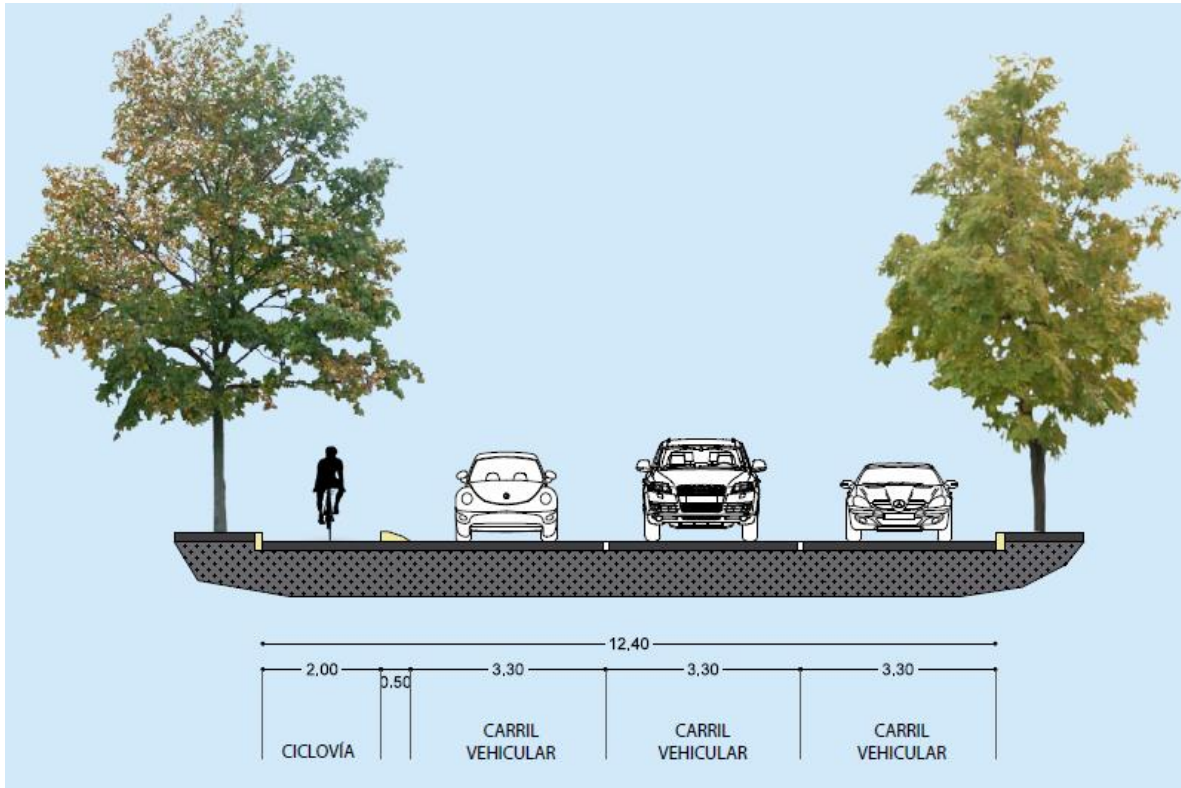


Figura 7.4.2 Perfil de elevación en el tramo en estudio (Google Earth)



Siendo que el ancho total de la vía es de 12.4 metros, aún con la implementación de la ciclovia se pueden destinar 3 carriles de 3.3 metros para los vehículos motorizados (Figura 7.4.3)

Figura 7.4.3 Sección de transversal de la propuesta de modificación en el Eje 2 Poniente.



Como en los casos anteriores, para los cruces donde los automóviles desean girar a la derecha, se sugiere instalar señalamiento vertical y horizontal, donde se observe perfectamente la prioridad de paso ciclista.

7.5 Ventajas ambientales de las propuestas presentadas

Puesto que el objetivo de este trabajo es argumentar la necesidad de mejorar y ampliar infraestructura ciclista para mejorar la calidad del aire de la ciudad, es necesario realizar un análisis para cada propuesta que demuestre numéricamente la mejoría en la calidad del aire que representan. Para realizar este análisis se utilizará la información que arrojó el conteo ciclista del 2013 realizado por el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP por sus siglas en inglés). Para fines informativos, el conteo explica que el ejercicio se realizó en el mes de noviembre, fuera de temporada de lluvias, vacaciones escolares o días festivos, además de realizarse en martes, miércoles y jueves, lo anterior con el fin de recabar información que represente la tendencia en la demanda de las diferentes rutas analizadas. El periodo de conteo por punto fue de 16 horas de 6:00 am a 10:00 pm

Para la primera propuesta del carril compartido en Eje 8 Sur, se tomará como referencia el conteo realizado sobre el Eje 7 Sur al cruce con Universidad y con Insurgentes pues se

trata de vías paralelas con usuarios de la misma zona. El conteo de 2013 arrojó que en el cruce con Universidad se contaron un total de 573 ciclistas y en el cruce con Insurgentes se contaron un total de 450. En este caso se tomará en cuenta el número de 573 ciclistas para obtener la reducción de emisiones de CO₂ máxima. Si consideramos que la tasa de ocupación promedio por auto en la Ciudad de México es de 1.2 personas (ONU-Hábitat , 2015), entonces se puede calcular el número de autos que serán sustituidos por los ciclistas que transitarán dividiendo los 573 ciclistas entre la tasa de ocupación, resultando que se sustituirán 478 autos con el carril compartido propuesto. Posteriormente y, recordando que la longitud del tramo es de 4 km, podemos calcular la cantidad de emisiones de CO₂ que se evitarán al día tomando en cuenta que en el Capítulo 4 se menciona que por cada km que recorre un auto se emiten 0.3 kg de CO₂:

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ evitadas} = \left(0.3 \frac{\text{kg de CO}_2}{\text{km}}\right) (4 \text{ km})(573) = 678.6 \text{ kg de CO}_2$$

Adicionalmente, si se hace la suposición de que por cada de auto que se evita en las calles se evita que se compre un auto nuevo, es posible obtener la cantidad de agua que se ahorra por la fabricación de un auto. Como se explicó en el Capítulo 4, la fabricación de un auto requiere la utilización de 1,000,000 de litros de agua, mientras que por fabricar una bicicleta se utilizan 19,000 litros de agua, por lo que por cada bicicleta que sustituye a un auto se ahorran 981,000 litros. Esta cantidad por los 478 autos que serán sustituidos por bicicletas, resulta en 468,918,000 litros totales de agua ahorrados.

Para realizar el análisis en la propuesta del carril confinado en la Avenida Insurgentes, se hará uso de la Tabla 7.5.1, ya que no se cuenta con un caso equiparable a las características y demanda previstas para la propuesta.

Tabla 7.5.1 Dimensiones de ciclovías unidireccionales en áreas urbanas (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, 2014)

Dimensiones de ciclovías unidireccionales en áreas urbanas	
Volumen ciclista unidireccional en hora (ciclistas/hr)	Ancho de carril
0-150	2.00 m
150-750	3.00 m (2.50 m mínimo)
>750	4.00 m (3.50 m mínimo)

En la propuesta se definió que el ancho que más se adaptaba a las condiciones de la avenida era de 1.50 m, pero al tratarse de una arteria con gran demanda de ciclistas, se tomará en cuenta el valor máximo de 150 ciclistas que circularán en una hora. Para equiparar este análisis con el anterior, se supondrá que se mantiene el mismo nivel de demanda de las 7:00 am a las 10:00 am y de las 5:00 pm a las 8:00 pm, resultando un total de 900 ciclistas al día. De manera similar al análisis anterior, pero suponiendo que los ciclistas no recorrerán todo el tramo propuesto, se propondrá que en promedio recorrerán

6 km con lo que la reducción de emisiones de CO₂ y el ahorro de agua por la fabricación de autos se obtienen de la siguiente manera:

$$\text{Autos sustituidos por bicicletas} = \frac{(900 \text{ ciclistas})}{\left(1.2 \frac{\text{personas}}{\text{auto}}\right)} = 750 \text{ autos sustituidos}$$

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ evitadas} = \left(0.3 \frac{\text{kg de CO}_2}{\text{km}}\right) (6 \text{ km})(750) = 1,350 \text{ kg de CO}_2$$

$$\text{Litros de agua ahorrados} = (981,000 \text{ litros H}_2\text{O})(750 \text{ autos}) = 735,750,000 \text{ litros H}_2\text{O ahorrados}$$

Para el caso del carril confinado en Paseo de La Reforma, se hará uso de la tabla 7.5.2, donde se muestra el historial de aforos en Av. Paseo de la Reforma y Florencia/Río Tíber

Tabla 7.5.2 Aforo ciclista en Av. Paseo de la Reforma y Florencia/Río Tíber, año y tasa de crecimiento 2008-2013 (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, 2014)

Año	Lado Norte	Lado Sur	Ambos Sentidos	Crecimiento anual
2008	-	-	95	
2009	-	-	105	11 %
2010	660	1,254	1,914	1,723 %
2011	908	1,801	2,709	42 %
2012	1,584	2,052	3,636	34 %
2013	1,788	2,551	4,339	19 %

Se utilizarán los datos del aforo de 2013 del lado Sur al tratarse del más reciente, sin embargo, es importante señalar que con la tendencia general de crecimiento el número actual de ciclistas es significativamente mayor pero por la complejidad de su cálculo se optará por tomar datos reales.

Nuevamente procederemos a calcular el número de autos que se pueden sustituir, las emisiones de CO₂ evitadas y los litros de agua ahorrados:

$$\text{Autos sustituidos por bicicletas} = \frac{(2,551 \text{ ciclistas})}{\left(1.2 \frac{\text{personas}}{\text{auto}}\right)} = 2,125 \text{ autos sustituidos}$$

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ evitadas} = \left(0.3 \frac{\text{kg de CO}_2}{\text{km}}\right) (2.77 \text{ km})(2,125) = 1,765 \text{ kg de CO}_2$$

$$\begin{aligned} \text{Litros de agua ahorrados} &= (981,000 \text{ litros } H_2O)(2,125 \text{ autos}) \\ &= 2,084,625,000 \text{ litros } H_2O \text{ ahorrados} \end{aligned}$$

Por último, para el caso del carril confinado sobre Eje 2 Poniente (Gabriel Mancera), se realizará un procedimiento similar al de la Av. Insurgentes, pues no existen datos de aforos en alguna vía con características y localización similares. Recordando que el carril propuesto tiene 2.00 m de ancho y haciendo uso de la tabla 7.5.1 se determina que el número de ciclistas en hora pico es de 150. Multiplicando este valor por las 6 horas pico que se presentan en el día se obtienen 900 ciclistas promedio al día y se procede a calcular los beneficios ambientales:

$$\text{Autos sustituidos por bicicletas} = \frac{(950 \text{ ciclistas})}{\left(1.2 \frac{\text{personas}}{\text{auto}}\right)} = 750 \text{ autos sustituidos}$$

$$\text{Emisiones de } CO_2 \text{ evitadas} = \left(0.3 \frac{\text{kg de } CO_2}{\text{km}}\right)(4.36 \text{ km})(750) = 981 \text{ kg de } CO_2$$

$$\text{Litros de agua ahorrados} = (981,000 \text{ litros } H_2O)(750 \text{ autos}) = 735,750,000 \text{ litros } H_2O \text{ ahorrados}$$

A continuación se presenta la Tabla 7.5.3 con un resumen de los beneficios ambientales calculados por día para cada propuesta:

Tabla 7.5.3 Resumen de los beneficios ambientales diarios por cada propuesta

Propuesta	Autos sustituidos	Reducción de emisiones de CO ₂ (kg)	Litros de H ₂ O ahorrados
Carril compartido Eje 8 Sur	478	678.6	468,918,000
Carril confinado Av. Insurgentes	750	1,350	735,750,000
Carril confinado Av. Paseo de la Reforma	2,125	1,765	2,084,625,000
Carril Confinado Eje 2 Poniente (Gabriel Mancera)	750	981	735,750,000

Conclusiones y Recomendaciones

Después de analizar la información recabada en este trabajo fue posible hacer propuestas para implementar infraestructura ciclista en la Ciudad de México, así como demostrar los potenciales beneficios ambientales que implican.

De acuerdo a la investigación y propuestas presentadas en este trabajo, es claro que, para mejorar la calidad del aire en la ciudad y, por ende, la calidad de vida, se necesita concientizar a la ciudadanía y a los organismos gubernamentales que tienen la capacidad de tomar decisiones en este rubro, acerca de los beneficios que conlleva privilegiar a la infraestructura ciclista y poder respirar un aire más limpio.

Las propuestas que se observan en el Capítulo 7, pretenden servir como una serie de ejemplos del gran potencial que tiene la ciudad para desarrollar y mejorar las opciones que ofrece para los usuarios ciclistas. Además, sirven como grandes ejemplos de que, con adecuaciones muy simples a las vialidades que permitan sustituir autos por bicicletas, se pueden obtener beneficios ambientales de gran impacto y a corto plazo. Se puede notar que, las condiciones físicas de las vialidades en la ciudad, ofrecen grandes ventajas para implementar infraestructura como la que se propone, pues las bajas pendientes y las pocas curvas que existen favorecen un trazo sencillo y de manera lógica que permita la interconexión con los otros medios de transporte de la ciudad y las otras rutas ciclistas. Cabe resaltar que, estas propuestas son una especie de anteproyecto, pues a partir de la identificación de las mismas y de los potenciales beneficios ambientales que presentan, se deben realizar estudios más concretos en cuestiones técnicas, sociales y de costo-beneficio.

En ocasiones, parecería que los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México nos hemos acostumbrado a vivir en condiciones que afectan nuestra salud e incluso nuestra productividad y estado de ánimo. Puesto que los contaminantes en el aire son prácticamente invisibles en cortas distancias y sus efectos nocivos pueden tardar años en deteriorar nuestra salud, el tema de la calidad del aire ha quedado en segundo plano sin que se le preste la atención necesaria. Sin embargo, como se refleja en esta investigación, hay varios países que han tomado cartas en el asunto y se han comprometido con un desarrollo de ciudades sustentables que, a largo plazo, beneficiará a prácticamente todos los rubros que involucran el desarrollo de una sociedad. Estos países nos demuestran que, con voluntad política, social y una planeación con sentido humano y ambiental, es posible cambiar los paradigmas de la forma de transportarse de la población y con ello, disminuir la demanda de recursos que provocan los asentamientos humanos.

El elemento base a considerar en este nuevo enfoque de desarrollo de infraestructura, es la prioridad de usuarios a beneficiar. Se deben cambiar por completo los modos de pensamiento actuales, los cuales siguen priorizando el uso del automóvil como respuesta a una mala planeación, lo cual sólo genera una mayor necesidad y preferencia por adquirir un automóvil y, la infraestructura vuelve a ser insuficiente en muy poco tiempo. El desarrollo de infraestructura ciclista para trasladarse en esta ciudad debe considerar que, gran parte de la población recorre distancias muy grandes, por lo que, debe pensarse en

infraestructura, como el biciestacionamiento en Pantitlán que permita a los ciclistas utilizar el transporte público para continuar su trayecto.

Otro punto muy importante para que las vías ciclistas funcionen, es la educación vial de todos los usuarios, ya sean peatones, ciclistas o conductores de vehículos motorizados, a respetar los espacios destinados para su circulación y las normas aplicables que existan. Es aquí donde entran en juego, todos los elementos de confinamiento, señalización, control de tránsito y procuración del cumplimiento del reglamento de tránsito. Adicionalmente, para el caso especial de la Ciudad de México, se debe realizar una campaña de gran alcance que concientice a toda la población de los riesgos que existen cuando no se respetan las normas de tránsito y que también provocan fallas en la red de movilidad de la ciudad.

Por último, se debe de tener siempre presente, que la construcción e implementación de infraestructura ciclista para disminuir el uso del automóvil, sólo es una solución parcial para el problema de la mala calidad del aire en la ciudad, pues si sólo se ataca por este camino, no se llegarán a resultados totalmente satisfactorios. Existen otros elementos que deben ser implementados, como por ejemplo, el uso de vehículos eléctricos a gran escala, cambiar de región a las zonas industriales, ampliar la capacidad y alcance del transporte público, así como adquirir unidades nuevas y mejorar la calidad de las carpetas asfálticas que existen en toda la Zona Metropolitana del Valle de México.

Bibliografía

- Bicycle Federation of Australia. (2007). Environmental benefits of cycling. Melbourne, Australia.
- Centro Médico Nacional Siglo XXI. (2007). Hematopoyesis. México, Distrito Federal, México.
- Ciencia y Biología. (2014, Marzo 22). *Ciencia y Biología*. Retrieved Septiembre 8, 2014, from <http://cienciaybiologia.com/medio-ambiente/compuestos-organicos-volatiles-covs-o-vocs>
- CNN México. (2014, Agosto 19). *Las ocho mejores ciudades del mundo para andar en bicicleta*. Retrieved Octubre 02, 2014, from sitio web de CNN México: <http://mexico.cnn.com/salud/2014/08/19/las-8-mejores-ciudades-del-mundo-para-andar-en-bicicleta>
- CNN México. (2014, Diciembre 02). Transporte, la otra crisis de la Ciudad de México. México, Distrito Federal, México.
- Comisión Ambiental Metropolitana. (2011). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. Ciudad de México, Distrito Federal, México.
- Delgado, E. M. (2015, Junio). Tolera México altos niveles de Smog. *Reforma*, pp. 14-17.
- Diario en Bici. (2015). *Diario en Bici*. Retrieved Mayo 3, 2015, from Ecobici en cifras: <http://diarioenbici.com/ecobici-en-cifras/>
- Ecobici. (2015, Abril 7). *Ecobici*. Retrieved Mayo 3, 2015, from Estadísticas de Ecobici: <https://www.ecobici.df.gob.mx/es/estadisticas>
- El Banco Mundial. (2014). *Datos Banco Mundial*. Retrieved Octubre 02, 2014, from Partículas suspendidas respirables PM10: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.PM10.MC.M3>
- El Financiero. (2014, Febrero 18). *El Financiero*. Retrieved Mayo 3, 2015, from Ecobici cubrirá toda la delegación Benito Juárez: <http://www.elfinanciero.com.mx/sociedad/ecobici-cubrira-toda-la-delegacion-benito-juarez.html>
- El Financiero. (2014, Noviembre 12). *El Financiero Tech*. Retrieved Mayo 16, 2015, from Holanda convierte sus ciclovías en caminos solares: <http://www.elfinanciero.com.mx/tech/holanda-convierte-sus-ciclovias-en-caminos-solares.html>
- Enfemenino. (2015, Enero 15). *Disnea: Definición*. Retrieved 03 07, 2015, from sitio web de Onmeda: <http://www.onmeda.es/sintomas/disnea.html>

Facultad de Ingeniería UNAM. (2010). *www.ingenieria.unam.mx*. Retrieved Mayo 15, 2015, from Las Vías: <http://www.ingenieria.unam.mx/~fjgv/Caps%20IT/Capitulo%201c.pdf>

Fimevic. (n.d.). *Ciclovía de la Ciudad de México*. Retrieved Mayo 01, 2015, from Introducción de la Ciclovía de la Ciudad de México: <http://www.fimevic.df.gob.mx/ciclovía/ciclovía.htm>

Gobierno de la Ciudad de México. (2015). *Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal*. Retrieved Junio 13, 2015, from Diagnóstico de la movilidad de las personas en la Ciudad de México: <http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/1diagnostico.htm#subir>

Gobierno del Distrito Federal. (2008, Diciembre 24). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México, Distrito Federal, México.

Gobierno del Distrito Federal. (2015, Febrero 7). *Sedema Fortalece Gobierno CDMX Infraestructura Ciclista*. Retrieved Mayo 1, 2015, from CDMX: <http://www.df.gob.mx/index.php/component/content/article?id=5803>

Grupo Milenio. (2014, Febrero 02). *Milenio.com*. Retrieved Septiembre 10, 2014, from http://www.milenio.com/cultura/Usa-bicicleta-reduce-muertes-contaminacion_0_252574759.html

hipertextual. (2015, Mayo 11). *hipertextual futuro*. Retrieved Mayo 16, 2015, from El éxito de las nuevas carreteras nos señala el futuro: <http://hipertextual.com/2015/05/carretera-solar>

IBM. (2011, Septiembre 8). *Frustration Rising IBM Commuter Pain Survey*. Estados Unidos.

INECC. (2012, Septiembre 26). *Escenarios de mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos*. México, Distrito Federal, México.

Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo. (2014). *Conteo Ciclista 2013*. Ciudad de México.

Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo. (2015). *Ciclovías DF*. Retrieved Mayo 1, 2015, from Mapa con las ciclovías, ciclocarriles y carriles bus-bici del Distrito Federal: https://a.tiles.mapbox.com/v4/itdp_mexico.ho78gjb4/page.html?access_token=pk.eyJ1IjoiaXRkcG1leGljbyIsImEiOiJLQ2I3TGpRIn0.5vOKiHRBTwwiJRmh_Fl3jw#17/19.37325/-99.17066

Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo. (n.d.). *Ciclovías DF*. Retrieved Mayo 1, 2015, from Mapa con las ciclovías, ciclocarriles y carriles bus-bici del Distrito Federal: https://a.tiles.mapbox.com/v4/itdp_mexico.ho78gjb4/page.html?access_token=pk.eyJ1IjoiaXRkcG1leGljbyIsImEiOiJLQ2I3TGpRIn0.5vOKiHRBTwwiJRmh_Fl3jw#17/19.37325/-99.17066

- Instituto para Políticas de Transporte y Desarrollo. (2011, Junio). *Ciclociudades tomo IV. Infraestructura*. México, Distrito Federal, México.
- Kids Health. (1995). *Diccionario KidsHealth* . Retrieved 03 07, 2015, from KidsHealth from Nemours:
http://kidshealth.org/parent/asthma_center/_esp/bronchoconstriction_esp.html
- OMS. (Marzo de 2014). *Calidad del aire (exterior) y salud*. Obtenido de
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Once Noticias. (2013, Enero). *Parametría*. Retrieved Octubre 4, 2015, from Movilidad y transporte en el Distrito Federal:
<http://www.parametria.com.mx/DetalleEstudio.php?E=4539>
- ONU-Hábitat . (2015). *Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015*. Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. (2013). *Estudio de la Reducción de Emisiones y los Co-Beneficios Generados por la Implementación del Programa ECOBICI*. (2010, 2011, 2012). México, Distrito Federal, México.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2011). *SEDEMA*. Retrieved Septiembre 10, 2014, from
<http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/movilidad-sustentable/movilidad-en-bicicleta>
- Secretaría del Medio Ambiente. (2013). *Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero 2012*. México, Distrito Federal, México.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. (2012). *Estrategia de movilidad en bicicleta de la Ciudad de México*. México, Distrito Federal, México.
- SEDEMA. (2014). *Dirección de Monitoreo Atmosférico*. Retrieved Agosto 27, 2014, from aire.df.gob.mx: <http://aire.df.gob.mx/default.php?opc=%27Y6BhnmKkaQ==%27>
- SURA. (2014, Agosto 03). *Ventajas de usar la bicicleta como medio de transporte urbano*. Retrieved Octubre 02, 2014, from sitio web de seguros SURA:
<http://www.sura.com/blogs/autos/ventajas-bicicleta-medio-transporte.aspx>
- Wikipedia. (2014, Febrero 27). *PM10: Wikipedia*. Retrieved from
<http://es.wikipedia.org/wiki/PM10>