INECC

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

2015

Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la Región Centro de México

SEMARNAT

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530. Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

INECC

INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la Región Centro de México

Informe Final

Tomo 2

2015

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES

DIRECTORIO

Dra. María Amparo Martínez Arroyo
Directora General del INECC

Dr. J. Víctor Hugo Paramo Figueroa
Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

Dr. Arturo Gavilán García
Director de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas Productos y Residuos

D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Periférico Sur 5000. Col Insurgentes Cuicuilco
C. P. 04530. Delegación Coyoacán, México D. F.
http://www.inecc.gob.mx

Instituciones participantes

Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Ciencias de la Atmósfera
Instituto de Geografía
Molina Center for Strategic Studies on Energy And Environment

Luis Gerardo Ruiz Suárez	Responsable técnico del proyecto
Calderón Ezquerro María del Carmen	Calidad aerobiológica del aire
Delgado Campos Javier Genaro	Expansión urbana
García Martínez Rocío	Mercurio
García Reynoso José Agustín	Modelación de calidad del aire
Grutter de la Mora Michel	Validación de inventarios (percepción remota)
Molina Luisa	Revisión bibliográfica y reuniones de expertos
Peralta Rosales Oscar	Red de contaminantes climáticos de vida corta
Torres Jardón Ricardo	Validación de inventarios (estaciones de monitoreo)
Zavala Hidalgo Jorge	Climatología y meteorología

Adams David K.	Hernández Mauricio	Plaza Medina Eddy Francis
Almanza Víctor	Herrera Moro Dulce Rosario	Quintanar Isaías Arturo
Alvarez Harry	Hidalgo Cristal	Rangel García Martín
Andraca Ayala Gema Luz	Liñán Rafael	Reyes García Víctor
Barrera Huertas Hugo Alberto	López Espinoza Erika Danae	Rivera Cárdena Claudia
Carabali Giovanni	Mar Morales Berta Eugenia	Romero Centeno Rosario de Lourdes
Castillo Javier	Martínez López Benjamín	Ruiz Angulo Angel
Castro Telma	Martínez Trejo Karla Ariadne	Saavedra Isabel
De Foy Benjamín	Mendoza Alejandra	Santiago López Ivonne
Espinoza María de la Luz	Ortínez Abraham	Stremme Eimer Wolfgang
García Yee José Santos	Osorio Tai María Elena	Suárez Lastra Manuel
Gómez Ramos Octavio	Pavia Rubén	Téllez-Unzueta Fernando
Guerrero Guerra César	Pérez Hernández Arturo Edgar	Wellens Purnal Ann Godelieve

Contenido del tomo 2

Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la Región Centro de México 425

Índice de tablas 433

Índice de figuras 434

Anexo 3 Expansión urbana en la Corona Regional del Centro de México y generación de mapas de excedencias 439

Resumen 440

3.1 Antecedentes y definición de términos 440

3.2 Métodos 441

3.3 Resultados 444

3.3.1 POBLACIÓN EN LA CORONA REGIONAL 444

3.3.1.1 Análisis de la dinámica demográfica de la Corona Regional 2000-2010 444

3.3.1.2 Dinámica de las localidades pequeñas en las zm de la Corona 446

3.3.2 ECONOMÍA DE LA CORONA REGIONAL 1999-2009 448

3.3.2.1 Personal empleado por sector económico 448

3.3.2.2 Unidades económicas por sector económico 450

3.3.2.3 Valor agregado censal bruto por sector económico (vacb) 450

3.3.2.4 Cociente de localización por sector económico, 2009 453

3.3.3 ESPECIALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS 1999-2009 454

3.3.3.1 Terciario 455

3.3.3.2 Transformación 455

3.3.3.3 Industria extractiva 457

3.3.3.4 Primario 457

3.3.4 FLUJOS INTRARREGIONALES DE TRABAJO EN LA CORONA REGIONAL 458

3.3.4.1 Flujos al trabajo 458

3.3.4.2 Población que trabaja en otro municipio 2000-2010 458

3.3.4.3 Índice de atracción 460

3.3.5 DISTANCIAS AL TRABAJO 461

3.3.5.1 Distancias promedio del lugar de residencia al de trabajo 2010 462

3.3.5.2 Automóviles en la Corona Regional 464

3.3.6 EXPANSIÓN URBANA 2000-2010 464

3.3.7 ESCENARIOS PROBABLES DE URBANIZACIÓN 2020 (SUPERFICIE URBANA POR AGEB) 466

3.3.7.1 Grado de consolidación urbano regional 2000-2010 466

3.3.7.2 Escenario de expansión urbana de la Corona Regional, 2020 472

3.3.7.3 Asignación de crecimiento por municipio 476

3.4 Conclusiones 477

Bibliografía 479

Apéndice cartográfico 481

Población en la Corona Regional 481

ACTIVIDADES ECONÓMICAS 481

Población Ocupada y Coeficiente de Localización por sector: 481

FLUJOS INTRARREGIONALES DE TRABAJO EN LA CORONA REGIONAL 481

DISTANCIAS AL TRABAJO 481

EXPANSIÓN URBANA 2000-2010 481

Ciudades Principales 481
Ciudades Secundarias 481
ESCENARIOS PROBABLES DE URBANIZACIÓN 2020 482

Apéndice municipal 498
NOMBRES Y CLAVES GEOESTADÍSTICAS 498

Apéndice metodológico 501
EXPANSIÓN URBANA 501
Ciudades principales 501
Ciudades secundarias 501
Cambio en la densidad de población 502
Automóviles y automóviles per cápita 502
Actividades económicas 502
Índice de atracción 502
Personas que trabajan en otro municipio 503
Flujos de trabajo 503
Grado de consolidación urbano regional (GCUR) 503
INDICADORES DEL GCUR 504
Densidad de Población 504
Nivel de urbanización 504
Porcentaje de población económicamente activa (pea) no agrícola 504
Distancia de la cabecera del municipio a la cabecera municipal principal de la Zona Metropolitana más cercana 505
Coeficiente de localización del sector industrial 505
Índice de dispersión 505
Intensidad de Uso de Tierra Agrícola 505
Industrialización Rural 505
Migración indirecta 506
Escenarios de expansión urbana 506

Anexo 4 Calidad aerobiológica del aire 507
Resumen 509
4.1 Introducción 509
4.2 Objetivo general 510
4.3 Áreas de estudio 510
4.4 Método de monitoreo 510
4.5 Resultados 511
4.5.1 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CRCM 511
4.5.2 INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE MÉXICO 517
4.5.2.1 Vegetación en la ciudad de Toluca 520
4.5.3 INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE MORELOS 521
4.5.4 VEGETACIÓN DE LA CIUDAD DE CUERNAVACA 527
4.5.5 INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA 529
4.5.5.1 Vegetación en la ciudad de Puebla de los Ángeles 531
4.6 Discusión 532

4.7 Conclusiones, propuestas de política pública y propuestas de investigación 532
4.7.1 PROPUESTAS DE POLÍTICA PÚBLICA 533
4.7.2 PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN 533

Referencias 533

Apéndice 1 **537**

Anexo 5 ¿Qué podemos aprender de la campaña MILAGRO sobre la calidad del aire en la Corona Regional del Centro de México? **551**

Introducción 553
1) Recopilación bibliográfica para identificar fuentes de información útil **553**
2) Revisión de datos utilizados en publicaciones de interés para el proyecto **553**
3) Selección de expertos **554**
4) Lecciones aprendidas en las campañas de mediciones **554**

5.1 Bibliografía para el proyecto ECAIM 555
5.1.1 INTRODUCCIÓN 555
5.1.2 PRINCIPALES CAMPAÑAS DE CAMPO EN LA ZMVM 555
5.1.3 METEOROLOGÍA Y DINÁMICA EN LA ZMVM 556
5.1.4 EMISIONES 557
5.1.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES 557
5.1.6 FOTOQUÍMICA 558
5.1.7 AEROSOLES 559
5.1.8 PROPIEDADES ÓPTICAS DE AEROSOLES 559
5.1.9 SALUD 560
5.1.10 POLÍTICAS PÚBLICAS 561
5.1.11 MEDICIONES REMOTAS CON SATÉLITES 561
5.1.12 CAMPAÑAS INTERNACIONALES DE MEDICIÓN 562
5.1.13 ESTUDIOS REGIONALES ALREDEDOR DE LA ZMVM 562
5.1.14 LISTA DE EXPERTOS 564
5.1.15 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 565

Lista de artículos 565

5.2 Publicaciones relacionadas con la calidad del aire en la región de la Corona 573
DATOS UTILIZADOS EN ESTUDIOS PREVIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO 573
5.2.1 CATEGORÍAS 574
5.2.1.1 *Criteria* (Gases criterio) **575**
5.2.1.2 *Aerosol* (Aerosoles) **575**
5.2.1.3 *voc* (cov, compuestos orgánicos volátiles) **575**
5.2.1.4 *Meteorology* (Meteorología) **576**
5.2.1.5 *Gas Phase* (Fase Gas) **577**
5.2.1.6 *Radiation* (Radiación) **577**
5.2.1.7 *Aerosol Optical Properties* (propiedades ópticas de aerosoles) **577**
5.2.1.8 Mediciones de perfiles verticales **578**
5.2.1.9 *Miscellaneous* (Misceláneos) **578**
5.2.2 PLATAFORMAS DE MEDICIÓN 578
5.2.3 DATOS SATELITALES 579
5.2.4 DATOS DE MONITOREO 580
5.2.5 PUNTOS A CONSIDERAR 581
5.2.6 CONCLUSIONES 581
LISTA DE ARTÍCULOS 582

5.3 Primera reunión de expertos 583
INTRODUCCIÓN 583

5.3.1 EXPANSIÓN URBANA 583
5.3.2 METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA EN LA REGIÓN DE LA CORONA 586
5.3.3 EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES 589
5.3.4 MATERIAL PARTICULADO 592
5.3.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES 595
5.3.6 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE 597
5.3.7 MONITOREO DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE 599
5.3.8 IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE 600
5.3.9 CONCLUSIONES 603
5.3.9.1 Expansión urbana 603
5.3.9.2 Inventario de emisiones 603
5.3.9.3 Meteorología y climatología 604
5.3.9.4 Material particulado 604
5.3.9.5 Compuestos orgánicos volátiles 605
5.3.9.6 Modelación de la calidad del aire 606
5.3.9.7 Monitoreo de la calidad biológica del aire 606
5.3.9.8 Impactos de la contaminación del aire 607

5.4 Segunda reunión de expertos 608
INTRODUCCIÓN 608
5.4.1 MEDICIONES DE CAMPO DE LAS CAMPAÑAS MCMA-2002/2003 Y MILAGRO-2006 608
5.4.2 METEOROLOGÍA Y DINÁMICA 610
5.4.3 EMISIONES 613
5.4.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES 614
5.4.5 MATERIAL PARTICULADO 615
5.4.6 FOTOQUÍMICA REGIONAL Y URBANA 616
5.4.7 SITIOS DE MONITOREO 617

Conclusiones 619

Referencias 620

Apéndice 1 621

Apéndice 2 635

LISTA DE REFERENCIAS 635

Anexo 6 Red de carbono negro y forzantes climáticos persistentes en el Centro de México 653

Resumen 655

Prefacio 655

6.1 Introducción 656
6.1.1 CARBONO NEGRO 658
6.1.2 FLUJOS DE CO_2 659

6.2 Objetivo 661

6.3 Método e instrumentación 661
6.3.1 INSTRUMENTACIÓN 661
6.3.2 MEDICIONES DE CARBONO NEGRO 661
6.3.3 MEDICIONES DE CARBONO ELEMENTAL Y ANÁLISIS ELEMENTALES 663
6.3.4 PUNTOS DE MUESTREO 663
6.3.5 MATERIAL PARTICULADO 663
6.3.5.1 Sustratos 664

6.3.5.1.1 Cuarzo 664
6.3.5.1.2 Teflón 664
6.3.5.1.3 Policarbonato 664
6.3.5.2 Muestreo 665
6.3.6 FLUJOS DE CO_2 667

6.4 Resultados 667
6.4.1 CARBONO NEGRO 669
6.4.2 MATERIAL PARTICULADO 673
6.4.3 FLUJOS DE CO_2 Y H_2O 675
6.4.4 CONCENTRACIONES DE CO_2 Y CH_4 676

6.5 Comentarios 679

6.6 Recomendaciones 679

Glosario 681

Referencias 682

Apéndices 685

Eddy Pro 685

Analizador termoóptico de celda culombimétrica (UIC) 687

Anexo 7 Emisiones de mercurio al sur de la Sierra Gorda de Querétaro 689

Resumen 691

Introducción 692

7.1 Antecedentes 693

7.2 Objetivos 694
7.2.1 OBJETIVO GENERAL 694
7.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES 694

7.3 Diseño experimental 694
7.3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO 694

7.4 Método 695
7.4.1 SITIO DE MUESTREO 696
7.4.2 MÉTODO PARA ESTIMACIÓN CUANTITATIVA DE EMISIONES 698
Modelo: Weather Research and Forecasting (wrf) 700
Modelo: Calpuff 700
7.4.3 EXTRACCIÓN DE MERCURIO 702

7.5 Resultados 704
7.5.1 TRAYECTORIAS WRF 704
7.5.2 MODELO CALPUFF 709
Periodo del 3 al 24 de marzo (estudio exploratorio) 709
7 al 15 de marzo 2015 (calibración del modelo Calpuff) 710
7.5.3 FUENTES DE EMISIÓN MINERA 710
7.5.4 PRODUCCIÓN MINERA DE MERCURIO 712
7.5.5 FACTORES DE EMISIÓN MERCURIO 713
7.5.6 RESUMEN DE LAS EMISIONES EMPLEADAS EN EL MODELO CALPUFF 714
7.5.7 EMISIONES EMPLEADAS POR EL MODELO CALMET 714
7.5.8 MONITOREO DE MERCURIO ATMOSFÉRICO EN SAN JOAQUÍN 719
7.5.9 MONITOREO DE DEPOSITO HÚMEDO (LLUVIA) 719

7.6 Discusión 722
7.7 Conclusión 723
7.8 Recomendaciones 724
Glosario 725
Referencias 726

Índice de tablas

Tabla A03-1 Población total, área y densidad urbanas en la CRCM, 2000-2010 444
Tabla A03-2 Población (miles de habitantes) de las ciudades principales y secundarias de la CRCM, por rango de población, 2000-2010 447
Tabla A03-3 Tasas de crecimiento en las ciudades principales y secundarias de la CRCM, por rango de población, 2000-2010 448
Tabla A03-4 Personal ocupado total por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009 449
Tabla A03-5 Unidades económicas por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009 451
Tabla A03-6 Valor agregado censal bruto por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009 452
Tabla A03-7 Cociente de localización por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009 453
Tabla A03-8 Distancias promedio de recorrido al trabajo por zona metropolitana 463
Tabla A03-9 Varianza acumulada del análisis por componentes principales (ACP) 467
Tabla A03-10 Matriz de correlación de los resultados del ACP y los indicadores del ICUR ajustado. 468
Tabla A03-11. Características de los conglomerados de la consolidación urbano-regional 469
Tabla A03-12 Variables utilizadas para el modelo calibrado de urbanización 473
Tabla A03-13 Modelo calibrado logístico binomial de probabilidad de urbanización en la ZMCM, 2000-2010 474
Tabla A03-14. Escenario de población y superficie urbanas a 2020 477
Tabla A04-1 Tipos polínicos identificados en muestras de aire en la CRCM 513
Tabla A04-2 Porcentajes de los tipos polínicos más abundantes colectados de las ciudades de Toluca, Cuernavaca y Puebla. 516
Cuadro A04-1. Vegetación y uso de suelo del Estado de México 520
Cuadro A04-2. Número de especies en los principales tipos de vegetación fanerogámica e importancia porcentual estimada 527
Tabla A05-1 Principales campañas de campo en la ciudad de México 555
Tabla A05-2 Campañas internacionales de medición y ediciones especiales sobre megaciudades 563
Tabla A05-3 Lista de expertos 564
Tabla A05-4 Número de publicaciones que usaron los datos de las mediciones para cada categoría 574
Tabla A05-5 Datos de diferentes sitios en superficie y plataformas aéreas usados en las publicaciones. 579
Tabla A05/Ap01-1. Principales instrumentos satelitales, características, y especies químicas que pueden medirse (adaptado de Streets *et al.,* 2013) 621
Tabla A05/Ap01-2. Categorías y palabras clave de las mediciones experimentales utilizadas para clasificar las publicaciones 622
Tabla A05/Ap01-3: Lista de referencias con las palabras clave 626
Tabla A06-1 Instrumentos de la campaña ACU15 662
Tabla A06-2 Información de impactadores MiniVol para la campaña ACU15 664
Tabla A06-3 Calendario de muestreo 665
Tabla A06-4 Altura correspondiente de cada equipo (m) 665
Tabla A06-5 Correcciones del coeficiente de absorción de masa CAM (m^2/g) para muestreo de agosto de 2013 668
Tabla A06-6 Carbono elemental en muestras recolectadas en marzo 2014 668
Tabla A06-7 Concentraciones respectivas de cada filtro en masa ($\mu g\ m^{-3}$) obtenidas por día de muestreo 674
Tabla A06-8 Concentraciones respectivas de cada filtro en masa ($\mu g\ m^{-3}$) obtenidas por día de muestreo 680
Tabla A07-1 Normatividad aplicable; valores de referencia para exposición humana a mercurio y sus compuestos (OEHHA/ARB, 2014) 696
Tabla A07-2 Localización de minas artesanales de mercurio en San Joaquín, Qro. 711
Tabla A07-3 Características de las fuentes visitadas en San Joaquín, Qro. 714
Tabla A07-4 Concentración de mercurio en agua de lluvia colectadas en abril y mayo en San Joaquín, Qro. 722

Índice de figuras

Figura A03-1 Área urbana de la zona de estudio, Corona Regional, 2000-2010. 445
Figura A03-2 Densidad de población en la Corona Regional, 2010. 445
Figura A03-3 Cambio en la densidad de población, Corona Regional, 2000-2010. 446
Figura A03-4 Especialización económica, 1999. 454
Figura A03-5 Especialización económica, 2009. 455
Figura A03-6 Personal ocupado en el agrupamiento terciario, 2009. 456
Figura A03-7 Personal ocupado en el agrupamiento transformación, 2009. 456
Figura A03-8 Personal ocupado en el agrupamiento industria extractiva, 2009 457
Figura A03-9 Personal ocupado en el agrupamiento primario, 2009. 458
Figura A03-10 Porcentaje de la población que trabaja en un municipio distinto al de residencia, 2010. 459
Figura A03-11 Población (%) que trabaja en un municipio distinto al de residencia, cambio 2000-2010 460
Figura A03-12 Índice de atracción, cambio 2000-2010. 461
Figura A03-13 Distancia promedio recorrida para ir al trabajo desde el municipio de residencia, 2010. 462
Figura A03-14 Cambio en la distancia promedio para ir al trabajo desde el municipio de residencia, 2000-2010. 463
Figura A03-15 Automóviles per cápita por municipio. 2010. 465
Figura A03-16 Expansión urbana en la Corona Regional, por AGEB 2000-2010. 465
Figura A03-17 Matriz de correlación de los resultados del ACP y los indicadores del IURP. 469
Figura A03-18 Grado de consolidación urbano regional, 2000. 470
Figura A03-19 Grado de consolidación urbano regional, 2010. 471
Figura A03-20 Probabilidad de urbanización, 2020. 475
Figura A03-21 Escenario de urbanización, 2020. 476
Mapa MC-A03-01 Personal ocupado total en el Sector Servicios, 2009 482
Mapa MC-A03-02 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Servicios 1999-2009 482
Mapa MC-A03-03 Personal ocupado total en el Sector Comercio, 2009 483
Mapa MC-A03-04 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Comercio 1999-2009 483
Mapa MC-A03-05 Personal ocupado total en el Sector Manufacturas, 2009 484
Mapa MC-A03-06 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Manufacturas 1999-2009 484
Mapa MC-A03-07 Personal ocupado total en el Sector Finanzas, 2009 485
Mapa MC-A03-08 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Finanzas 1999-2009 485
Mapa MC-A03-09 Personal ocupado total en el Sector Transporte, 2009 486
Mapa MC-A03-10 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Transporte 1999-2009 486
Mapa MC-A03-11 Personal ocupado total en el Sector Construcción, 2009 487
Mapa MC-A03-12 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Construcción 1999-2009 487
Mapa MC-A03-13 Personal ocupado total en el Sector Electricidad, Agua y Gas, 2009 488
Mapa MC-A03-14 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Electricidad, Agua y Gas 1999-2009 488
Mapa MC-A03-15 Personal ocupado total en el Sector Minería, 2009 489
Mapa MC-A03-16 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Minería 1999-2009 489
Mapa MC-A03-17 Población que trabaja en otro municipio, 2000 490
Mapa MC-A03-18 Coeficiente de Localización de población que trabaja en otro municipio, 2000 490
Mapa MC-A03-19 Coeficiente de Localización de población que trabaja en otro municipio, 2010 491
Mapa MC-A03-20 Coeficiente de Localización del cambio de la población que trabaja en otro municipio 2000-2010 491
Mapa MC-A03-21 Índice de atracción, 2000 492
Mapa MC-A03-22 Índice atracción, 2010 492
Mapa MC-A03-23 Automóviles totales por municipio, 2010 493

Mapa MC-A03-24 Expansión urbana en la ZM ciudad de México 2000 - 2010 493
Mapa MC-A03-25 Expansión urbana en la ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco 2000 - 2010 494
Mapa MC-A03-26 Expansión urbana en la ZM Toluca 2000-2010 494
Mapa MC-A03-27 Expansión urbana en la ZM Cuernavaca 2000 - 2010 495
Mapa MC-A03-28 Expansión urbana en la ZM Pachuca 2000 - 2010 495
Mapa MC-A03-29 Expansión urbana en la ZM Cuautla 2000-2010 496
Mapa MC-A03-30 Expansión urbana en la ZM Tulancingo 2000-2010 496
Mapa MC-A03-31 Expansión urbana en la ZM Tula 2000-2010 497
Figura A04-1 Ubicación de las estaciones de muestreo aerobiológico en la Corona Regional del Centro de México. Toluca (Localización: 19°18'24.35"N, 99°37'47.68"O), Morelos (Localización: 18°58'50.48"N, 99°14'7.68"O) y Puebla (Localización: 19° 1'52.21.21"N, 98°14'28.88"O). 510
Figura A04-2 A) Trampa de esporas tipo Hirst; B) Cinta con aeropartículas muestreadas; C) Flor con polen; D) granos de polen colectados del aire. 511
Figura A04-3 Tipo de Vegetación en la CRCM, mostrando la vegetación de las cuencas de Toluca, Morelos y Puebla. 511
Figura A04-4 Porcentaje de tipos de vegetación, según los pólenes colectados de la atmósfera de Toluca, Méx. (jun. 2014-mar. 2015); Cuernavaca, Mor. (sep. 2014-mar. 2015), y Puebla, Pue. (ene.-mar. 2015). 512
Figura A04-5 Variación estacional de la concentración de granos de polen totales en la atmósfera de las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Puebla. 514
Figura A04-6 Variación estacional de la concentración de granos de polen de árboles en la atmósfera de las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Puebla. 515
Figura A04-7 Variación estacional de la concentración de granos de polen de herbáceas en la atmósfera de las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Puebla. 516
Figura A04-8 Tipos de vegetación presentes en el Estado de México de México y localización de la TEH en el sitio del muestreo aerobiológico en la ciudad de Toluca. 518
Figura A04-9 Tipos de vegetación presentes en el estado de Morelos y localización de la TEH en el sitio del muestreo aerobiológico en la ciudad de Cuernavaca. 521
Figura A04-10 Tipo de Vegetación en el estado de Puebla y en la ciudad Puebla de los Ángeles. 530
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 01: Bosque de coníferas primario (3) 537
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 02: Bosque de coníferas secundario (2) 537
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 03: Bosque de latifolias primario (2) 538
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 04: Bosque de latifolias secundario (1) 538
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 05: Bosque de coníferas-latifolias primario (2) 539
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 07: Bosque mesófilo de montaña primario (1) 539
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 08: Bosque mesófilo de montaña secundario (2) 540
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 10: Selva perennifolia y subperennifolia secundario (2) 540
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 11: Selva caducifolia y subcaducifolia primario (2) 541
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 12: Selva caducifolia y subcaducifolia secundario (1) 541
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 13: Mezquital primario (1) 542
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 14: Mezquital secundario (2) 542
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 15: Pastizal natural primario (3) 543
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 17: Matorral xerófilo primario (3) 543
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 18: Matorral xerófilo secundario (1) 544
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 19: Vegetación hidrófila primario (1) 544
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 20: Vegetación hidrófila secundario (2) 545
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 21: Otro tipo de vegetación (1) 545
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 22: Área sin vegetación aparente (2) 546
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 22: Pastizal inducido o cultivado (1) 546
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 24: Plantación forestal (2) 547
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 25: Agricultura (riego y humedad) (3) 547

Anexo 04, apéndice 1 Mapa 26: Agricultura de temporal (1) 548
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 28: Asentamiento humano (1) 548
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 29: Cuerpo de agua (2) 549
Figura A05-1 Modelo conceptual de la circulación del viento en la cuenca de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) durante las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO (fuente: de Foy et al., 2008) 611
Figura A05-2 Torre de flujo usando la técnica de covarianza turbulenta instalada en el Simat durante la campaña MILAGRO. Perfil diurno de olefinas estimado con mediciones de flujo y comparado con el inventario de emisiones 2006 usado en modelación. 614
Figura A05-3 Composición promedio de partículas gruesas y finas en los supersitios T0 y T1. La gráfica incluye compuestos orgánicos (verde), carbono negro (negro), material mineral (café), elementos traza (gris), iones sulfato (rojo), iones nitrato (azul), iones de cloro (rosa) e iones amonio (amarillo). El supersitio T1 se afectó por resuspensión local de polvo, lo que explica la contribución inusual de material mineral en el lugar de la fracción gruesa (80%). (Fuente: Molina et al., 2010.) 615
Figura A05-4 Distribución espacial de la proporción de producción de peróxido de hidrógeno y de ácido nítrico a las 14:00 hora local del 7 (panel izquierdo) y 27 (panel derecho) de marzo de 2006 bajo diferentes condiciones meteorológicas, episodio O3-sur (izq) y Convección-Norte (der), mostrando la sensibilidad a COV (rosa); NO_x (cyan) y las zonas de transición (café). Tomado de Song et al., 2010. 616
Figura A05-5 Ubicación de sitios de monitoreo: identificar distintos objetivos de medición. El panel de la izquierda muestra una imagen de la ZMVM. El panel de la derecha ejemplifica los tipos de emisiones a nivel ultra-local (superior) de utilidad para impactos locales en salud; nivel local (intermedio) de utilidad para impactos a nivel urbano y representativos de un área en particular (inferior) de utilidad para evaluar impactos regionales y procesos atmosféricos. 618
Figura A06-1 Altura de cada equipo (m). 666
Figura A06-2 Distancia entre equipos y bordes de la azotea en sitio de muestreo. 666
Figura A06-3 Fotografías de los equipos y sus posiciones. 666
Figura A06-4 Serie de tiempo de concentración de carbono negro medido con etalómetros. 667
Figura A06-5 Serie de tiempo de la media móvil de la concentración de carbono negro medido con etalómetros. 669
Figura A06-6 Histogramas y dispersión de datos de los etalómetros. 670
Figura A06-7 Regresión lineal de datos de los etalómetros y distribución de residuos. 670
Figura A06-8 Promedio semanal de carbono negro. 671
Figura A06-9 Concentración ambiental de carbono negro en Juriquilla, Qro. y Coyoacán, México, D.F., en diciembre 2014. 671
Figura A06-10 Dispersión de datos de CN. 672
Figura A06-11 Series de tiempo de los etalómetros. 673
Figura A06-12 Filtros de cuarzo antes y después del muestreo. 673
Figura A06-13 Flujos de CO_2 y H_2O. 675
Figura A06-14 Histogramas y dispersión de datos de flujos de CO_2 y H_2O. 675
Figura A06-15 Series de tiempo de 24 horas de las concentraciones promedio de CO_2 (ppm) generadas con la Torre de Flujos y el PICARRO. 676
Figura A06-16 Series de tiempo de 24 horas de las concentraciones promedio de CH4 (ppm) generadas con la Torre de Flujos y el PICARRO. 677
Figura A06-17 Gráficas de dispersión de las concentraciones de CO_2 entre la Torre de Flujos y el PICARRO. 678
Figura A06-18 Gráficas de dispersión de las concentraciones de CH_4 entre la Torre de Flujos y el PICARRO. 678
Figura A07-1 Ubicación de la región de San Joaquín, Querétaro. Información de marco estadístico de INEGI 2013. 695
Figura A07.2 Instalación y operación del analizador automático de vapor de mercurio Tekran Modelo 2537A. 697
Figura A07-3 Colector Automático de lluvia (Andersen, General Metal Works, Inc.) wet/dry, modelo 78-100. 698
Figura A07-4 Diagrama de flujo del modelo WRF 3.0. Tomada de Skamarock et al., 2008. 700
Figura A07-5 Horno artesanal y tubos de condensación. 704
Figuras A7-6a y b Área de modelación del dominio mayor (a) y domino interior (b) para trayectorias de emisiones; se presentan la topografía y la división política. 705
Figura A07-7 Topografía, zona urbana y trayectorias horarias de las emisiones de San Joaquín durante marzo 2015. Cada punto representa una hora, el recorrido es de ocho horas a partir de San Joaquín. 705
Figura A7-8 Trayectorias del mes y días seleccionados; enero a abril. 706

Figura A7-8 Trayectorias del mes y días seleccionados; mayo a agosto. 707
Figura A7-8 Trayectorias del mes y días seleccionados; septiembre a diciembre. 708
Figura A07-9a Concentración horaria máxima de Hg encontrada en la zona, 3 al 24 de marzo de 2011. 709
Figura A07-9b Concentración diaria máxima de Hg encontrada en la zona, 3 al 24 de marzo de 2011. 709
Figura A07-10 Topografía del área circundante a la zona minera de San Joaquín. Se indica con marcas rojas las fuentes de emisión y con punto azul los puntos de monitoreo. 710
Figura A07-11a Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 13 de enero 2012. 715
Figura A07-11b Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 27 de enero 2012. 716
Figura A07-11c Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 17 de abril 2012. 716
Figura A07-11d Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima e Hg, 14 de mayo 2012. 717
Figura A07-11e Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 20 de julio 2012. 717
Figura A07-11f Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 12 de septiembre 2012. 718
Figura A07-11g Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 16 de noviembre 2012. 718
Figura A07-12 a, b y c Concentraciones de mercurio atmosférico mensual (marzo, abril y mayo 2015. 720
Figura A07-13 a y b Rosas de viento abril mayo 2015. 721

Anexo 3 Expansión urbana en la Corona Regional del Centro de México y generación de mapas de excedencias

Resumen

El objetivo de este capítulo es identificar los espacios periurbanos emergentes en la Corona Regional del Centro de México (CRCM), bajo el supuesto de que en ellos se generan emisiones de contaminantes que no están siendo registradas en los inventarios de emisiones actuales. Primero, se analiza la localización y dinámica de las actividades económicas en los municipios de la corona regional. Ello sirve como base para estimar los flujos interregionales y las distancias recorridos por la población para llegar a su lugar de trabajo, así como una aproximación al uso de automóviles particulares en la región. Se generó un modelo de expansión probable de urbanización de las distintas zonas metropolitanas, ciudades medias y pequeñas al 2020. Por último, se identificaron varios conglomerados de espacios periurbanos no considerados en los diferentes instrumentos de planeación urbana, rural o regional.

3.1 Antecedentes y definición de términos

La expansión de las periferias de las ciudades en países en desarrollo durante las últimas dos décadas se ha generalizado sin un control gubernamental efectivo; al mismo tiempo las respuestas sugeridas por la academia a partir de las nociones convencionales que separan lo urbano de lo rural, han perdido capacidad explicativa.

A diferencia de la urbanización observada desde los años 50 a fines del siglo pasado, la expansión reciente se combina y sobrepone con espacios y procesos, ya no sólo rurales y aun no propiamente urbanos. Esta mezcla dificulta el establecimiento de límites precisos entre ambos territorios, suponiendo que en algún momento tuvieron sentido. El paso de un tipo de expansión, relativamente concentrada a otra relativamente dispersa, responde a cambios económicos que modifican la espacialidad conocida de lo urbano hacia otra, que se ha propuesto denominar periurbana, hasta ahora, difícil de conceptualizar y territorializar. Una de las dificultades principales en la nueva conceptualización ha sido resolver la transición de enfoques basados en el concepto de conurbación, entonces clave en los estudios sobre el crecimiento urbano, hacia otro que explique el surgimiento de espacios no conurbados de la periferia pero vinculados funcionalmente con los centros y desde ahí con sitios más alejados y dispersos como son los espacios periurbanos.

Los cambios económicos como la terciarización de las áreas centrales de la ciudad y la salida de industrias hacia localizaciones rurales que explican esa transición territorial en las ciudades han sido más estudiados. En ambos procesos, la migración antes dirigida a las ciudades primadas[1] se reorienta en forma creciente hacia ciudades secundarias y pequeñas. Por su parte, los cambios identificados en lo rural subrayan más el papel de los

[1] Es la mayor jerarquía que una ciudad alcanza dentro de un sistema urbano nacional o regional

actores, así como los procesos entre actores sociales e institucionales, y menos de la espacialidad de los mismos, o mejor aún, circunscribiendo esos cambios territoriales a lo local y, en ocasiones a la escala micro regional (Geyer y Kontully, 1993).

Por otro lado, aunque el análisis económico regional está bien documentado, el interés se ha centrado en las ciudades de mayor jerarquía y en menor medida en las ciudades medias. Lo mismo sucede con los flujos interregionales en donde se han privilegiado los que se originan o terminan en las ciudades grandes y medianas. De los desplazamientos de personas que trabajan fuera de su municipio y las distancias que recorren para ello, a escala de región, se conocen muy pocos estudios previos, lo mismo que para la estimación de la tenencia de autos privados a escala regional.

En cuanto a la predicción de la urbanización existen algunos antecedentes, realizados principalmente para la ciudad de México. Cuando se cambia la escala de análisis hacia un enfoque regional, se han aportado avances hacia una redefinición de categorías nuevas, aunque no siempre coincidentes, como son el de corona regional y su diferencia conceptual con megalópolis, urbanización difusa o metrópolis ampliada. El término de periurbanización que se adopta en este estudio se ha considerado el más apropiado.

3.2 Métodos

En este capítulo se aplica a escala regional el método propuesto anteriormente para la ciudad de México, con algunos ajustes necesarios. En el equipo de trabajo disponíamos de un modelo predictivo de la expansión probable con base en ocho variables principales[2]. A la vez, para identificar su dinámica a escala regional, contábamos con un Índice de Consolidación Urbana Regional (ICUR)[3] que medía la extensión de la influencia de las ciudades, grandes, medianas, pequeñas y aun espacios rurales. Dicha extensión prefiguraba una franja geográfica —sin que hubiera necesariamente conurbaciones entre las ciudades involucradas—, que fue denominada como corona regional. Por su parte, habíamos obtenido los primeros resultados en la identificación de los espacios periurbanos al agrupar variables significativas del ámbito rural en un Índice de Consolidación Urbano Rural (IRUR)[4].

[2] Las variables eran: i) distancia a vías primarias de transporte (km); ii) distancia a la localidad más cercana (m); iii) población de la localidad más cercana (miles); iv) inclinación del terreno en el sitio (%); v) número de empleos en manufacturas en el municipio (miles de empleos); vi) número de empleos de servicios en el municipio (miles de empleos); vii) ingreso mediano municipal (salarios mínimos), y viii) proporción de hectáreas dedicadas a la agricultura con sistema de riego (Suarez y Delgado 2007)

[3] El ICUR fue publicado en *Memorias del Congreso de la International Geographic Union* en 1994 (Delgado *et al.*, 1994); la primera formulación del IRUR se publicó por Galindo y Delgado, 2006.

[4] Las variables fueron: i) dispersión rural (Índice de Demangeon); ii) intensidad del uso de tierra agrícola; iii) industrialización rural, y iv) migración indirecta.

Con base en dichos antecedentes, para este proyecto replanteamos totalmente el supuesto de una separación entre lo urbano (ICUR), lo rural (IRUR) y entre ambos y lo regional. La propuesta actual combina con coherencia el análisis, hecho por separado, de la expansión urbana y de los espacios periurbanos, dentro de la corona, agrupando los anteriores índices en uno solo, el ICUR ajustado[5]. Esta unificación permite resolver el problema de tener que delimitar y actualizar constantemente el "área metropolitana" de una ciudad, con base en la extensión de sus contornos metropolitanos.

Con esta propuesta conceptual y metodológica se supera la escasa capacidad explicativa de los enfoques que consideran solamente un municipio —intermedio entre dos ciudades en donde se traslapan sus áreas de influencia—, como indicativo de una condición megalopolitana. En su lugar, sostenemos que la formación de conglomerados de municipios periurbanos es resultado de esa interrelación funcional. La pertinencia del enfoque es muy clara en el caso de Puebla y Cuernavaca en donde la fricción impuesta por el relieve hace difícil el traslape de sus contornos, a pesar de la intensa interrelación funcional entre ellas y la ciudad central. Por su parte, en el caso de Pachuca, con una reducida área de influencia, no se traslapa aún con el cuarto contorno de la ciudad de México, a pesar de que no hay algún obstáculo morfológico evidente pero el poblamiento en su espacio intermedio es muy intenso y empieza a cerrar un arco de urbanización regional alrededor de la cuenca de México, entre Pachuca y una incipiente aglomeración formada por Tula, Tepeji y Zumpango. En todos esos casos el enfoque periurbano llena el hueco que deja la idea del traslape.

Desde este punto de vista ya no tiene sentido hablar de un cuarto contorno de la ciudad de México —con muchos municipios periurbanos—, o de si es necesario identificar uno quinto. La perspectiva analítica que proporciona la metodología del ICUR ajustado es que, en todo caso, el quinto contorno está conformado por las aglomeraciones de espacios periurbanos identificados, que adoptan una morfología muy fragmentada debido a la urbanización difusa, pero sujetos a una dinámica de interrelación espacial prevista por la teoría. Otro problema que el método y enfoque propuestos permite enfrentar, es la falta de la información sobre los flujos de bienes y personas, llamadas telefónicas o flujos de transporte, necesaria para cuantificar y sistematizar la interrelación entre pares de ciudades en un espacio de urbanización difusa.

La pertinencia del alcance regional del modelo se puede constatar cuando al sobreponer los flujos al trabajo sobre el ámbito geográfico de la corona, los flujos más importantes detectados están, en efecto, en ella contenidos.

[5] Las variables del ICUR ajustado fueron: i) densidad de población; ii) nivel de urbanización; iii) PEA no agrícola; iv) distancia de la cabecera municipal al cabecera del municipio principal de la ZM más cercana; v) cociente de localización industrial; vi) índice de dispersión (Demangeon); vii) intensidad agrícola (superficie agrícola de riego); viii) industrialización, y ix) migración indirecta. Dan como resultado nueve componentes en donde los dos primeros acusan una varianza acumulada de 0.51, considerando al primer componente como equivalente de la consolidación urbana y al segundo de la rural.

Sobre la importancia de los flujos al trabajo para la conformación metropolitana, hay menos controversia que sobre la expansión urbana y la periurbanización, aunque no sobre cuál de los factores involucrados —lugar de residencia o lugar de empleo—, es el que los determina (Suárez y Delgado, 2010)

El tema ha sido estudiado más a escala intraurbana y poco menos a una escala regional. En el enfoque al interior de la ciudad predominan varios supuestos. Primero que, por sí solo, ningún modo de transporte es suficiente para resolver la movilidad, segundo, que los flujos al trabajo son los más importantes a considerar, sin menoscabo de los realizados para ir de compras, recoger a los hijos o con motivo de recreación; y tercero, que existe una co-localización entre los lugares de empleo y residencia además de las características socioeconómicas de sus habitantes. En México, se ha estudiado la asociación entre el mercado laboral industrial y la relocalización residencial hacia la periferia, el volumen y dirección de los flujos al trabajo así como la relación entre la movilidad y la segregación socio espacial.

Sin embargo, ante la falta de datos disponibles para intentar a escala regional alguna de las aproximaciones anteriores, en este trabajo extrapolamos a una escala regional los hallazgos previos del equipo de trabajo, realizados a una escala intraurbana, considerando que con la información disponible: i) es posible determinar el sector económico en el que se especializan los municipios de la región y suponer que a mayor especialización es de esperarse una movilidad relativamente estable hacia y desde ellos, ii) es posible conocer el porcentaje de población ocupada por sector económico que trabaja fuera de su municipio de residencia, pero no del municipio de destino, problema que fue enfrentado en el estudio mediante la capacidad de atracción de un municipio (o delegación en el caso del Distrito Federal) estimada como la relación entre la población que sale y la que entra del mismo.

Para finalizar, ante la falta de una fuente confiable sobre el número total de autos en circulación real que tiene la población de los municipios involucrados, recurrimos a una estimación indirecta combinando los datos de la ENIGH y de los microdatos del Censo General de Población. La primera informa sobre el total de automóviles por hogar, el cual permite estimar un cociente de automóviles por estado mientras que la segunda proporciona el total de personas que afirmaron tener automóvil; multiplicando este último por el anterior cociente se obtuvo un proxy del número de automóviles por municipio. Ello nos indica en donde podemos suponer una mayor circulación de unidades y por tanto, un relativamente mayor nivel de emisiones contaminantes que no está siendo registrada. Esta relación debe considerarse como una tendencia, en tanto no se cuente con un registro confiable.

En la solución propuesta para integrar los diferentes enfoques metodológicos utilizados el concepto clave es la escala. Ello permitió entender la transición de las ciudades y los espacios intermedios como ejemplo de urbanización difusa sin recurrir al traslape de áreas de influencia. Este enfoque permite reformular la tradicional dicotomía entre lo urbano y lo rural, la cual ha perdido capacidad explicativa ante la urbanización difusa y periurbana.

3.3 Resultados

3.3.1 POBLACIÓN EN LA CORONA REGIONAL

3.3.1.1 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEMOGRÁFICA DE LA CORONA REGIONAL 2000-2010

En estos 20 años la CRCM se mantiene como un sistema altamente concentrado, con la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM) como lugar central principal y un conjunto de ciudades secundarias, medianas y pequeñas. El mayor cambio visible es la conformación de vastos espacios periurbanos —objeto de mayor análisis en el proyecto— en la periferia de esos nodos, principales y secundarios.

El lugar central disminuyó su tasa de crecimiento (0.9%) y mostró un relativo repunte de las tasas de las ciudades secundarias de más de 2%; Cuernavaca y Cuautla a menor velocidad (1.6-1.7%), y una muy baja de la periferia (0.7%), lo que indica la persistencia un fuerte despoblamiento (**Tabla A03-1**). Este comportamiento es consistente con el modelo de urbanización diferencial de Geller y Kontully (1993) aunque con una limitada reestructuración de la centralidad dentro de un sistema regional hacia las ciudades secundaria y más aun de las pequeñas. Justamente el modelo de Geyer y Kontully es conocido como "*teoría de la ciudad pequeña*".

Tabla A03-1 Población total, área y densidad urbanas en la CRCM, 2000-2010

Zona metropolitana	Población total		TCMA[1]	Área urbana AGEB (ha)		Densidad urbana (AGEB)	
	2000[a]	2010[b]		2000[a]	2010[b]	2000[a]	2010[b]
Ciudades principales							
Ciudad de México	18,396,677	20,116,842	0.9	212,022.20	229,065.00	84.9	85.5
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	2,678,396	3,228,357	2	97,051.70	99,854.90	26	30.4
Toluca	1,540,452	1,936,126	2.6	35,536.00	40,084.30	34.8	38.3
Cuernavaca	798,782	924,964	1.6	19,742.70	20,510.20	37.5	40.5
Ciudades Secundarias							
Pachuca	375,022	512,196	3.7	10,274.40	15,202.90	30	29
Cuautla	372,256	434,147	1.7	10,649.20	10,937.70	29	31.9
Tulancingo	193,638	239,579	2.4	4,560.40	7,372.50	27.2	24.7
Tula	169,901	205,812	2.1	7,761.80	8,665.60	16.1	17.9
Periferia	4,725,162	5,069,145	0.72	84,105.01	89,473.20	56.18	56.66
Corona Regional	29,250,286	32,667,168	1.16	481,703.41	521,166.30	60.72	62.68

Fuentes: a=INEGI 2000, Censos de Población y Vivienda 2000; b=INEGI 2010, Censos de Población y Vivienda 2010.
[1] Tasa de Crecimiento Media Anual.

En cuanto a las densidades urbanas —una de las medidas más certeras de la eficiencia citadina—, una baja densidad caracteriza a todas las ciudades secundarias (**Figura A03-1**).

En el año 2010, la densidad de población más alta en la Corona era de 638 hab./ha en algunas delegaciones de la ZMCM. En el resto de las zonas urbanas, la densidad era menor que 300 hab./ha, mientras que las más bajas, menores que 100 hab./ha, se desplegaban en las distintas periferias urbanas (**Figura A03-2**).

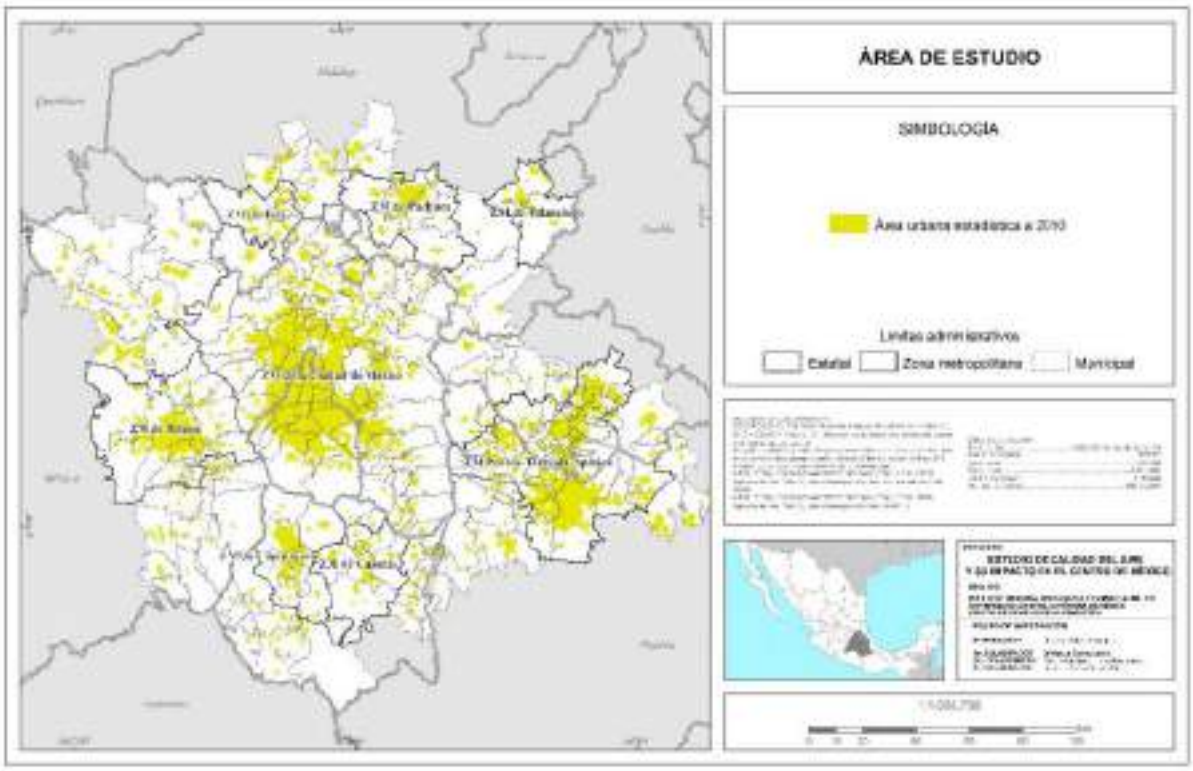


Figura A03-1 *Área urbana de la zona de estudio, Corona Regional, 2000-2010.*

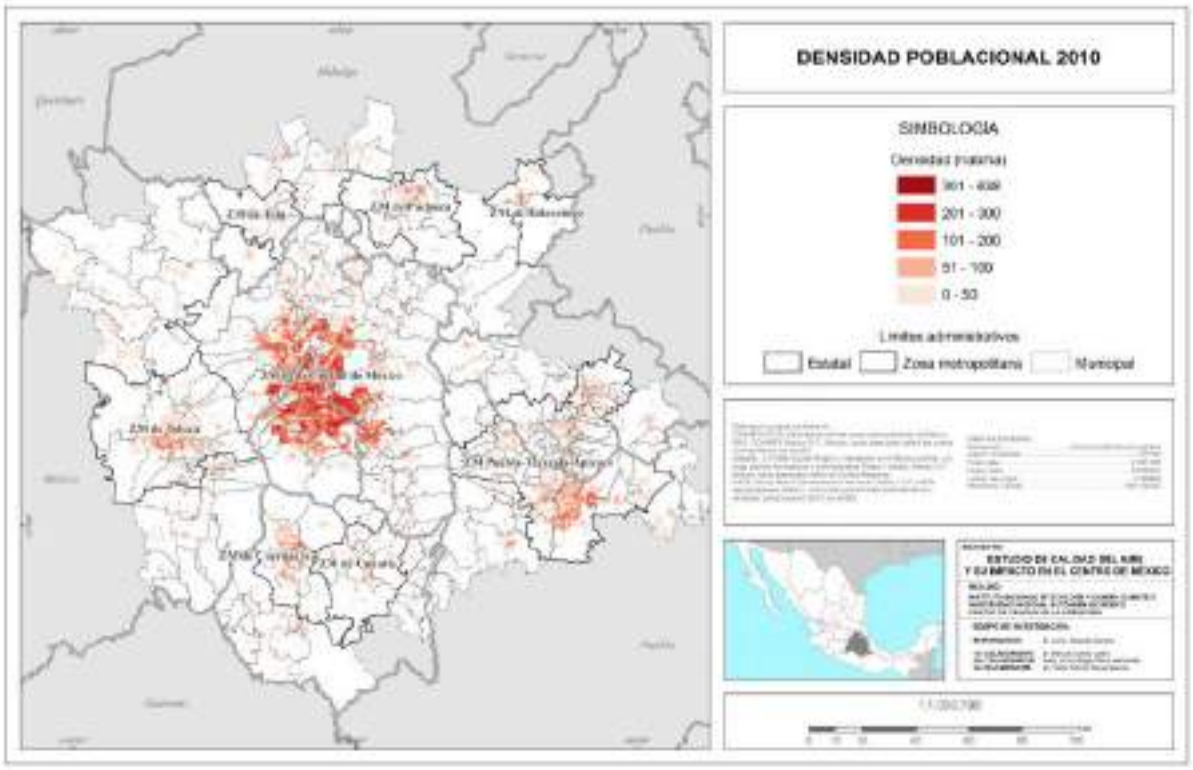


Figura A03-2 *Densidad de población en la Corona Regional, 2010.*

La ZMCM tuvo la mayor densificación entre los años 2000 y 2010; los cambios más bajos —incluso con valores negativos— ocurrieron en el centro de las ciudades, lo que indica despoblamiento.

El incremento en las densidades se da fuera del centro, con valores superiores a 25 hab./ha.

Se observó también despoblamiento en municipios no metropolitanos, no tan radical como en las urbes, con disminuciones de 5 hab./ha. Estos cambios implican dos posibles tendencias: 1) que los municipios, centrales o no, vieron disminuida su población debido a migraciones fuera de la Corona, y 2) que esos pobladores se están estableciendo en municipios alrededor del centro de las ZM que tuvieron un cambio superior a 25 hab./ha. Algunos pobladores se alejan del centro y otros se acercan pero no tanto como para densificarlo (**Figura A03-3**).

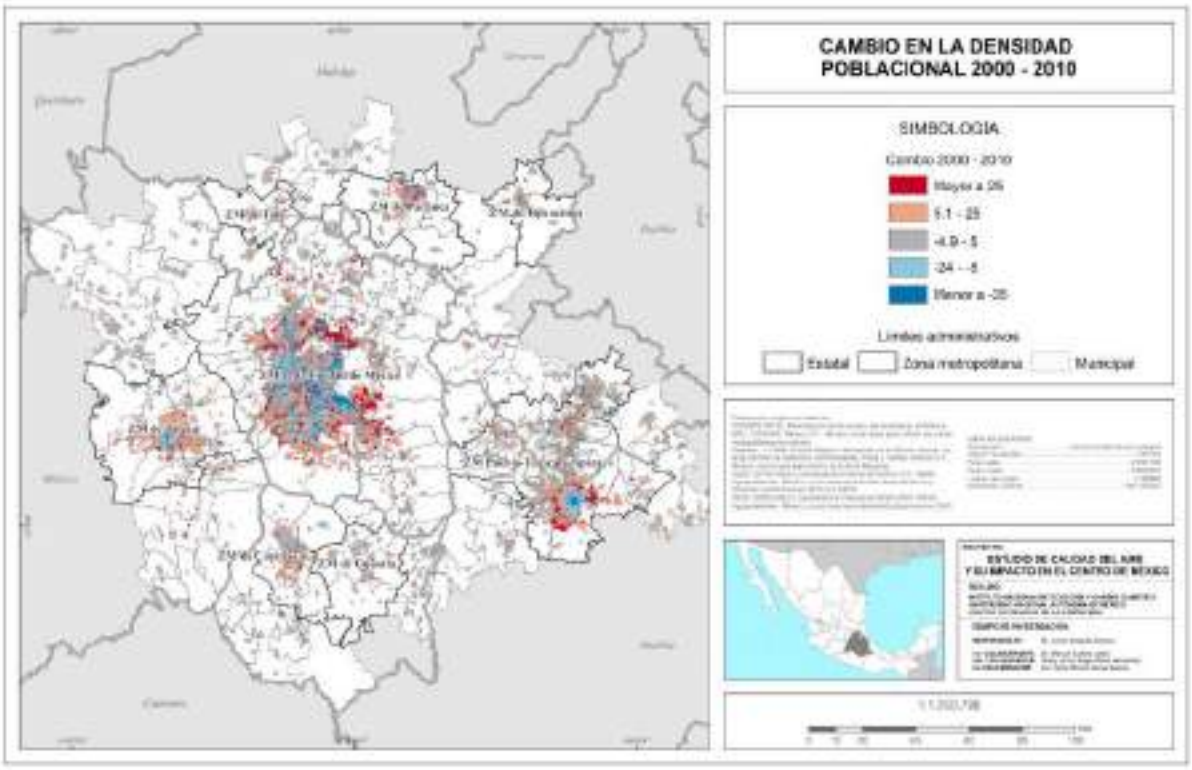


Figura A03-3 *Cambio en la densidad de población, Corona Regional, 2000-2010.*

3.3.1.2 DINÁMICA DE LAS LOCALIDADES PEQUEÑAS EN LAS ZM DE LA CORONA

En la delimitación de "zona metropolitana" propuesta por Conapo (2010) se incluyen municipios —para efectos de planeación— que no están completamente urbanizados y que aún conservan poblaciones "rurales" en su interior. Los lineamientos para interpretar este peculiar patrón de urbanización en México —todavía no urbano pero definitivamente ya no rural—, se siguen los hallazgos publicados por Delgado 1991 y 2003, Galindo y Delgado, 2006; Ruiz y Delgado 2008.

Censalmente, la población se clasifica en: a) localidades con menos de 2500 habitantes; b) de 2500 a 15 mil; c) de 15 mil a 100 mil, y d) 100 mil y más. La dinámica de su tasa de crecimiento mantiene una rapidez diferencial que contribuye a mantener la estructura jerárquica tradicional de las ciudades que les dificulta transitar hacia una formación regional.

La dinámica del primer rango —menos de 2500— es interesante porque se supuso que se trataría de poblaciones "rurales" pero tuvo tasas muy altas para serlo (8.04% en Pachuca y 5.14% en Cuernavaca). (Tabla A03-2.) Los dos siguientes rangos son también interesantes porque se trata, en el caso de 2500 a 15 mil habitantes, del umbral *previo* a que una localidad pase a ser considerada como urbana. El siguiente, de 15 mil a 100 mil indicaría una dinámica ya propia de un sitio urbano; es decir, de rápido crecimiento.

Tabla A03-2 Población (miles de habitantes) de las ciudades principales y secundarias de la CRCM, por rango de población, 2000-2010

Zona metropolitana	Tamaño de localidad (miles de habitantes)										Porcentaje regional	
	1-2,499		2,500-14,999		15,000-99,999		100,000 y más		Total			
	2000[a]	2010[b]	2000[a]	2010[b]	2000[a]	2010[b]	2000[a]	2010[b]	2000[a]	2010[b]	2000[a]	2010[b]
Ciudad de México	380	445	923	1,257	1,008	1,445	16,085	16,969	18,397	20,117	62.62	61.28
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	174	210	581	722	652	862	1,272	1,434	2,678	3,228	9.12	9.84
Toluca	281	327	432	588	234	532	594	489	1,540	1,936	5.24	5.90
Cuernavaca	58	87	107	136	164	201	470	501	799	925	2.72	2.82
Ciudades principales	893	1,069	2,043	2,703	2,058	3,040	18,421	19,393	23,414	26,206	79.70	79.84
Pachuca	66	120	47	119	30	17	232	257	375	512	1.28	1.56
Cuautla	73	90	124	130	38	60	137	154	372	434	1.27	1.32
Tulancingo	48	58	35	45	110	35	0	102	194	240	0.66	0.73
Tula	45	53	98	124	27	29	0	0	170	206	0.58	0.63
Tianguistenco	31	44	59	78	36	36	0	0	127	158	0.43	0.48
Ciudades secundarias	264	365	364	496	242	176	369	513	1,238	1,550	4.21	4.72
Periferia	2,980	2,975	1,075	1,212	465	634	205	249	4,725	5,069	16.08	15.44
Total Corona Regional	**4,137**	**4,409**	**3,482**	**4,411**	**2,765**	**3,850**	**18,994**	**20,155**	**29,378**	**32,825**	**100.00**	**100.00**

Fuentes: a=INEGI 2000, Censos de Población y Vivienda 2000; b=INEGI 2010, Censos de Población y Vivienda 2010.

Por la tasa de su crecimiento, estos dos rangos se incrementaron notablemente en el periurbano de las ciudades principales (ZMCM, Puebla-Tlaxcala y Cuernavaca) y disminuyó en las secundarias (Pachuca y Tulancingo) (Tabla A03-3). En las primeras, el crecimiento fue de casi lo doble de la tasa nacional, lo que indica una probable recepción de migrantes. En el rango más ato (más de 100 mil) la tasas fueron muy bajas e incluso negativas, como en la ZMCM, y nuevamente muy altas (2.16%) en las localidades de la periferia de la Corona, donde fueron más cercanas al comportamiento urbano que al rural. Esto puede interpretarse como concentración relativa en los periurbanos de las ciudades principales y mayor dispersión en el periurbano de las pequeñas.

Tabla A03-3 Tasas de crecimiento en las ciudades principales y secundarias de la CRCM, por rango de población, 2000-2010

Zona metropolitana	1-2,499	2,500-14,999	15,000-99,999	100,000 y más	Total
Ciudad de México	1.72	3.62	4.34	0.55	0.94
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	2.10	2.43	3.22	1.28	2.05
Toluca	1.60	3.62	12.78	-1.76	2.57
Cuernavaca	5.14	2.65	2.23	0.67	1.58
Ciudades principales	1.98	3.23	4.77	0.53	1.19
Pachuca	8.04	15.19	-4.38	1.08	3.66
Cuautla	2.44	0.45	5.51	1.27	1.66
Tulancingo	1.91	2.78	-6.84		2.37
Tula	1.81	2.66	0.63		2.11
Tianguistenco	4.12	3.07	-0.19		2.40
Ciudades secundarias	3.85	3.61	-2.74	3.93	2.52
Periferia	-0.02	1.27	3.62	2.16	0.73
Nacional					1.38

Fuentes: INEGI 2000, Censos de Población y Vivienda 2000; INEGI 2010, Censos de Población y Vivienda 2010.

3.3.2 ECONOMÍA DE LA CORONA REGIONAL 1999-2009[6]

3.3.2.1 PERSONAL EMPLEADO POR SECTOR ECONÓMICO

Los tres sectores económicos que más fuerza de trabajo absorbieron en 1999 y 2009 fueron servicios, comercio y financiero representando 84.3% y 86.3% en esos años, respectivamente (**Tabla A03-4**).

Por la importancia estratégica dentro de la estructura económica, sobre todo el de finanzas, conviene evaluar a los demás sectores no sólo por el total de su fuerza de trabajo, sino también por su dinámica (tasa de crecimiento), cociente de especialización y valor agregado.

Esos tres sectores dominantes (por el volumen de su fuerza de trabajo) se concentraron en cuatro de las cinco ciudades principales de la CRCM, con excepción únicamente de Pachuca. Aun así, la predominancia de esos sectores en el lugar central, ciudad de México, es abrumadora (77.3% y 73% en cada año); es decir, su predominio general sólo se redujo 4%, mientras que en otros, como el financiero, la dominación es casi total.

[6] Años en los que se levantaron los censos económicos. Actualmente se espera la publicación del Censo Económico 2014.

Tabla A03-4 Personal ocupado total por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009

Sector	ZMCM	ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco	ZM de Toluca	ZM de Cuernavaca	ZM de Pachuca	ZM de Cuautla	ZM de Tulancingo	zm de Tula	Periferia	Corona Regional	%
1999											
Servicios	1,320,739	121,183	49,630	41,568	17,298	13,089	6,478	6,823	52,858	1,629,666	32.0
Comercio	998,433	126,211	60,036	38,484	18,500	15,312	7,950	5,995	58,750	1,329,671	26.1
Manufacturas	921,570	183,859	79,097	30,014	14,424	7,602	7,450	9,251	83,724	1,336,991	26.2
Finanzas	234,407	1,052	245	352	226	96	23	26	227	236,654	4.6
Transportes	210,780	16,324	8,756	4,700	1,611	1,805	825	1,678	3,342	249,821	4.9
Construcción	198,281	14,540	6,020	4,649	4,214	37	485	1,348	1,166	230,740	4.5
Electricidad, agua y gas	50,291	4,345	12,794	2,746	1,632	200	148	102	1,169	73,427	1.4
Minería	5,434	667	270	425	1,143	79	90	620	1,227	9,955	0.2
Subtotal	**3,939,935**	**468,181**	**216,848**	**122,938**	**59,048**	**38,220**	**23,449**	**25,843**	**202,463**	**5,096,925**	**100.0**
%	**77.3**	**9.2**	**4.3**	**2.4**	**1.2**	**0.7**	**0.5**	**0.5**	**4.0**	**100**	
2009											
Servicios	1,890,163	202,048	103,391	73,642	38,449	25,632	11,716	11,892	85,124	2,442,057	37.6
Comercio	1,312,220	207,590	107,822	62,583	34,251	28,718	14,530	11,673	118,674	1,898,061	29.2
Manufacturas	781,883	186,666	114,796	32,228	11,580	11,792	7,223	15,761	101,796	1,263,725	19.5
Finanzas	346,660	3,833	1,195	1,102	572	447	173	200	1,618	355,800	5.5
Transportes	227,777	17,180	8,791	7,520	1,844	2,992	559	2,637	3,635	272,935	4.2
Construcción	130,188	17,084	6,341	4,505	4,039	373	356	929	1,967	165,782	2.6
Electricidad, agua y gas	44,305	6,539	21,205	2,874	4,257	388	292	134	1,678	81,672	1.3
Minería	7,432	635	388	183	465	64	70	452	1,263	10,952	0.2
Subtotal	**4,740,628**	**641,575**	**363,929**	**184,637**	**95,457**	**70,406**	**34,919**	**43,678**	**315,755**	**6,490,984**	**100.0**
%	**73.0**	**9.9**	**5.6**	**2.8**	**1.5**	**1.1**	**0.5**	**0.7**	**4.9**	**100**	
Cambio absoluto											
Servicios	569,424	80,865	53,761	32,074	21,151	12,543	5,238	5,069	32,266	812,391	
Comercio	313,787	81,379	47,786	24,099	15,751	13,406	6,580	5,678	59,924	568,390	
Manufacturas	-139,687	2,807	35,699	2,214	-2,844	4,190	-227	6,510	18,072	-73,266	
Finanzas	112,253	2,781	950	750	346	351	150	174	1,391	119,146	
Transportes	16,997	856	35	2,820	233	1,187	-266	959	293	23,114	
Construcción	-68,093	2,544	321	-144	-175	336	-129	-419	801	-64,958	
Electricidad, agua y gas	-5,986	2,194	8,411	128	2,625	188	144	32	509	8,245	
Minería	1,998	-32	118	-242	-678	-15	-20	-168	36	997	
Subtotal	**800,693**	**173,394**	**147,081**	**61,699**	**36,409**	**32,186**	**11,470**	**17,835**	**113,292**	**1,394,059**	
%	**57.4**	**12.4**	**10.6**	**4.4**	**2.6**	**2.3**	**0.8**	**1.3**	**8.1**	**100**	
Cambio porcentual											
Servicios	43	67	108	77	122	96	81	74	61		
Comercio	31	64	80	63	85	88	83	95	102		
Manufacturas	-15	2	45	7	-20	55	-3	70	22		
Finanzas	48	264	388	213	153	366	652	669	613		
Transportes	8	5	0	60	14	66	-32	57	9		
Construcción	-34	18	5	-3	-4	908	-27	-31	69		
Electricidad, agua y gas	-12	50	66	5	161	94	97	31	44		
Minería	37	-5	44	-57	-59	-19	-22	-27	3		

Fuentes: INEGI 1999, Censos Económicos 1999; INEGI 2009, Censos Económicos 2009.

Por otra parte, la disminución o pérdida de población empleada en la industria (desindustrialización) no fue exclusiva de la ciudad de México (casi 140 mil trabajadores menos), sino que también se presentó en Pachuca y Tulancingo. Esta población económicamente activa (PEA) aumentó en Toluca principalmente, Cuautla y Tula, probablemente por su cercanía y relativamente mejor conexión con la ZMCM. No hay estudios que indiquen que haya habida transferencia de fuerza de trabajo industrial desde la ciudad de México a esas ciudades.

El segundo cambio importante fue el de las finanzas en la ZMCM, en donde si bien el aumento fue de apenas 15% (de 234 mil a 346 mil personas ocupadas entre 2000 y 2010), aún representa la mayor concentración del personal de ese sector dentro de la Corona Regional (99.5% y 97.4% respectivamente). Su crecimiento en zonas de la periferia también fue destacado (613%) aunque se refiere —en términos absolutos— a sólo 1600 trabajadores de un total de 355 mil.

3.3.2.2 UNIDADES ECONÓMICAS POR SECTOR ECONÓMICO

El predominio de los sectores identificados (comercio, servicios y manufacturas) también se manifestó, por cuanto a unidades de producción (98% y 99% en cada año), en esas mismas cuatro ciudades, principalmente en la de México (68% y 65%) (**Tabla A03-5**).

Los otros sectores disminuyeron en número de unidades económicas. En el caso del trasporte y la construcción, probablemente se deba a la salida del mercado de las unidades pequeñas y medianas ante la competencia de firmas con mayor poder económico y mejor tecnología.

3.3.2.3 VALOR AGREGADO CENSAL BRUTO POR SECTOR ECONÓMICO (VACB)

Más que el personal empleado o el número de unidades económicas, el VACB refleja mejor la capacidad económica de cada sector. Así resalta el predominio del de finanzas, que pasó de 13.8% en el año 2000 a 22.6% en 2010, a pesar de contar sólo con 5.5 % del personal ocupado y 0.2% del número de unidades económicas (**Tabla A03-6**).

En segundo lugar, el VACB en transporte y construcción, también es relevante, aunque en menor medida que el de finanzas. Alcanzaron cada uno de ellos 5.4% en el año 2000 y 1.9% en 2010 con solo 0.3% de las unidades económicas. En el caso de la construcción, donde el incremento en VACB se acompañó de una pérdida de personal (65 mil personas), sólo puede significar la sustitución de las unidades más pequeñas y medianas por empresas con menos mano de obra y mejor tecnología constructiva.

Tabla A03-5 Unidades económicas por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009

Sector	ZMCM	ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco	ZM de Toluca	ZM de Cuernavaca	ZM de Pachuca	ZM de Cuautla	ZM de Tulancingo	ZM de Tula	Periferia	Corona Regional	%
1999											
Comercio	322,856	54,137	24,633	15,698	7,606	7,795	3,704	2,958	33,090	472,477	53.8
Servicios	206,746	32,134	13,540	10,423	5,050	4,019	2,366	1,921	17,181	293,380	33.4
Manufacturas	57,132	16,723	4,863	3,066	1,379	1,203	867	644	9,229	95,106	10.8
Finanzas	1,414	115	26	43	21	18	8	0	9	1,654	0.2
Transportes	7,142	1,645	486	336	181	81	186	135	959	11,151	1.3
Construcción	3,345	513	213	95	105	10	15	14	14	4,324	0.5
Electricidad, agua y gas	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4	0.0
Minería	64	175	16	38	48	4	11	16	207	579	0.1
Subtotal	**598,699**	**105,442**	**43,777**	**29,699**	**14,394**	**13,130**	**7,157**	**5,688**	**60,689**	**878,675**	**100.0**
%	**68**	**12**	**5**	**3**	**2**	**1**	**1**	**1**	**7**	**100**	
2009											
Comercio	387,855	71,515	34,932	20,635	10,451	11,202	5,136	4,182	49,129	595,037	52.7
Servicios	270,097	48,022	21,427	15,789	8,380	7,277	3,465	2,891	28,066	405,414	35.9
Manufacturas	65,082	20,599	8,607	4,156	2,065	1,878	1,003	982	13,357	117,729	10.4
Finanzas	1,602	426	146	149	77	61	46	17	173	2,697	0.2
Transportes	2,658	450	163	138	63	62	35	19	123	3,711	0.3
Construcción	2,195	529	226	132	171	32	24	0	10	3,319	0.3
Electricidad, agua y gas	12	0	12	7	0	26	0	0	5	62	0.0
Minería	59	143	20	0	23	0	0	10	142	397	0.0
Subtotal	**729,560**	**141,684**	**65,533**	**41,006**	**21,230**	**20,538**	**9,709**	**8,101**	**91,005**	**1,128,366**	**100.0**
%	**65**	**13**	**6**	**4**	**2**	**2**	**1**	**1**	**8**	**100**	
Cambio absoluto											
Comercio	64,999	17,378	10,299	4,937	2,845	3,407	1,432	1,224	16,039	122,560	
Servicios	63,351	15,888	7,887	5,366	3,330	3,258	1,099	970	10,885	112,034	
Finanzas	188	311	120	106	56	43	38	17	164	1,043	
Manufacturas	7,950	3,876	3,744	1,090	686	675	136	338	4,128	22,623	
Transportes	-4,484	-1,195	-323	-198	-118	-19	-151	-116	-836	-7,440	
Construcción	-1,150	16	13	37	66	22	9	-14	-4	-1,005	
Electricidad, agua y gas	12	0	12	7	-4	26	0	0	5	58	
Minería	-5	-32	4	-38	-25	-4	-11	-6	-65	-182	
Subtotal	**130,861**	**36,242**	**21,756**	**11,307**	**6,836**	**7,408**	**2,552**	**2,413**	**30,316**	**249,691**	
%	**52**	**15**	**9**	**5**	**3**	**3**	**1**	**1**	**12**	**100**	
Cambio %											
Comercio	20.13	32.1	41.81	31.45	37.4	43.71	38.66	41.38	48.47	37.2	
Servicios	30.64	49.44	58.25	51.48	65.94	81.06	46.45	50.49	63.35	55.2	
Finanzas	13.3	270.43	461.54	246.51	266.67	238.89	475	NA	1822.22	474.3	
Manufacturas	13.92	23.18	76.99	35.55	49.75	56.11	15.69	52.48	44.73	40.9	
Transportes	-62.78	-72.64	-66.46	-58.93	-65.19	-23.46	-81.18	-85.93	-87.17	-67.1	
Construcción	-34.38	3.12	6.1	38.95	62.86	220	60	-100	-28.57	25.3	
Electricidad, agua y gas	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
Minería	-7.81	-18.29	25	-100	-52.08	-100	-100	-37.5	-31.4	-46.9	
Promedio	**-3.9**	**41.0**	**86.2**	**35.0**	**52.2**	**73.8**	**64.9**	**-13.2**	**261.7**	**74.2**	

Fuentes: INEGI 1999, Censos Económicos 1999; INEGI 2009, Censos Económicos 2009.

Tabla A03-6 Valor agregado censal bruto por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009

Sector	ZMCM	ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco	ZM de Toluca	ZM de Cuernavaca	ZM de Pachuca	ZM de Cuautla	ZM de Tulancingo	ZM de Tula	Periferia	Corona Regional	%
1999											
Comercio	116,611,044	7,778,960	4,499,703	2,160,875	1,101,286	673,217	396,080	303,354	2,211,873	135,736,392	20.3
Servicios	175,721,864	4,562,615	2,029,553	1,645,140	572,547	358,636	151,855	216,281	2,101,961	187,360,452	28.0
Manufacturas	130,053,017	25,291,087	21,093,509	7,563,725	673,315	711,674	504,744	3,346,721	9,140,208	198,378,000	29.7
Finanzas	92,217,845	21,306	-4,113	71,747	-3,303	2,905	-9,550	2,803	9,834	92,309,474	13.8
Transportes	20,756,028	1,593,858	2,594,122	168,061	129,372	314,517	46,300	131,059	164,138	25,897,455	3.9
Construcción	13,716,725	501,704	158,641	145,608	162,670	-306	5,463	28,413	42,494	14,761,412	2.2
Electricidad, agua y gas	9,758,095	1,060,692	6,888,790	-107,619	-4,241,819	68,834	85,257	37	110,050	13,622,317	2.0
Minería	-278,027	36,171	13,968	39,662	58,994	9,002	2,951	72,618	66,960	22,299	0.0
Subtotal	**558,556,591**	**40,846,393**	**37,274,173**	**11,687,199**	**-1,546,938**	**2,138,479**	**1,183,100**	**4,101,286**	**13,847,518**	**668,087,801**	**100.0**
%	**84**	**6**	**6**	**2**	**0**	**0**	**0**	**1**	**2**	**100**	
2009											
Comercio	163,086,288	16,241,744	11,088,506	5,199,149	3,358,802	1,831,830	1,102,342	1,076,719	6,496,401	209,481,781	12.9
Servicios	378,914,988	18,664,383	16,442,420	6,440,723	3,835,006	1,333,335	457,396	881,289	3,480,502	430,450,042	26.5
Manufacturas	249,208,997	68,153,077	69,169,325	13,939,736	2,095,742	2,757,067	698,648	12,628,234	24,578,058	443,228,884	27.3
Finanzas	365,245,211	494,885	294,565	116,816	63,751	109,025	23,848	88,782	222,073	366,658,956	22.6
Transportes	76,672,401	5,156,630	2,291,852	1,286,364	292,411	210,788	81,828	660,826	372,188	87,025,288	5.4
Construcción	25,239,044	2,603,970	1,412,177	1,095,491	779,532	30,669	51,730	75,825	210,728	31,499,166	1.9
Electricidad, agua y gas	25,566,720	8,239,438	17,681,023	2,968,439	645,533	40,478	15,400	15,644	263,085	55,435,760	3.4
Minería	-831,130	66,900	64,512	79,042	25,916	2,183	7,496	55,150	85,552	-444,379	0.0
Subtotal	**1,283,102,519**	**119,621,027**	**118,444,380**	**31,125,760**	**11,096,693**	**6,315,375**	**2,438,688**	**15,482,469**	**35,708,587**	**1,623,335,498**	**100.0**
%	**79**	**7**	**7**	**2**	**1**	**0**	**0**	**1**	**2**	**100**	
Cambio absoluto											
Comercio	46,475,244	8,462,784	6,588,803	3,038,274	2,257,516	1,158,613	706,262	773,365	4,284,528	73,745,389	7.7
Servicios	203,193,124	14,101,768	14,412,867	4,795,583	3,262,459	974,699	305,541	665,008	1,378,541	243,089,590	25.4
Finanzas	273,027,366	473,579	298,678	45,069	67,054	106,120	33,398	85,979	212,239	274,349,482	28.7
Manufacturas	119,155,980	42,861,990	48,075,816	6,376,011	1,422,427	2,045,393	193,904	9,281,513	15,437,850	244,850,884	25.6
Transportes	55,916,373	3,562,772	-302,270	1,118,303	163,039	-103,729	35,528	529,767	208,050	61,127,833	6.4
Construcción	11,522,319	2,102,266	1,253,536	949,883	616,862	30,975	46,267	47,412	168,234	16,737,754	1.8
Electricidad, agua y gas	15,808,625	7,178,746	10,792,233	3,076,058	4,887,352	-28,356	-69,857	15,607	153,035	41,813,443	4.4
Minería	-553,103	30,729	50,544	39,380	-33,078	-6,819	4,545	-17,468	18,592	-466,678	0.0
Subtotal	**724,545,928**	**78,774,634**	**81,170,207**	**19,438,561**	**12,643,631**	**4,176,896**	**1,255,588**	**11,381,183**	**21,861,069**	**955,247,697**	**100.0**
%	**76**	**8**	**8**	**2**	**1**	**0**	**0**	**1**	**2**	**100**	
Cambio %											
Comercio	40	109	146	141	205	172	178	255	194	160	
Servicios	116	309	710	292	570	272	201	307	66	316	
Finanzas	296	2,223	7,262	63	2,030	3,653	350	3,067	2,158	2,345	
Manufacturas	92	169	228	84	211	287	38	277	169	173	
Transportes	269	224	-12	665	126	-33	77	404	127	205	
Construcción	84	419	790	652	379	10,123	847	167	396	1,540	
Electricidad, agua y gas	162	677	157	2,858	115	-41	-82	42,181	139	5,130	
Minería	-199	85	362	99	-56	-76	154	-24	28	41	
Promedio	**107**	**527**	**1,205**	**607**	**448**	**1,795**	**220**	**5,829**	**409**	**1,239**	

Fuentes: INEGI 1999, Censos Económicos 1999; INEGI 2009, Censos Económicos 2009.

3.3.2.4 COCIENTE DE LOCALIZACIÓN POR SECTOR ECONÓMICO, 2009

Este indicador es muy sensible a la especialización de un sitio, respecto de la fuerza de trabajo que absorbe. Un valor mayor o igual que 1 indica una alta especialización, por lo que probablemente cuente con mejores condiciones para llevarse a cabo. Un valor menor que 1 significaría que el entorno social, urbano o económico o una combinación de ellos, no es favorable para realizarla. Un valor cercano pero menor a 1 podría interpretarse tanto como una actividad estancada, un ambiente que ha perdido condiciones para su realización o que apenas está en camino para alcanzarlo.

En el caso de los tres sectores predominantes (comercio, servicios y manufacturas), el valor de su coeficiente de localización fortalece la hipótesis de una reconcentración regional, al alcanzar un umbral de más de 1 en todas las ciudades de la Corona, excepto para las manufacturas, en donde sólo Puebla Tlaxcala y Tula tuvieron un buen desempeño así como, paradójicamente, también fue alto en la periferia rural (Tabla A03-7).

El coeficiente de *finanzas* confirma nuevamente su influencia en la ciudad de México (único valor arriba de 1), mientras que fue sumamente bajo en todas las demás ciudades. En *transportes* la ZMCM, Cuernavaca, Cuautla y Tula alcanzaron un valor considerable, aunque menor a 1 y fue muy bajo en las demás ciudades. Esto se puede interpretar como que en las primeras se pudo mantener esa actividad económica aunque sin mejorar sustancialmente, mientras que en las otras enfrentan una situación crítica o al menos con más dificultades. Los valores relativos a *electricidad, agua y gas* así como *minería*, expresan una fuerte localización (en economía se le llama inmovilidad del recurso), pues sólo tuvieron buenos valores, el primero en Toluca, Cuernavaca y Cuautla y la *minería* en Pachuca, Tulancingo y sobre todo, Tula.

Tabla A03-7 Cociente de localización por sector económico en las zonas metropolitanas y periferia de la Corona Regional, 1999 y 2009

	ZMCM	ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco	ZM de Toluca	ZM de Cuernavaca	ZM de Pachuca	ZM de Cuautla	ZM de Tulancingo	ZM de Tula	Periferia
1999									
Comercio	0.97	1.03	1.06	1.20	1.20	1.54	1.30	0.89	1.11
Servicios	1.05	0.81	0.72	1.06	0.92	1.07	0.86	0.83	0.82
Manufacturas	0.89	1.50	1.39	0.93	0.93	0.76	1.21	1.36	1.58
Finanzas	1.28	0.05	0.02	0.06	0.08	0.05	0.02	0.02	0.02
Transportes	1.09	0.71	0.82	0.78	0.56	0.96	0.72	1.32	0.34
Construcción	1.11	0.69	0.61	0.84	1.58	0.02	0.46	1.15	0.13
Electricidad, agua y gas	0.89	0.64	4.10	1.55	1.92	0.36	0.44	0.27	0.40
Minería	0.71	0.73	0.64	1.77	9.91	1.06	1.97	12.28	3.10
2009									
Comercio	1.06	1.24	1.14	1.30	1.38	1.56	1.60	1.02	1.44
Servicios	1.25	0.98	0.89	1.25	1.26	1.14	1.05	0.85	0.84
Manufacturas	0.63	1.11	1.20	0.67	0.46	0.64	0.79	1.38	1.23
Finanzas	1.57	0.13	0.07	0.13	0.13	0.14	0.11	0.10	0.11
Transportes	0.98	0.55	0.49	0.83	0.39	0.87	0.33	1.23	0.23
Construcción	0.61	0.59	0.38	0.54	0.93	0.12	0.23	0.47	0.14
Electricidad, agua y gas	0.65	0.71	4.04	1.08	3.10	0.38	0.58	0.21	0.37
Minería	0.80	0.51	0.55	0.51	2.49	0.47	1.03	5.30	2.05

Fuentes: INEGI 1999, Censos Económicos 1999; INEGI 2009, Censos Económicos 2009.

3.3.3 ESPECIALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS 1999-2009

Las actividades económicas son un factor importante en una mayor o menor expansión urbana. Después de analizar su importancia relativa, es necesario indagar si con su implantación han conformado agrupamientos espacialmente significativos y con base en ello, caracterizar a las distintas ciudades según la agrupación predominante.

Para ello, los distintos sectores convencionalmente, se agrupan en cuatro grandes divisiones: a) terciario, b) transformación, c) industria extractiva y c) primario, constituidos por los sectores siguientes:

Agrupación de sectores	Sectores económicos
Terciario	Servicios, comercio y finanzas.
Transformación	Manufacturas; electricidad, agua y gas, y transporte y construcción.
Industria Extractiva	Minería.
Primario	Agricultura, pesca y ganadería.

Las **Figuras A03-4 y 5** muestran los municipios por el sector económico con la mayor especialización, según su coeficiente de localización en 1999 y 2009.[7] Estos mapas en sí expresan una primera síntesis como indicio para el comportamiento de las actividades.

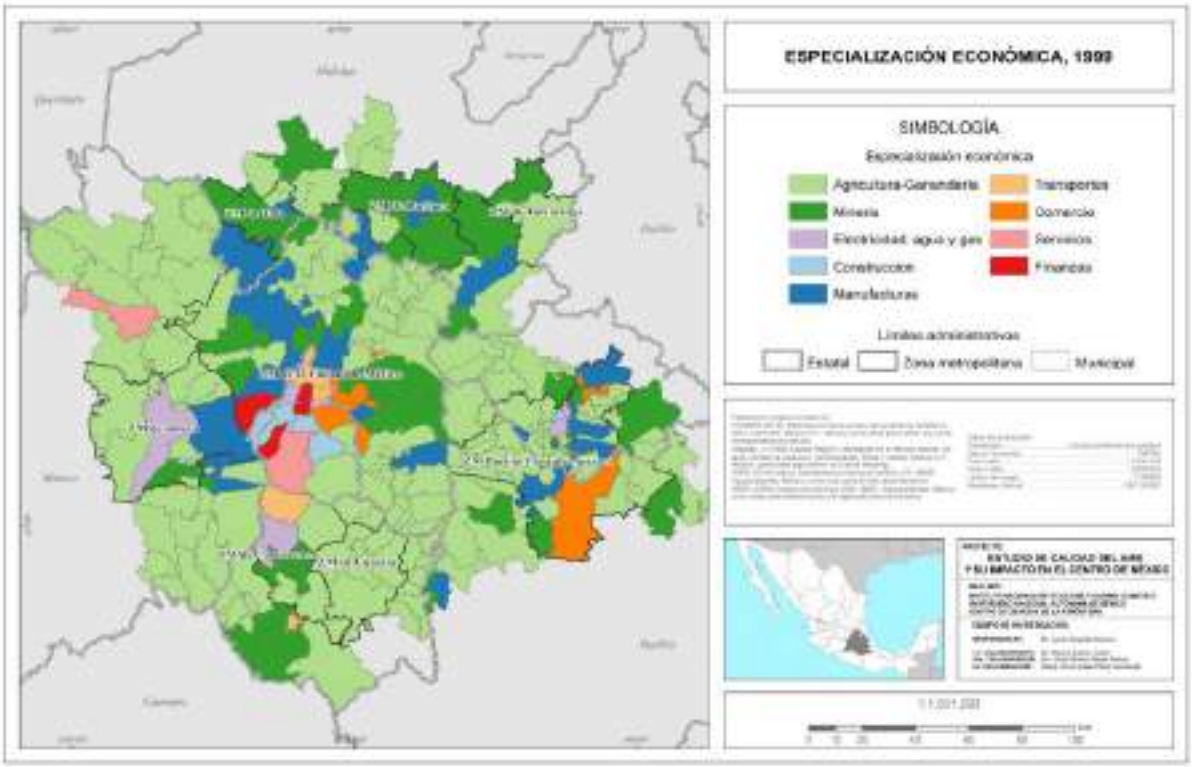


Figura A03-4 *Especialización económica, 1999.*

Fuente: elaboración propia.

[7] Para una mayor información sobre los cocientes de localización de cada sector económico por municipio de cada actividad económica, consultar el "Apéndice cartográfico", sección 3.2.MC.

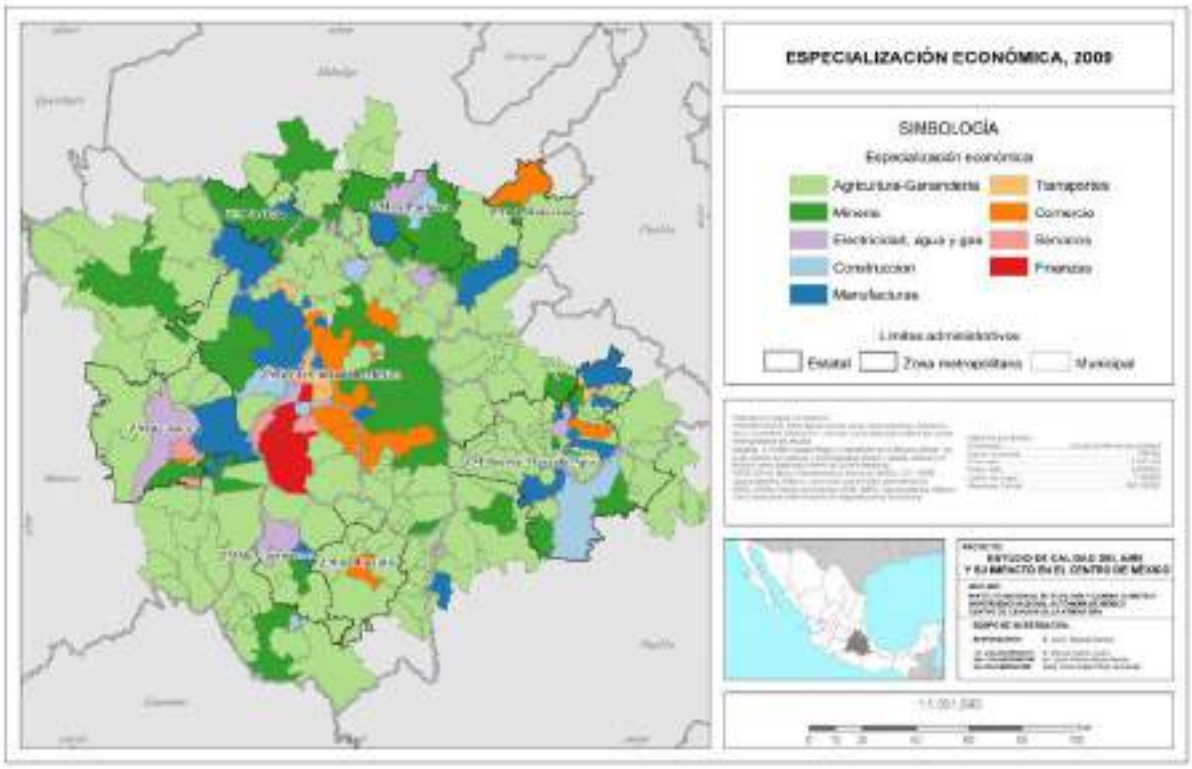


Figura A03-5 *Especialización económica, 2009.*

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.1 TERCIARIO

Esta categoría de actividades económicas incluye servicios, comercio y finanzas. En la ZMCM la población ocupada más alta se concentra en las delegaciones centrales y en algunos municipios metropolitanos. En las demás ciudades la población ocupada más alta se localiza en el municipio central de cada una de ellas. En el resto de la Corona Regional la población ocupada en este agrupamiento es menor que 10 mil en el año 2009 (**Figura A03-6**).

3.3.3.2 TRANSFORMACIÓN

Las actividades económicas incluidas en la Transformación son las Manufacturas, Electricidad, Agua y Gas, Transporte y Construcción. Esta división se distribuye de manera similar a la del terciario pero con mayor amplitud territorial en el corredor a Querétaro y en la Zona Metropolitana de Puebla-Tlaxcala-Apizaco. De manera general se podría decir que en las ZM, más de 5 mil personas se dedican a estas actividades de transformación en 2009 (**Figura A03-7**).

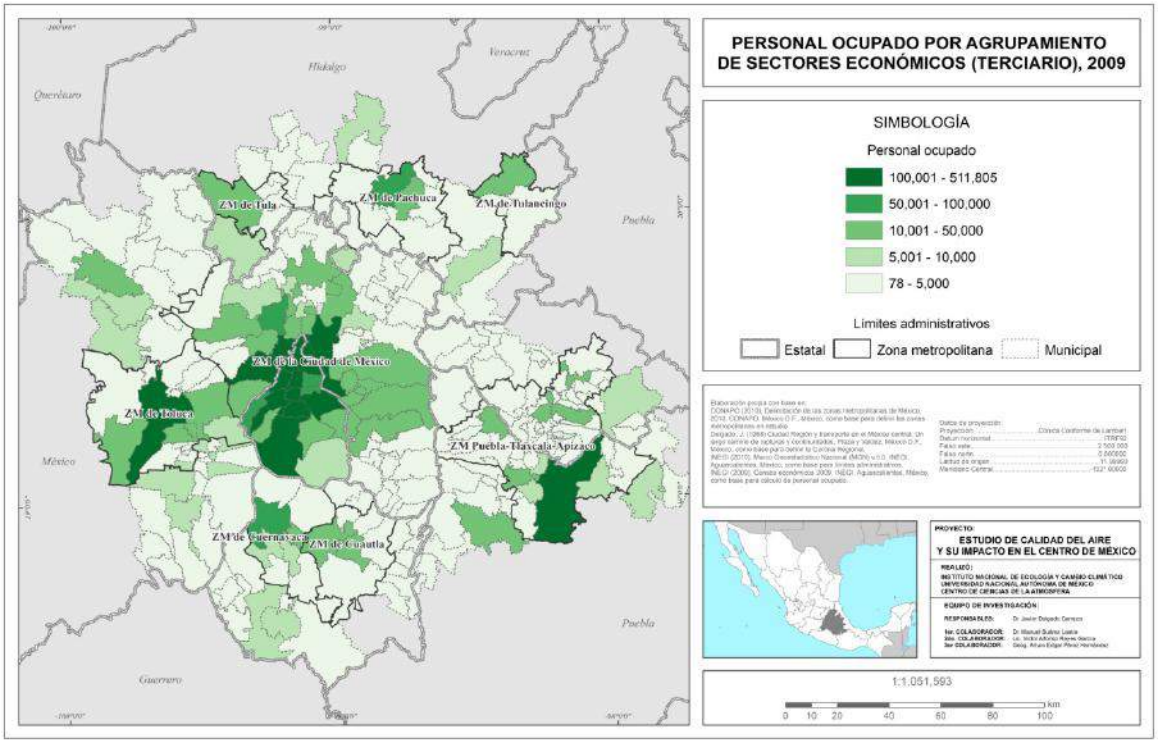


Figura A03-6 *Personal ocupado en el agrupamiento* terciario, *2009.*

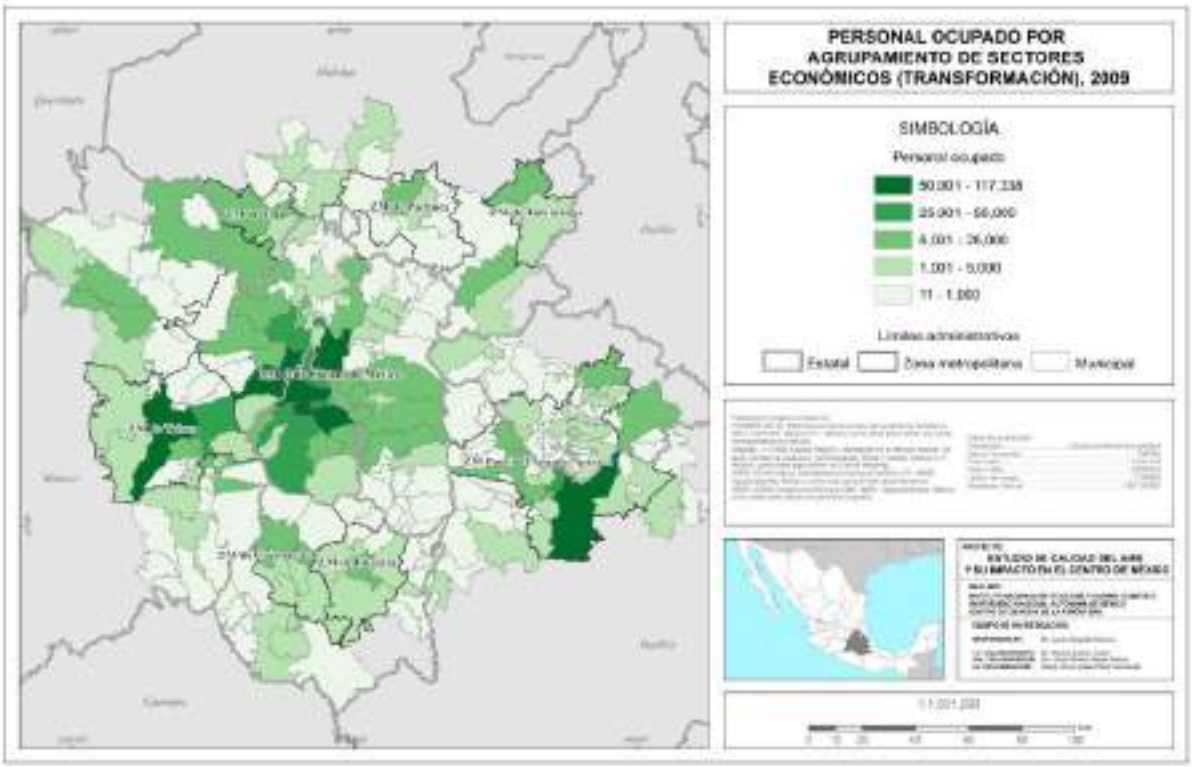


Figura A03-7 *Personal ocupado en el agrupamiento* transformación, *2009.*

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.3 INDUSTRIA EXTRACTIVA

La industria extractiva incluye únicamente al sector *minería.* Ocupa la menor población, comparada con los agrupamientos que aglomeran a más de una actividad. Es probable que el alto valor que alcanzaron en 2009 las delegaciones Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo —donde es evidente que no hay actividad minera alguna— se debió a la ubicación de las oficinas centrales y corporativos de empresas del ramo (p. ej. Pemex o Altos Hornos de México). En el resto de la Corona Regional, la minería tiene una escasa relevancia, limitándose al corredor México-Pachuca y Mineral del Monte así como al oriente de la ZMCM y después, al sur de Puebla. Tula también repunta un valor medio y después, unos cuantos municipios muy dispersos apenas se destacan, con una población ocupada de 500 a 2500 personas (**Figura A03-8**).

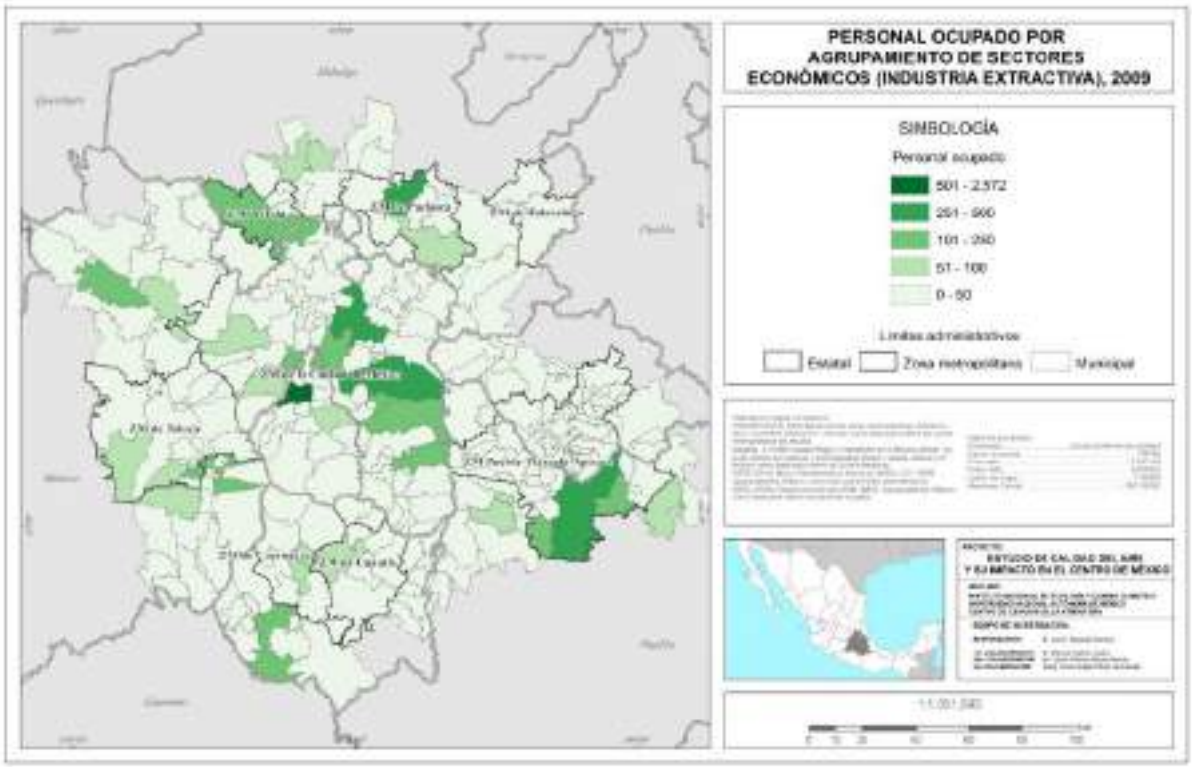


Figura A03-8 *Personal ocupado en el agrupamiento* industria extractiva, *2009*

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.4 PRIMARIO

En el agrupamiento *primario* participan los sectores económicos de *agricultura, pesca* y *ganadería.* Su distribución tiene un claro patrón centro-periferia excepto en la ZMCM, donde algunas delegaciones urbanas, como Iztapalapa, Cuajimalpa y Álvaro Obregón, y los municipios Naucalpan, Ecatepec y Nezahualcóyotl, alcanzan el mayor umbral de personal ocupado en esta actividad. Aunque son municipios altamente urbanizados, su personal ocupado

no necesariamente trabaja en el mismo municipio y además se trata de demarcaciones con muy alta población (**Figura A03-9**).

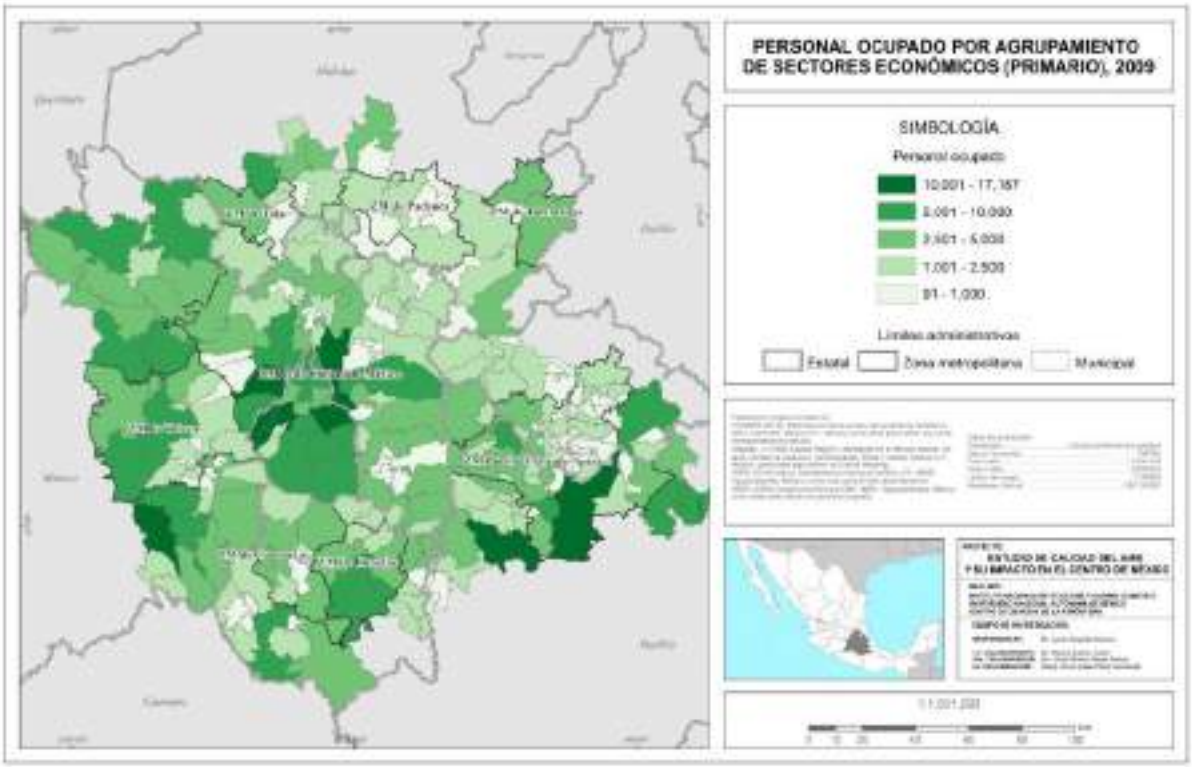


Figura A03-9 *Personal ocupado en el agrupamiento* primario, *2009.*

3.3.4 FLUJOS INTRARREGIONALES DE TRABAJO EN LA CORONA REGIONAL

3.3.4.1 FLUJOS AL TRABAJO

En 2010 había 30.2 millones de personas en la CRCM, 3.4 millones más que en 2000: un aumento de 12.7 por ciento. Por su parte, el total de flujos intrarregionales de trabajo aumentó de 9.17 a 11.34 millones en el mismo periodo: un aumento de 2.16 millones de flujos (23%).

3.3.4.2 POBLACIÓN QUE TRABAJA EN OTRO MUNICIPIO 2000-2010

Los flujos al trabajo se refieren a la población que reside en una delegación o municipio y trabaja en otro. La base metodológica para la interpretación de este proceso se basa en los hallazgos obtenidos para la ZMCM por Suárez y Delgado (2010) y Suárez *et al.* (2015, enviado).

En el año 2000, más de 30% de la población salía de su municipio o delegación para ir al trabajo, en general a las ciudades principales de la Corona Regional. En la periferia el porcentaje es mucho menor (ver “Apéndice cartográfico”). En 2010, el porcentaje era de casi 45 %. Sin embargo, en algunos municipios este valor llegó a situarse entre 45% y 60%, como en varias delegaciones y municipios en la periferia de las zonas metropolitanas,

excepto en la ciudad de México, donde tal condición se extendió a delegaciones contiguas a la ciudad interior, como Benito Juárez, Coyoacán, Álvaro Obregón, Iztacalco y Xochimilco (**Figura A03-10**).

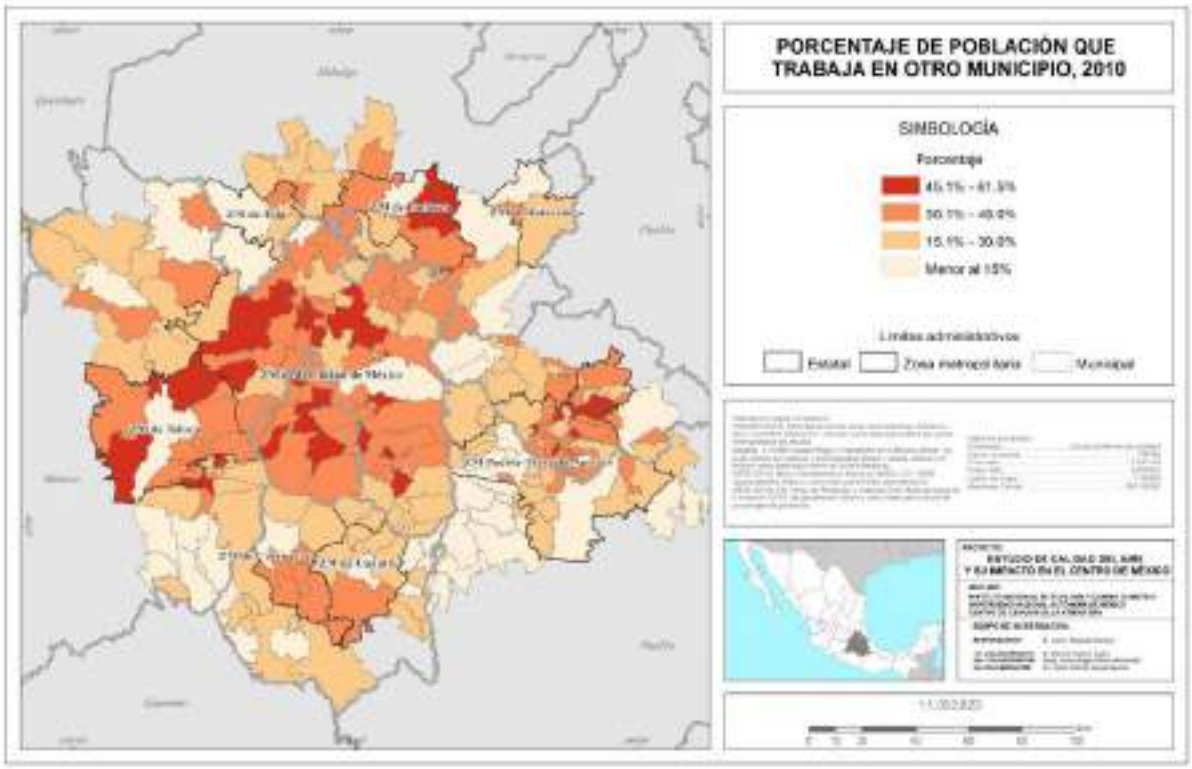


Figura A03-10 *Porcentaje de la población que trabaja en un municipio distinto al de residencia, 2010.*

Fuente: elaboración propia.

Si se estima el cambio porcentual de esa población entre 2000 y 2010, las cifras más bajas corresponden al Distrito Federal, donde hubo incluso algunas negativas. Eso significa que menos *commuters* salieron de sus delegaciones de residencia, lo que disminuyó los flujos y distancias recorridas por ese motivo diariamente. Por el contrario, en el resto de la CRCM, sobre todo en la periferia, hubo cifras de cambio superiores a 6%, destacando Pachuca y Toluca, donde fueron de más de 14% y hasta 35%: los más altos de toda la Corona. En estos lugares, la gente debió salir de su municipio para trabajar en el vecino, en el mejor de los casos, aunque es posible que haya tenido que transportarse hasta municipios más alejados (**Figura A03-11**).

Para precisar lo anterior, se calculó el coeficiente de localización de la población que trabaja fuera del municipio de residencia. En el año 2000 ("Apéndice cartográfico"), la población de las metrópolis salió a trabajar a otros municipios, mientras que los habitantes que salían menos de su municipio estaban en la periferia con valores por debajo de 0.5. La tendencia anterior se acentuó en 2010, ya que la población periférica a las ZM trabajaba en un municipio diferente al de residencia, mientras que en la periferia

se tenían los coeficientes más bajos; es decir, salían todavía menos ("Apéndice cartográfico; ahí mismo se muestra el cambio del coeficiente 2000-2010).

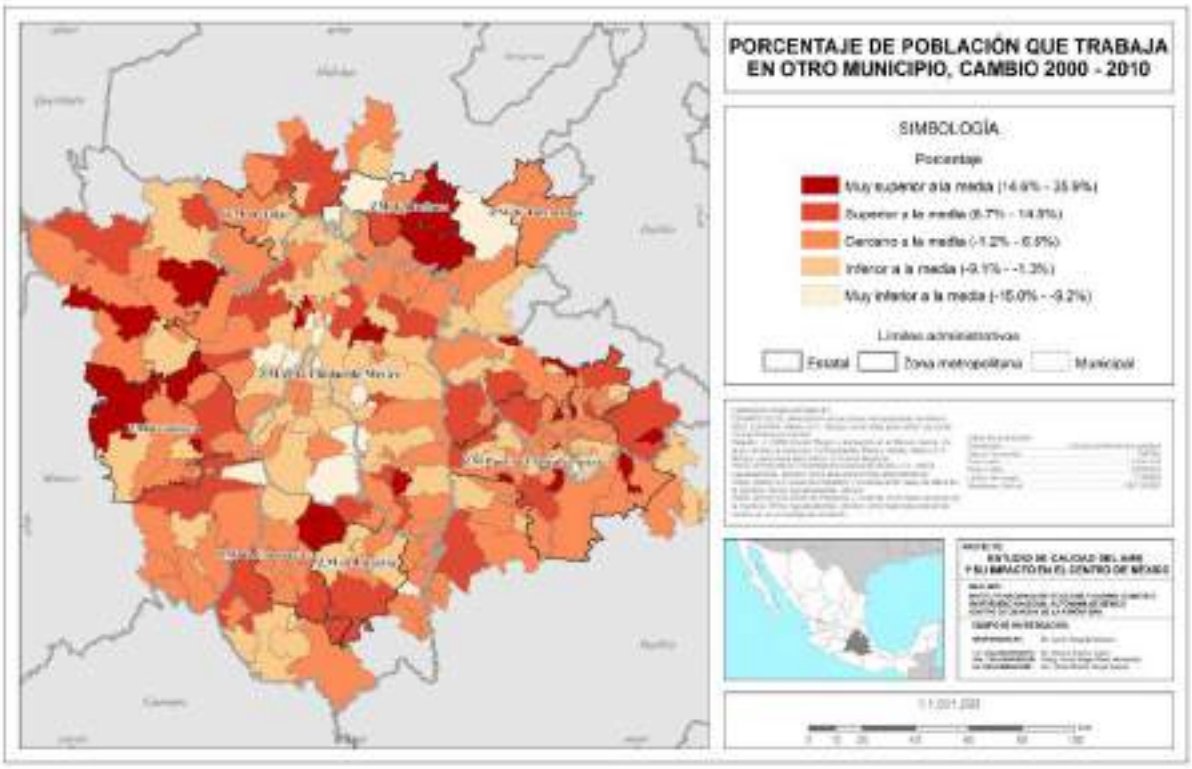


Figura A03-11 *Población (%) que trabaja en un municipio distinto al de residencia, cambio 2000-2010*

Fuente: elaboración propia.

3.3.4.3 ÍNDICE DE ATRACCIÓN

El índice de atracción permite identificar a los municipios o delegaciones que reciben más personas por motivo de trabajo. Un valor alto indica atracción y uno bajo se puede interpretar como de expulsión, pues se refiere a menores flujos de llegada. Un valor cercano a 1.0 flujos de llegada significa que hay entradas y salidas similares. En el año 2000 las delegaciones centrales del Distrito Federal fueron las que más población atrajeron, con valores superiores a 1.5. Valores similares se obtuvieron sólo en algunas delegaciones de la propia ZMCM, algunos municipios de Puebla y otros que no pertenecen a ninguna de las otras ZM de la Corona. El resto de los municipios y delegaciones presentan un índice cercano a 1.0 ("Apéndice cartográfico"). Para el año 2010 las mismas delegaciones siguieron siendo las de mayor atracción y se sumó Cuajimalpa —quizá por el peso económico de Santa Fe—, mientras que el índice bajó en los restantes municipios que habían tenido una atracción alta con excepción de los ya mencionados. El nivel más alto bajó de 9.34 a 5.80 ("Apéndice cartográfico").

El cambio de atracción entre 2000 y 2010 no fue tan drástico en la mayor parte de los municipios (-0.25 a 0.25), mientras que los cambios más altos (delegaciones y municipios que más población atraen) se presentaron en el Distrito Federal y en general en la ZMCM. Esta tendencia se perfila en los municipios centrales del resto de las ZM (**Figura A03-12**).

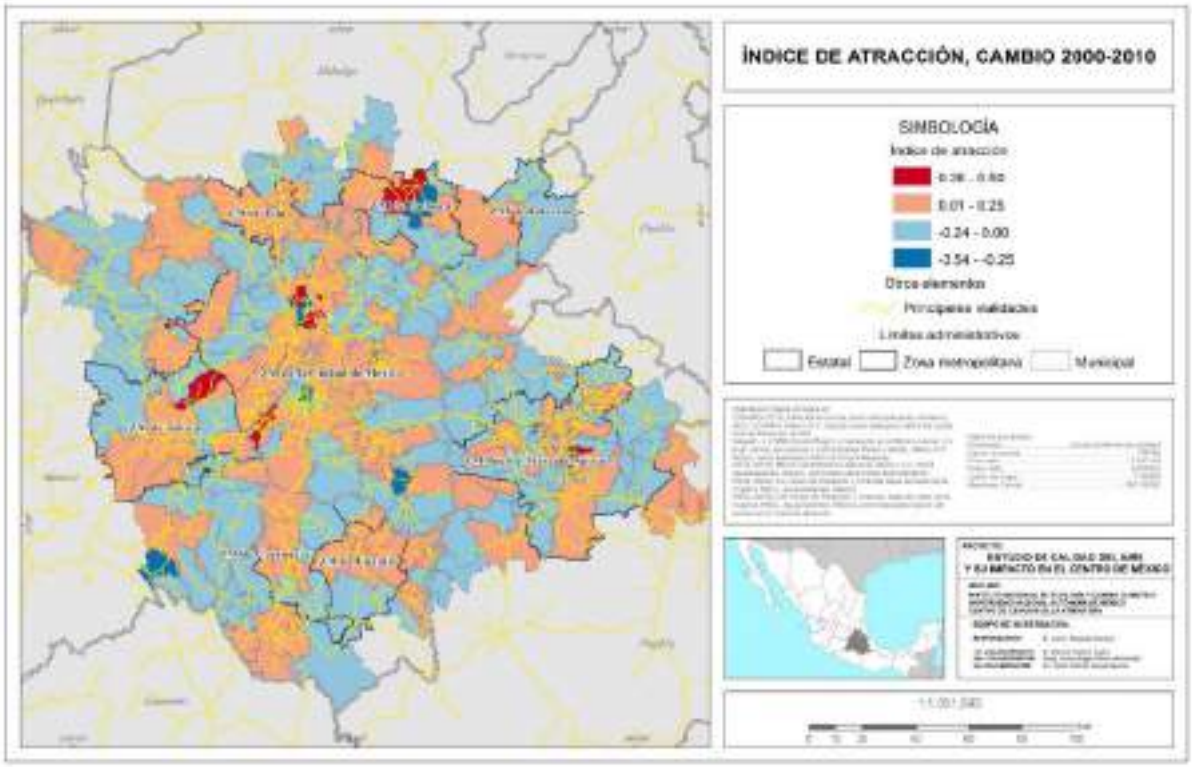


Figura A03-12 *Índice de atracción, cambio 2000-2010.*

Fuente: elaboración propia.

3.3.5 DISTANCIAS AL TRABAJO

Si se consideran las distancias entre cabeceras municipales y que cada flujo representa dos viajes (ida y vuelta), la distancia total recorrida en la Corona Regional aumentó en términos absolutos de 165 millones de km a 200 millones de km. Este incremento de 35 millones de km (21.3%) implica un ligero aumento (de 8.8 km a 9 km) de la distancia promedio de recorrido. Este aumento se debe en parte a que el número de flujos intramunicipales aumentó más que los intermunicipales. En 2000 los flujos intermunicipales representaban 35% de los flujos y disminuyeron en términos relativos a 32.5por ciento.

Aunque lo anterior significa que, de manera general, la Corona Regional aumentó su eficiencia en cuanto a la distancia de viajes al trabajo, los viajes intermunicipales entre pares de municipios más distantes aumentaron su distancia media de 19.6 km a 20.3 km.

3.3.5.1 DISTANCIAS PROMEDIO DEL LUGAR DE RESIDENCIA AL DE TRABAJO 2010

Para ir a su trabajo, los habitantes de las distintas ciudades y localidades de la Corona Regional recorren una distancia promedio de entre 3 km y 20 km, sin considerar a quienes se trasladan fuera de la Corona.

Las mayores distancias recorridas se presentaron en:

a) El noroeste de la Corona, por el efecto que ejerce Atlacomulco sobre los municipios cercanos y en la cuenca de México, en Villa del Carbón y Jilotzingo, que tienen una difícil integración a la ZMCM, y
b) en el norte, por una influencia, posiblemente alterna, que generan Tula, Pachuca y la ZMCM.

Las más cortas están en:

c) En el centro-poniente y norte del Distrito Federal en donde dicha distancia es de menos de 6 km, y
d) hacia el sur y al suroeste de Puebla (**Figura A03-13**).

Las zonas metropolitanas de la ciudad de México y la de Cuautla fueron las únicas que redujeron sus recorridos al trabajo y cocientes de localización (**Tabla A03-8**). En el área metropolitana de Toluca se registró el mayor aumento, de 1.5 km más en promedio. Ello contrasta con lo observado en los municipios de la periferia regional, donde la distancia promedio aumentó sólo en 1 km. La relación que guardan estos cambios de la distancia recorrida con las tendencias de urbanización se analizará más adelante.

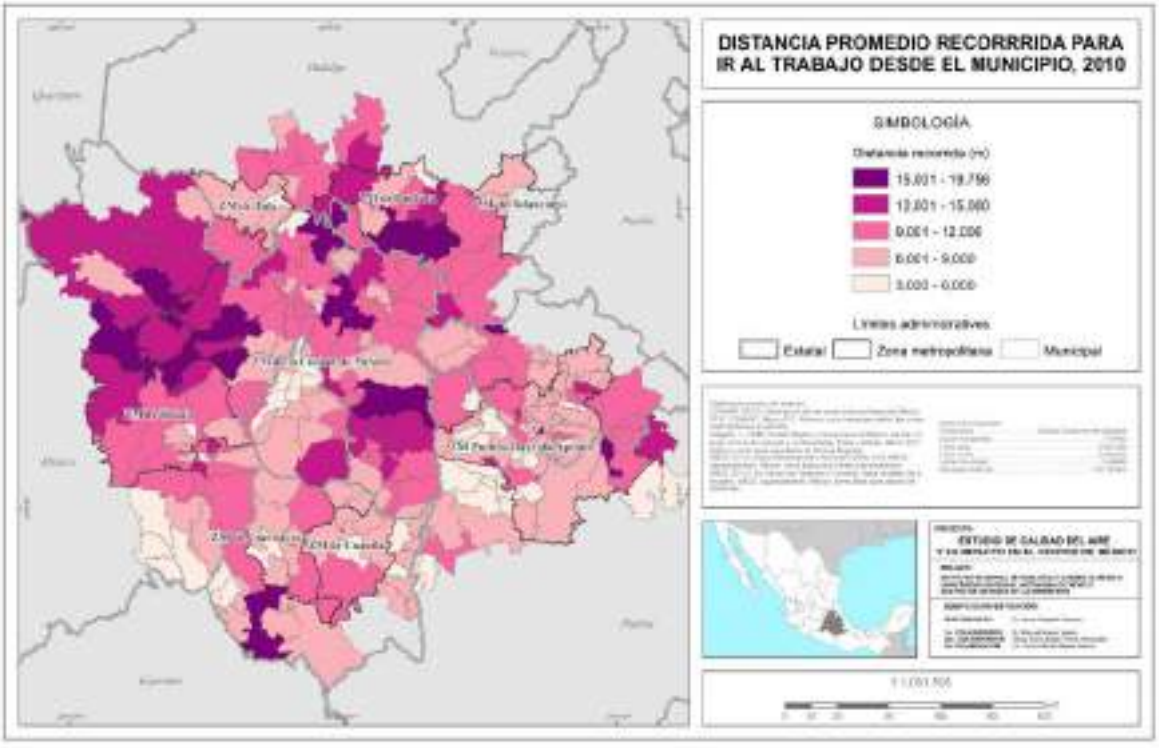


Figura A03-13 *Distancia promedio recorrida para ir al trabajo desde el municipio de residencia, 2010.*

Fuente: elaboración propia.

Tabla A03-8 Distancias promedio de recorrido al trabajo por zona metropolitana

Zona Metropolitana	2000	2010	Cambio	C.L. Cambio
Ciudad de México	9,613	9042	-570	3.3
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	7,409	7798	390	-3.0
Toluca	8,119	9620	1,501	-10.4
Cuernavaca	6,369	6822	453	-4.0
Pachuca	7,769	8597	827	-6.0
Cuautla	7,713	7089	-624	4.6
Tulancingo	6,123	6567	444	-4.1
Tula	7,461	7539	78	-0.6
Periferia	8,519	9537	1,017	-6.7
Total	8,969	8810	-159	1

Fuente: Cálculos propios con datos de INEGI 2000 y 201

Viendo cómo cambiaron las distancias recorridas entre 2000 y 2010, se determinan los recorridos cortos (hasta 2 km) o largos (4 km o más). Una parte considerable de los municipios de la periferia aumentó alrededor 2 km sus recorridos, mientras que otro alto porcentaje de población recorrió hasta 2 km menos en 2010, en particular en la ZMCM, lo que puede interpretarse como un mejor desempeño. En los extremos de la medición, algunos municipios de las periferias metropolitanas aumentaron en más 4 km sus recorridos o los disminuyeron en menos de 2 km (**Figura A03-14**).

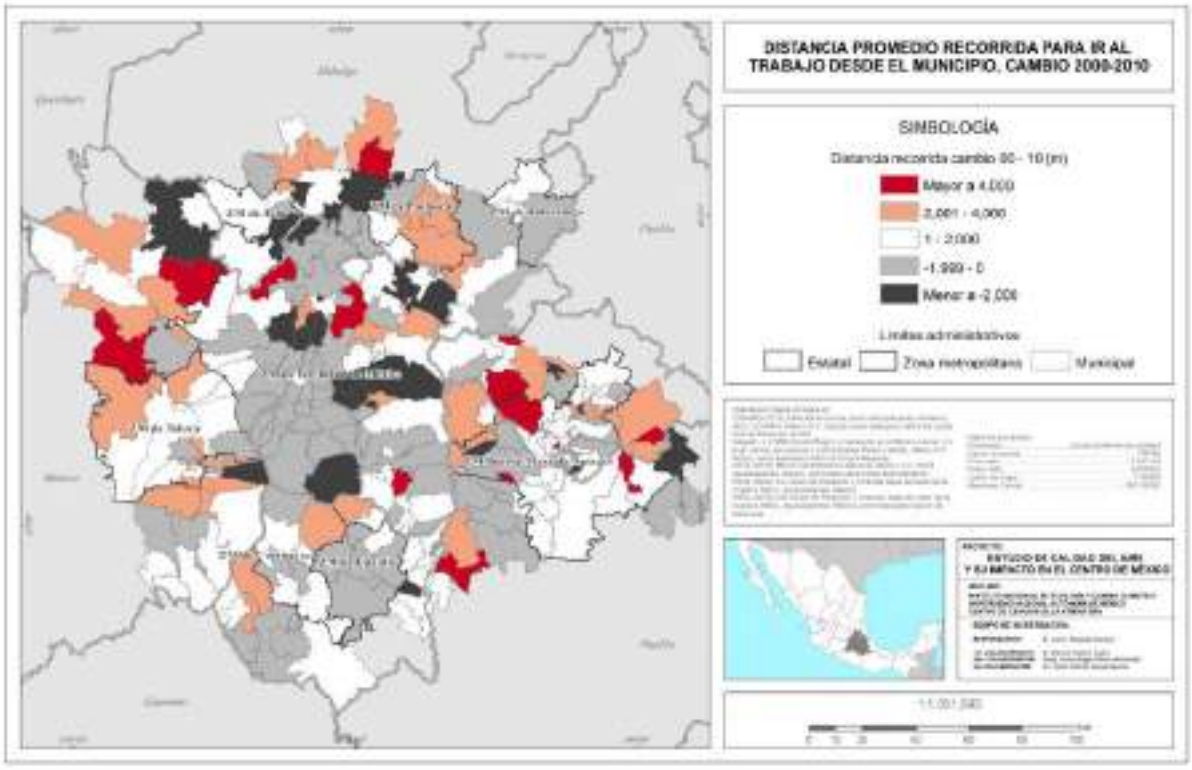


Figura A03-14 *Cambio en la distancia promedio para ir al trabajo desde el municipio de residencia, 2000-2010.*

Fuente: elaboración propia.

3.3.5.2 AUTOMÓVILES EN LA CORONA REGIONAL

Parte de los desplazamientos y las distancias recorridas al trabajo se efectúan en automóvil. Interesa en ese apartado identificar los recorridos vivienda-empleo, ya sean dentro del propio municipio o delegación de residencia o si se desplaza fuera de ellos. Para realizar esta estimación de los automóviles por municipio y per cápita sólo se tiene información para el año 2010.[8]

En la Corona Regional hay municipios que tienen solamente 350 automóviles, y otros que llegan hasta 277 mil, como son las delegaciones del Distrito Federal. Los municipios centrales de Toluca y Puebla tienen más de 50 mil automóviles. Fuera de esas zonas metropolitanas, en promedio los municipios tienen menos de 10 mil automóviles ("Apéndice cartográfico").

Un número mayor de automóviles en un municipio o delegación no necesariamente significa que ahí se tengan peores condiciones de emisiones a la atmósfera. En una medición de automóviles per cápita, el rango más bajo —de 0.1 a 0.3— significa que hay un automóvil por cada diez a tres personas. Por el contrario, en la parte superior de la escala, hay municipios en donde se tiene, en promedio, de tres a casi seis automóviles por persona, lo que requiere un análisis más profundo y, sobre todo, bases de datos. Aunque en las zonas metropolitanas de la Corona Regional hay más automóviles en total —siendo la ZMCM, sin duda, la más alta—, las ciudades tienen un menor índice de automóviles *por persona* y en municipios menos poblados se tiene más de un automóvil por persona. El promedio general en la Corona es de uno o menos de un automóvil por persona (**Figura A03-15**).

3.3.6 EXPANSIÓN URBANA 2000-2010

El incremento en la superficie urbana de las principales ciudades de la Corona Regional entre el año 2000 y el 2010, se estimó mediante AGEB urbana en el entendido de que en las AGEB de la periferia no toda la superficie está urbanizada (**Figura A03-16**), la delimitación metropolitana seguida fue la publicada por Conapo (2010).

[8] Como no se cuenta con el dato de cuantos automóviles se tienen por hogar, este número se estimó por métodos indirectos (ver apéndice metodológico).

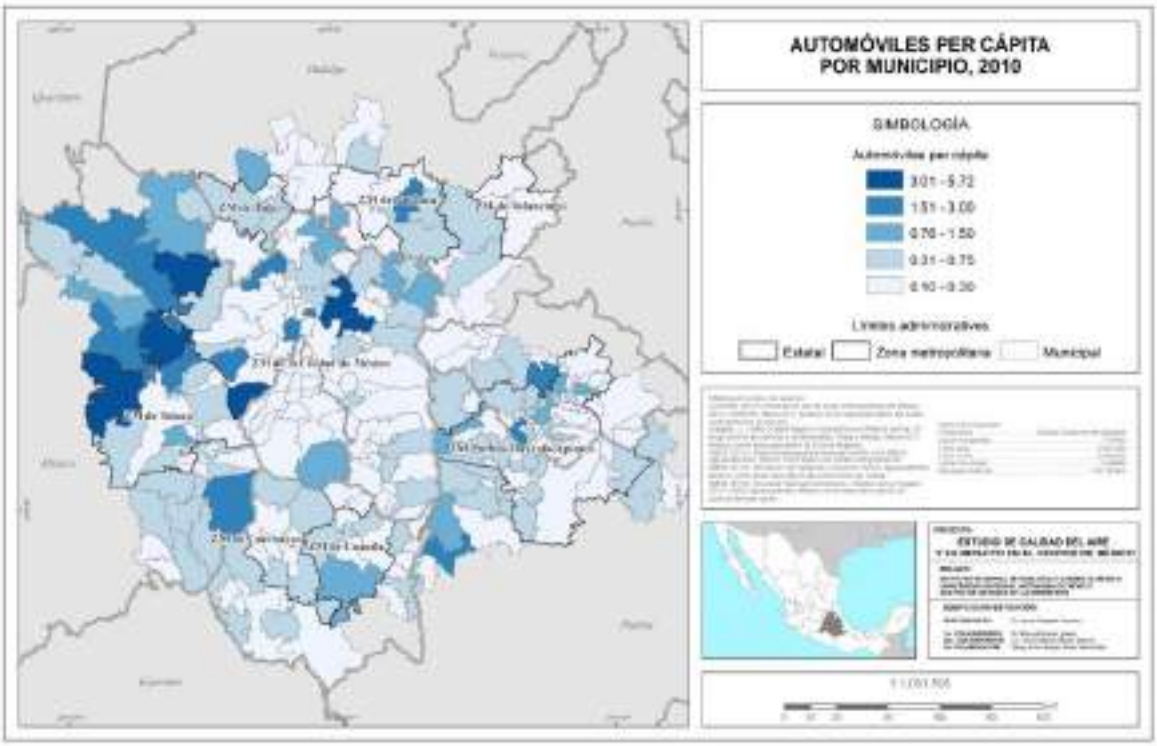


Figura A03-15 *Automóviles per cápita por municipio. 2010.*

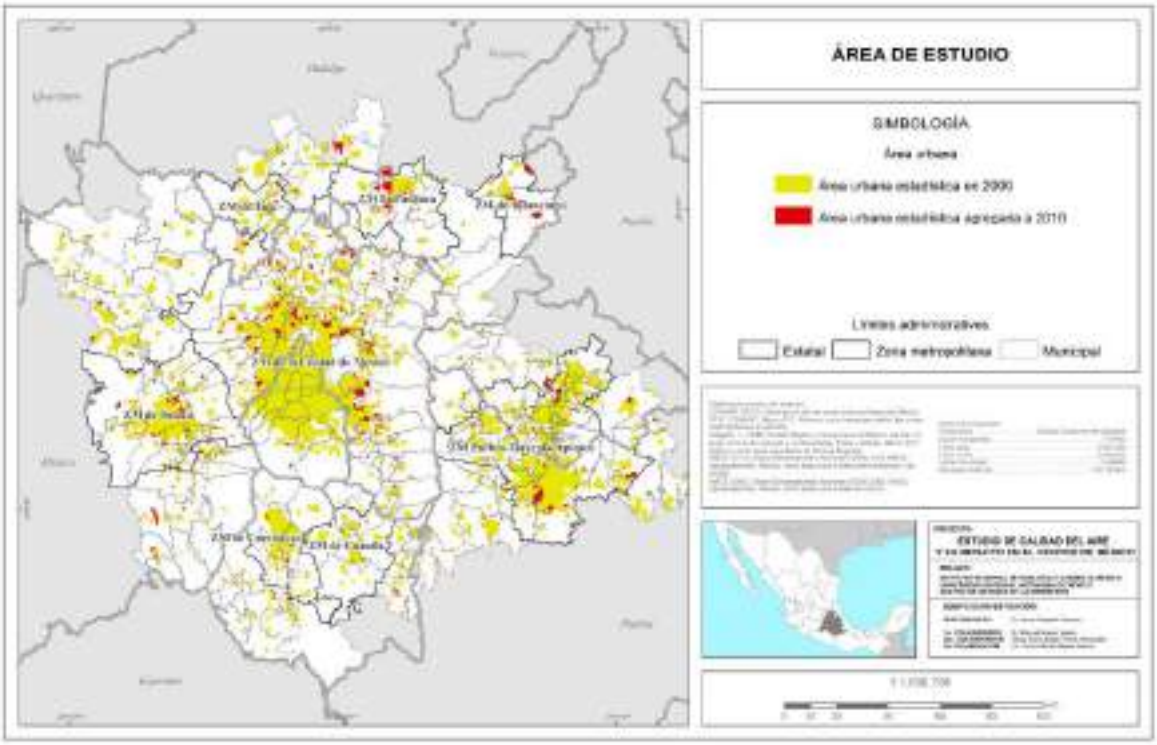


Figura A03-16 *Expansión urbana en la Corona Regional, por AGEB 2000-2010.*

Fuente: elaboración propia.

3.3.7 ESCENARIOS PROBABLES DE URBANIZACIÓN 2020 (SUPERFICIE URBANA POR AGEB)

Los escenarios probables de urbanización para el 2020 son resultado, primero, del análisis estadístico para estimar el Índice de Consolidación Urbano Regional (ICUR), y segundo, de procesar ese primer resultado a través de modelos estadísticos espaciales.

3.3.7.1 GRADO DE CONSOLIDACIÓN URBANO REGIONAL 2000-2010

El grado de consolidación urbano regional es resultado de un largo proceso de investigación sobre el tema. Permite identificar la amplitud territorial de la probable influencia de las ciudades sobre su entorno regional sin recurrir a la clasificación convencional de urbano o rural, basada en un umbral de población. En el presente texto se sistematizan los hallazgos previos para identificar la Corona Regional hechos por Delgado (Delgado *et al.*, 1997), así como de los primeros ensayos del índice de consolidación urbana-regional (ICUR) (Delgado *et al.*, 1999) y del índice de rururbanización (IRUR) (Galindo y Delgado, 2006) y los reúne en un solo índice (ICUR *ajustado*), al cual se aplicaron varios procesos estadísticos para identificar agrupamientos significativos de áreas con valores similares en su índice.

El resultado, que denominamos grado de consolidación urbano regional, permite caracterizar las distintas áreas según su grado de urbanización conjuntamente con características rurales y, en especial, de los municipios considerados como periurbanos. Éstos presentan una mezcla de ambas categorías —urbana y rural como predice la teoría—, aun sin estar conurbados. La complejidad que han alcanzado estos espacios alrededor de las ciudades hace necesario considerar otras variables sociales y económicas que intervienen activamente en el proceso de periurbanización. Este índice servirá para estimar la expansión urbana probable dentro de la Corona Regional.

Los indicadores empleados para el cálculo del ICUR *ajustado* conserva algunos de los incluidos anteriormente en el ICUR tanto como en el IRUR:

- **Densidad de población:** resultado de dividir la población total municipal entre la superficie del municipio en km^2.
- **Nivel de urbanización**: porcentaje de población urbana del municipio (que vive en localidades de más de cinco mil habitantes), respecto a la población total municipal.
- **Porcentaje de población económicamente activa no agrícola:** PEA no agrícola; se trata de la población económicamente activa por municipio, ocupada en el sector secundario y terciario, mayor de doce años.
- **Distancia de la cabecera del municipio a la cabecera municipal principal de la ZM más cercana:** Distancia cercana.
- **Coeficiente de localización del sector industrial:**[9] CL industrial; agrupa por municipio a la población económicamente activa ocupada en electricidad y agua, construcción y manufacturas, ponderada por la población económicamente activa de doce años y más por municipio y población total económicamente activa de la Corona Regional

[9] El Sector Industrial agrupa las actividades de electricidad, agua y gas, construcción y manufacturas.

ocupada en los mismos sectores, también ponderada por la población total económicamente activa de doce años y más de la Corona Regional.

- **Índice de dispersión (Demangeon):** muestra lo contrario al nivel de concentración; permite estimar qué tan dispersa se encuentra la población del municipio que habita en localidades de menos de cinco mil habitantes ponderada por el número de localidades con ese rango de población y la población total municipal.
- **Intensidad de uso de tierra agrícola:** intensidad agrícola; relación entre la superficie total de labor bajo riego y la superficie total de labor en el municipio.
- **Industrialización:** probablemente el indicador más directamente involucrado en la periurbanización sea la población económicamente activa por municipio, ocupada en manufacturas, de doce años, ponderada por la población total de la Corona Regional económicamente activa ocupada en manufacturas, y población total económicamente activa de doce años y más de la Corona Regional.
- **Migración (por estimación indirecta):** debido a que los censos reportan sólo la migración desde otros estados, se subestima la migración desde otros municipios dentro del estado y aun la migración al interior del propio municipio. Como interesa saber el volumen de población adicional aportado por esa migración, se recurre a una medición indirecta con base en la tasa de crecimiento nacional considerada como tasa natural.

Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) muestran que los componentes uno y dos explican poco más de 50% del análisis en la varianza acumulada (**Tabla A03-9**).

Tabla A03-9 Varianza acumulada del análisis por componentes principales (ACP)

	Comp 1	Comp 2	Comp 3	Comp 4	Comp 5	Comp 6	Comp 7	Comp 8	Comp 9
Desviación estándar	1.68	1.34	1.13	0.99	0.85	0.82	0.62	0.56	0.08
Proporción de varianza	0.31	0.20	0.14	0.11	0.08	0.07	0.04	0.03	0.00
Proporción acumulada	0.31	0.51	0.66	0.77	0.85	0.92	0.96	1.00	1.00

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla A03-10** se muestran los resultados de la matriz de correlación entre los resultados del ACP y los indicadores utilizados. Según esos resultados, los cinco primeros componentes son los más significativos, ya que cada uno de ellos explica cinco tipos diferentes de espacio —de lo urbano a lo rural pasando por el periurbano—, por lo que fueron seleccionados para el análisis posterior y se nominaron de la siguiente manera:

Comp 1 = Urbanización (Urba)
Comp 2 = Industrialización (Indu)
Comp 3 = Migración a zonas de industrialización rural (MZIR)
Comp 4 = Agricultura (Agri)
Comp 5 = Periferia urbana (PerUr)

Para interpretar el resultado de la correlación de los cinco componentes significativos por variable utilizada, se diferenciaron tanto los valores negativos como los positivos, en una escala decreciente donde los colores

más fuertes corresponden a una alta correlación y a la inversa, los colores menos intensos reflejan una baja correlación (**Figura A03-17**).

Tabla A03-10 Matriz de correlación de los resultados del ACP y los indicadores del ICUR ajustado.

Variable	Componentes significativos					Componentes no significativos			
	Urba	Indu	MZIR	Agri	PerUr	Comp 6	Comp 7	Comp 8	Comp 9
Densidad de población	-0.64	0.39	-0.4	-0.01	0.07	-0.28	-0.36	0.24	0
Nivel de urbanización	-0.75	0.42	0.11	0.15	0.05	-0.17	-0.04	-0.44	0
PEA no agrícola	-0.74	0.13	0.28	0.04	-0.32	-0.29	0.36	0.2	0
Distancia cercana	0.57	-0.22	0.15	0.32	0.43	-0.56	0.06	0.02	0
CL industrial	-0.57	-0.81	-0.12	-0.05	0.04	-0.03	-0.02	-0.04	-0.06
Índice de dispersión	0.6	-0.18	-0.2	-0.27	-0.56	-0.39	-0.11	-0.13	0
Intensidad agrícola	-0.08	0.09	0.41	-0.85	0.28	-0.11	-0.01	0	0
Industrialización	-0.53	-0.84	-0.07	-0.03	0.04	-0.02	-0.05	-0.03	0.06
Migración indirecta	-0.01	-0.14	0.89	0.24	-0.19	0.04	-0.31	0.06	0

Fuente: elaboración propia.

Ya seleccionados los cinco primeros componentes que mejor explican los diferentes tipos de espacio y con base en las puntuaciones obtenidas para cada uno de ellos, se realizó una matriz de distancia con método de medición euclidiana para identificar los conglomerados urbano-regionales.

Finalmente se realizaron varias iteraciones mediante el análisis de conglomerados jerárquicos y se agruparon conforme a la técnica de corte de árbol. Se partió de dos conglomerados hasta llegar a cinco, por lo que el último se realizó cuatro veces con base en prueba y error, de manera que los municipios involucrados en cada conglomerado guardaran características similares. Las características de cada conglomerado se muestran en la **Tabla A03-11** y corresponden a las medias de los indicadores utilizados. Con base en estos resultados se dio nombre a cada conglomerado de municipios.

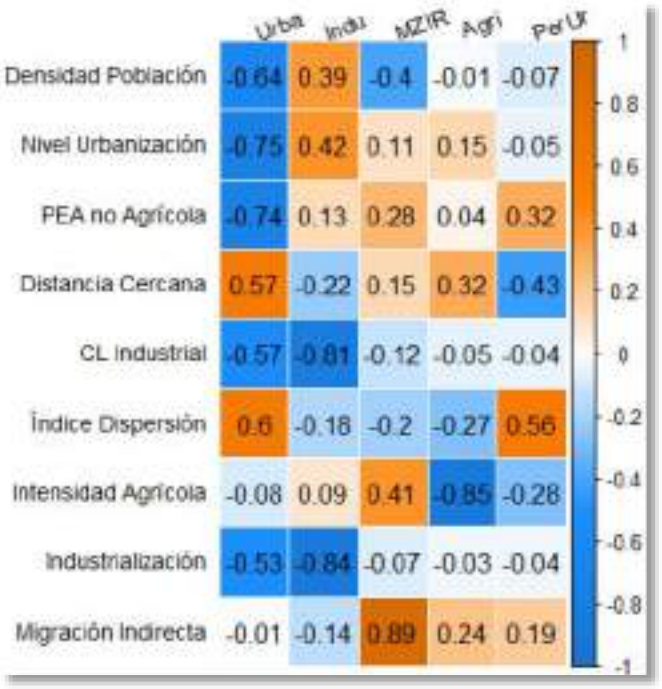


Figura A03-17 *Matriz de correlación de los resultados del ACP y los indicadores del IURP.*

Fuente: elaboración propia.

Tabla A03-11. Características de los conglomerados de la consolidación urbano-regional

Indicador	Centro de la Corona	Zona metropolitana	Periurbano consolidado	Periurbanos	Rural
Densidad de población	13593.10	2325.76	1757.30	699.91	228.16
Nivel de urbanización	100.00	68.32	55.77	36.26	22.16
PEA no agrícola	0.97	0.91	0.87	0.85	0.68
Distancia cercana	5694.02	24448.62	30021.51	33049.73	41212.27
CL industrial	2.34	0.76	0.55	3.69	0.33
Índice de dispersión	0.00	5.23	5.59	11..78	19.23
Intensidad agrícola	14.74	12.61	71.60	18.15	13.16
Industrialización	1.86	0.84	0.62	4.40	0.38
Migración indirecta	-56.96	66.74	70.42	63.65	52.94

Fuente: elaboración propia.

El *primer* conglomerado es el Centro de la Corona, las cuatro delegaciones centrales del Distrito Federal (Cuauhtémoc, Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza), más Azcapotzalco e Iztapalapa. Esas delegaciones tienen la más alta densidad de población con un nivel de urbanización de 100%, un mínimo de PEA agrícola y, por supuesto, no muestran dispersión.

El *segundo* tipo de espacio Zona Metropolitana incluye municipios que presentan un alto nivel de migración indirecta (la segunda más alta). Estos muestran una cierta dispersión, se encuentran a 24 km del centroide del municipio principal de la zona metropolitana más cercana. Como es de esperarse su intensidad agrícola es la más baja de todos los conglomerados.

Los municipios del *tercer* conglomerado, que denominamos Periurbano consolidado, responden a lo previsto en la teoría, ya que tienen la migración

indirecta más alta de la Corona, su urbanización está ligeramente por encima de 50% y se encuentran (en promedio) a 30 km del centroide del municipio principal de la zona metropolitana más cercana.

Las áreas del *cuarto* conglomerado Periurbano tienen la segunda PEA agrícola más alta (15%) pero con el más alto coeficiente de localización (CL) industrial y la industrialización más alta de la Corona (3.69 y 4.40 respectivamente). Además su densidad de población es sumamente baja (menor a los mil habitantes por km^2) y, en promedio están situados a 33 km del centroide del municipio principal de la zona metropolitana más cercana.

Las características del tercer y cuarto conglomerados son muy similares. Mientras los periurbanos consolidados están en proceso de integrarse a la periferia urbana de alguna de las zonas metropolitanas "cercanas". Los periurbanos todavía no lo están.

Por último, los municipios del *quinto* conglomerado Rural, contrastan con los cuatro anteriores pues alcanzan un muy bajo nivel de urbanización (22.2%) así como de densidad, y son los más alejados (41 km) del centroide del municipio principal de la zona metropolitana más cercana, con bajo CL industrial y la PEA agrícola más alta.

En las Figuras A03-19 y 20 se muestra la distribución de esos cinco conglomerados en la Corona Regional, de acuerdo con su grado de consolidación urbano regional en 2000 y 2010. Son pocas las diferencias entre ambos años; es posible advertir un aumento en el grado de consolidación, de rural a periurbano, de éste a periurbano consolidado y desde éste a metropolitano. Por ello, se describen únicamente los agrupamientos para 2010.

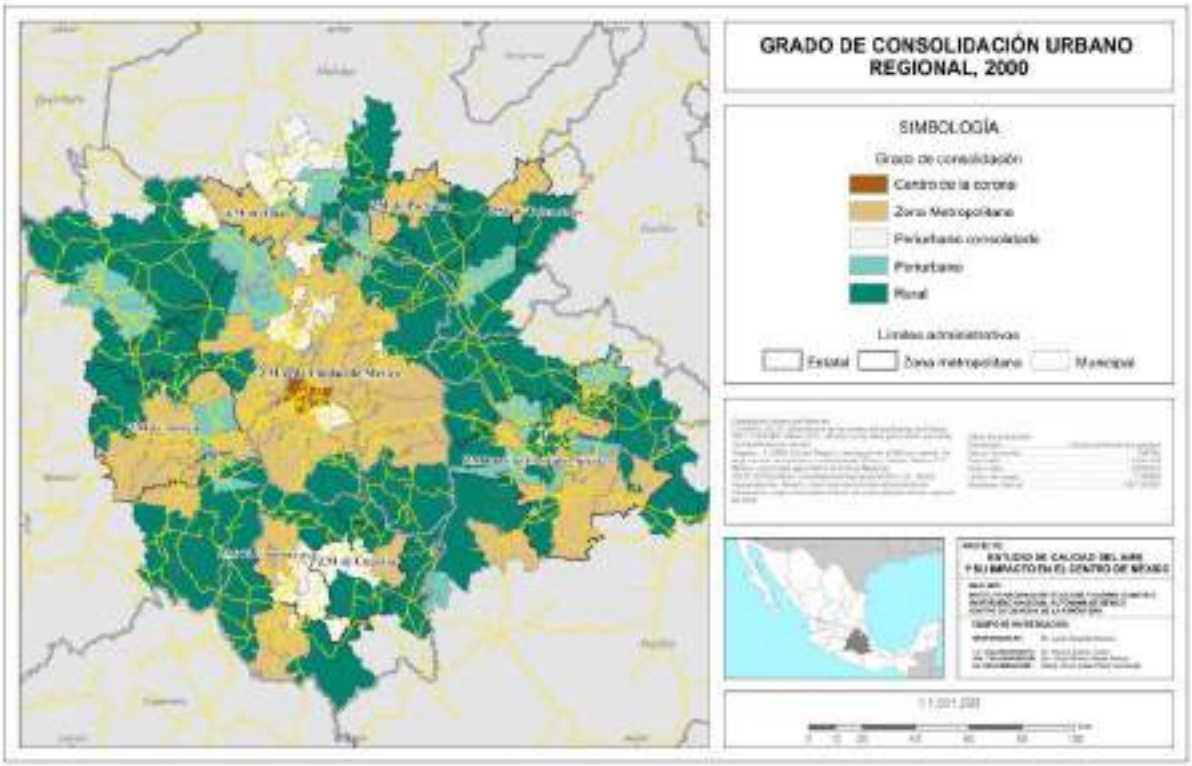


Figura A03-18 *Grado de consolidación urbano regional, 2000.*

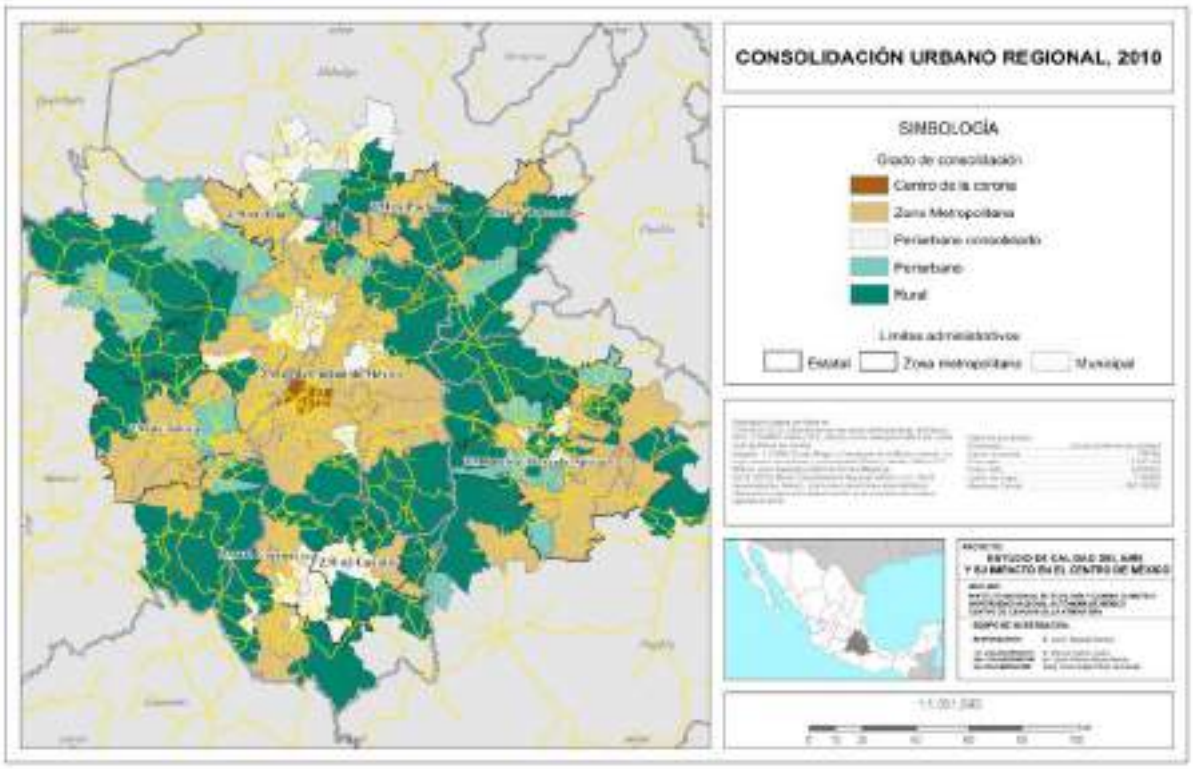


Figura A03-19 *Grado de consolidación urbano regional, 2010.*

Fuente: elaboración propia.

El Centro de la Corona corresponde a las delegaciones centrales del Distrito Federal. Las ZM corresponden a la mayor parte de los municipios clasificados oficialmente como metropolitanos y se trata principalmente del área que rodea a los centros de las ciudades dentro de la Corona. El periurbano consolidado es contiguo a las diversas ZM de la región, dentro de los cuales destacan tres agrupamientos principales: uno al norte del Distrito Federal, otro muy notable al sur, entre las zonas de Cuernavaca y Cuautla, y otro igualmente interesante sobre un arco norte de la Corona entre las ZM de Tula y Pachuca.

Los municipios periurbanos en el 2000 se encuentran dispersos en toda la periferia de la Corona pero con una distribución prevista por la teoría. Un primer tipo de clúster es el que se desarrolla entre las ZM de México-Toluca y otro entre Puebla-Tlaxcala; un caso interesante es el de Atlacomulco, rodeado por municipios rurales, similar al que se perfila alrededor de Ciudad Sahagún en el noreste. Finalmente, los municipios rurales se localizan en toda la Corona, en mayoría fuera de las ZM, aunque también se les encuentra dentro de las zonas, por ejemplo la delegación Milpa Alta en el Distrito Federal, intuitivamente considerada como “rural” en varias investigaciones.

3.3.7.2 ESCENARIO DE EXPANSIÓN URBANA DE LA CORONA REGIONAL, 2020

De acuerdo con las proyecciones de población por municipio, publicadas por el Consejo Nacional de Población (Conapo), la CRCM alcanzará una población de casi 34 millones de personas en el año 2020.

Sin embargo, su incidencia en la expansión urbana de la región, es muy incierta, ya que los supuestos para la predicción, no pueden formularse de forma lineal. Los pronósticos de magnitud y localización de la expansión urbana son de vital importancia pues constituyen un insumo básico para la planeación de la ciudad y su región. Con base en ese pronóstico se pueden estimar costos y riesgos medioambientales, planear anticipadamente los distintos usos de suelo, así como determinar escenarios de accesibilidad a empleos, demanda de transporte y flujos intra e interurbanos.

En este apartado se presenta un escenario de crecimiento urbano por hectárea en el año 2020, con base en el procedimiento propuesto por Delgado (1988) y una metodología refinada por Suárez y Delgado (2007), que ha aportado buenos resultados de predicción. La predicción espacial se apoya en tres supuestos sobre el comportamiento demográfico metropolitano propuestos por el Conapo (2003: 124): 1) los cambios esperados en la *tasa natural* de la población; 2) la incidencia de la migración intermunicipal, y 3) una consideración de la migración neta internacional. El escenario se construye a partir de: a) asignar, mediante estadística espacial, el incremento poblacional esperado a cada municipio, y b) operar diversas variables económicas, de relieve y distancia mediante un modelo de regresión logístico binomial, cuyos resultados se interpretan como "probabilidades de urbanización" a través de un sistema de información geográfica (SIG).

Sin embargo debe aclararse que debido a que las proyecciones de Conapo no toman en cuenta factores territoriales como los patrones de intensidad de usos de suelo, la oferta de empleo, nuevas infraestructuras de transporte y demás cuestiones que tienen un impacto directo en la densificación y expansión de los espacios urbanos y que pueden cambiar de un momento a otro. Los resultados obtenidos en la construcción de este escenario deben tomarse con las reservas debidas. Las modificaciones hechas al modelo original son las siguientes con los resultados:

Para la construcción del modelo calibrado se partió de los siguientes supuestos:

- La dirección que toma la expansión urbana es del centro hacia la periferia, tanto en el ámbito metropolitano como en el municipal y el local;
- la urbanización se efectuará primero, en las áreas contiguas a las existentes y en segundo término, asociadas a la expansión de localidades no urbanas preexistentes en el espacio periurbano cercano, y
- se mantendrá el mismo efecto proporcional de las variables empleadas en el modelo sobre las probabilidades de urbanización en distintos periodos de tiempo.

Asimismo, se espera que los resultados del modelo estadístico muestren que:

- La expansión urbana sea más amplia en aquellas localidades de mayor tamaño localizadas en municipios con áreas disponibles para la urbanización;
- la expansión urbana se facilite por la cercanía a vías de transporte y disminuya a medida que se alejen de ellas;
- la probabilidad e intensidad de la expansión urbana disminuyan en función de una mayor pendiente del terreno;
- exista una mayor probabilidad de urbanización en áreas con más accesibilidad a empleos, y
- las áreas con el menor valor de producción agrícola sean más susceptibles a la urbanización.

La base espacial para el modelo estadístico está conformada por las áreas urbanizadas entre 2000 y 2010 con base en la cartografía urbana por AGEB de INEGI. Se crearon mapas *raster* con resolución de una hectárea y se asignó un valor de 1 a los sitios que cambiaron de "no urbanos" a urbanos y un valor de 0 a los sitios que permanecieron como "no urbanos". El área urbana ya existente en 2000 fue excluida del análisis. De este mapa se extrajo una muestra de n=10,000 puntos: 5,000 en la zona urbanizada entre 2000 y 2010, y los otros 5,000 en zonas que permanecieron sin urbanizar.

El modelo estadístico predice el comportamiento de una variable dependiente (cambio de "no urbano" a "urbano" en el periodo 2000-2010, donde 0 es no y 1 es sí) a partir de una serie de variables independientes (**Tabla A03-12**).

Tabla A03-12 Variables utilizadas para el modelo calibrado de urbanización

Variable	Nombre	Fuente
[DISTRAKM]	Distancia a vías primarias de transporte (km).	Información topográfica vectorial escala 1:1,000,000 (INEGI, 2010[a])*
[DISTLOC]	Distancia a la localidad más cercana (km).	Información vectorial de localidades de la república mexicana 2010 (Conabio, 2010)*
[TAMLOC]	Población de la localidad más cercana (miles).	Censo General de población y vivienda (INEGI, 2010[b])
[RELIEVE]	Inclinación del terreno en el sitio (°).	Instituto de Geografía*
[MANUFAC]	Número de personal ocupado en manufacturas en un radio de 1600 m (miles).	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2011)*
[SERVS]	Número de personal ocupado en servicios en un radio de 1600 m (miles).	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2011)*
[IMU]	Índice de marginación urbana promedio en el sitio.	Instituto de Geografía*
[AGRÍCOLA]	Uso de suelo agrícola en el sitio.	Información topográfica vectorial escala 1:1,000,000 (INEGI, 2010[a])*

*Valor de la variable para el sitio calculado en SIG a partir de la fuente
Fuentes: elaboración propia con base en: a=INEGI 2010, Marco Geoestadístico Nacional; b=INEGI 2010, Censos de Población y Vivienda 2010.

Para cada uno de los puntos de la muestra se le calcularon los valores específicos de una serie de variables independientes seleccionadas que, según los supuestos teóricos, tendrían una mayor incidencia en el rumbo de la urbanización. Debido al carácter categórico de la variable dependiente, se utilizó una regresión logística binomial cuya función es la siguiente:

$$\widehat{Y}_i = \frac{e^u}{1 + e^u}$$

Donde:

$\widehat{Y}_i$ = Probabilidad estimada de que el *iésimo* caso (i= l,..., n) se encuentre en una de las categorías de la variable (cambio a urbano o no del sitio)

e= 2.718 (exponente natural)

u= ecuación de regresión lineal: $A + B_1X_1 + B_2X_2 + \cdots + B_nX_n$

Donde:

A= Constante

X_i=Valor de las variables independientes en el sitio

B_i= Coeficiente de la variable X_i

Según los resultados del modelo calibrado, las variables "*Distancia a carreteras*" [DISTRAKM] y "*Distancia a la localidad más cercana*" [DISTLOC] tienen un coeficiente negativo, indicando que, a medida que aumentan esas distancias, disminuye la probabilidad de urbanización. Es decir, la distancia a las localidades tiene un mayor peso. El "*Tamaño de la localidad*" [TAMLOC] tiene una dirección acorde con la teoría: un coeficiente positivo significa que mientras más habitantes tenga una localidad, mayor será la probabilidad de urbanización. Por su parte el [RELIEVE], es intuitivo y tiene un coeficiente negativo; es decir, a una mayor pendiente del terreno, menor probabilidad de urbanización. Sin embargo, la influencia de esta variable no es tan alta como en el caso de la distancia a localidades y carreteras. El "*Número de personal ocupado en manufacturas*" [MANUFAC] así como el "*Número de personal ocupado en servicios*" [SERVS] son variables con dirección positiva y de hecho son las de mayor peso en la urbanización de los sitios analizados. Por su parte el "*Índice de marginación urbana promedio*" [IMU] muestra el menor coeficiente negativo; es decir, a medida que aumenta el grado de marginación, disminuye la probabilidad de urbanización. Esto se explica porque el índice de marginación es más bajo en las áreas más cercanas a las ciudades y mayor en las más alejadas. Por último la variable "*Uso de suelo agrícola*" [AGRÍCOLA] tiene un coeficiente positivo, lo que significa que varias zonas agrícolas dentro de la Corona Regional tienden a estar ubicadas en las zonas más próximas a las grandes urbanizaciones como se predice en la teoría (**Tabla A03-13**).

Tabla A03-13 Modelo calibrado logístico binomial de probabilidad de urbanización en la ZMCM, 2000-2010

Variable	Coeficiente	Error estándar
[DISTRAKM]	-0.342*	0.026
[DISTLOC]	-0.494*	0.043
[TAMLOC]	0.283*	0.165
[RELIEVE]	-0.037*	0.004
[MANUFAC]	1.016*	0.164
[SERVS]	1.470*	0.087

[IMU]	-0.570*	0.078
[AGRÍCOLA]	0.207*	0.060

* Significativo a 0.001 o mejor.

Fuente: elaboración propia.

Una vez calibrado el modelo, se sustituyen los valores de las variables correspondientes a cada sitio para el año 2010. Al imputar esta información en la fórmula con los coeficientes obtenidos a partir del modelo calibrado y utilizando álgebra cartográfica en el SIG, se obtuvo el mapa de *Probabilidad de urbanización 2020* (**Figura A03-21**). Este mapa muestra la información digital de probabilidad estimada de urbanización, a nivel de hectárea para todos los sitios no urbanizados al año 2010.

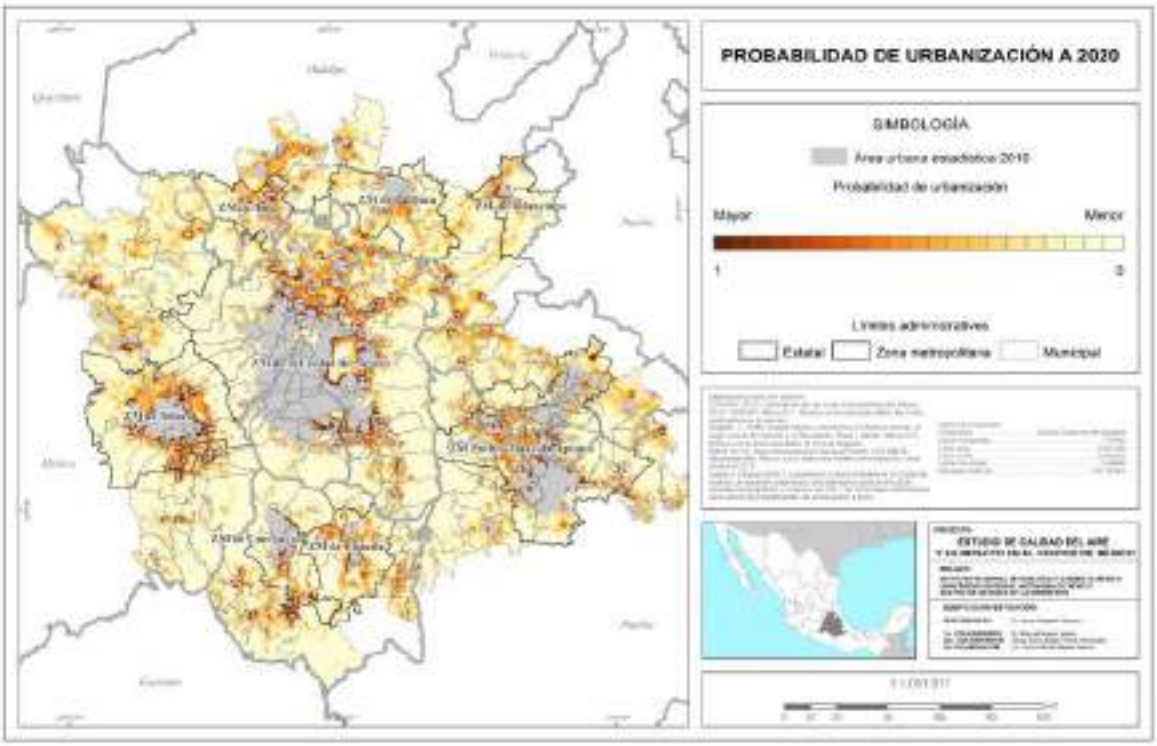


Figura A03-20 *Probabilidad de urbanización, 2020.*

Fuente: Elaboración propia.

Las áreas oscuras representan los sitios en donde es mayor la probabilidad de urbanización y claras donde es menor. Como se estableció en los supuestos, primero, buena parte de las zonas más propensas a urbanizarse se localizarían en la proximidad de las zonas urbanas existentes, en segundo término, como resultado del crecimiento de localidades no urbanas y en tercer lugar, a lo largo de las principales carreteras.[10]

[10] Por supuesto, estos sitios "probables" no pueden predecir eventos contingentes, como invasiones o la construcción de infraestructura o equipamiento público o privado.

3.3.7.3 ASIGNACIÓN DE CRECIMIENTO POR MUNICIPIO

Una vez ubicadas las áreas con mayores probabilidades de urbanizarse, se estimaron las que realmente podrían urbanizarse, de acuerdo con la población proyectada, bajo el supuesto de que la densidad de población se mantendría constante hasta el año 2020. Esta estimación podría cambiar de acuerdo con políticas públicas o intervenciones privadas casuísticas, difíciles de prever.

Posteriormente, se asignó el crecimiento poblacional proyectado para cada municipio a los sitios más propensos de urbanizarse (estimados en el paso anterior), en orden descendente. A partir de esta asignación se obtuvo el mapa de *Escenario de urbanización a 2020* (**Figura A03-22**).

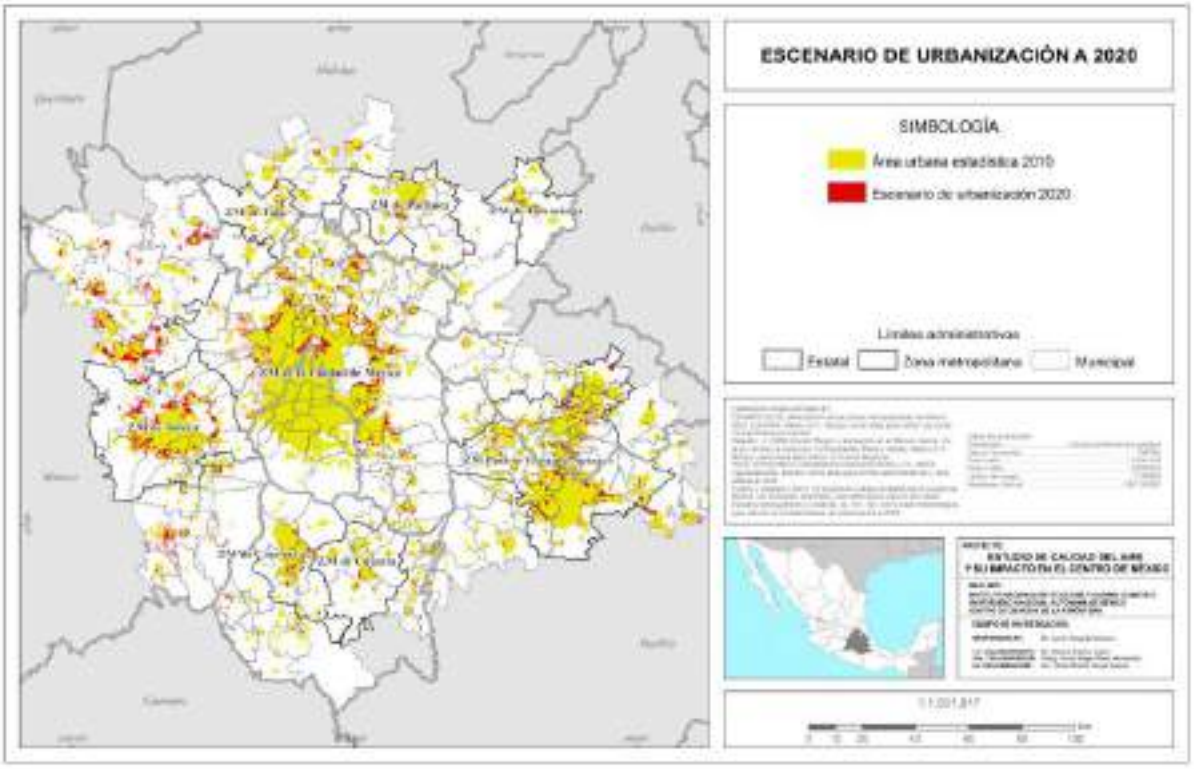


Figura A03-21 *Escenario de urbanización, 2020.*

Fuente: Elaboración propia.

Según este mapa, la urbanización se restringiría en un mayor grado a las áreas adyacentes a las zonas urbanas existentes, mientras que las nuevas urbanizaciones serian producto del crecimiento de localidades no rurales

Al contrastar el aumento real de población y superficie urbana entre 2000 y 2010 con el previsto mediante el anterior procedimiento, conviene resaltar que, según este modelo, el área urbana de la Corona Regional se incrementará en 111 mil hectáreas en 2020. A pesar de que México y Puebla, las dos más grandes ciudades de la Corona, no tendrían una expansión tan pronunciada como en otras ciudades, serían las de mayor crecimiento en superficie, mientras que Toluca, si bien tiene un crecimiento estimado de

30% para la siguiente década (el mayor de todas las zonas metropolitanas analizadas), presentaría el menor incremento en superficie. Sin embargo, la construcción de escenarios alternativos que superen las deficiencias de este primer escenario puede confirmar o replantear los hallazgos encontrados (**Tabla A03-14**).

Tabla A03-14. Escenario de población y superficie urbanas a 2020

Zona metropolitana	Población urbana		Incremento		Superficie urbana		Incremento	
	2010	2020	(abs.)	%	2010*	2020	(abs.)	(%)
Ciudades principales								
Ciudad de México	19,576,248	21,582,947	2,006,699	10.3	781,912	819,863	37,951	4.9
Puebla - Tlaxcala - Apizaco	3,040,472	3,455,602	415,130	13.7	308,438	324,788	16,350	5.3
Toluca	1,537,001	2,030,953	493,952	32.1	2,190,089	2,204,942	14,853	0.7
Cuernavaca	837,500	940,600	103,100	12.3	118,460	121,056	2,596	2.2
Ciudades secundarias								
Pachuca	438,874	496,891	58,017	13.2	118,793	121,171	2,378	2.0
Cuautla	338,565	383,417	44,852	13.2	97,549	98,946	1,397	1.4
Tulancingo	181,998	211,829	29,831	16.4	66,826	68,272	1,446	2.2
Tula	155,299	176,115	20,816	13.4	58,711	59,791	1,080	1.8
Periferia	1,631,260	2,116,498	485,238	29.7	1,398,574	1,431,854	33,280	2.4
Total	**27,737,217**	**31,394,852**	**3,657,635**	**13.2**	**5,139,352**	**5,250,683**	**111,331**	**2.2**

*Según AGEB urbanas.

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Conclusiones

Como resultado del estudio, el equipo de trabajo formuló seis conclusiones principales. El contenido particular de cada una de ellas puede ser consultado en el capítulo respectivo.

1. Importantes flujos regionales al trabajo, en distintos modos de transporte que constituyen fuentes móviles de emisiones en los espacios periurbanos, no están siendo registrados. Entre 2000 y 2010 esos flujos aumentaron de 9.2 a 11.3 millones. Los indicadores estimados y sus resultados fueron:

   a) población que trabaja en otro municipio: alcanzó 30% en 2000, 45% en 2010; localizados en las áreas metropolitas pero de forma creciente en los espacios periurbanos;
   b) el coeficiente del cambio de ese tipo de población entre 2000 y 2010 indica que en la ZMCM disminuyó el volumen de *commuters* y aumentó en la periferia en particular en Toluca (14%) y Pachuca (35%), lo que interpretamos como un mejor desempeño de los traslados en la ciudad de México y un empeoramiento de ellos en las otras ciudades.

2. En tanto que la metodología para identificar espacios periurbanos ha mostrado consistencia con lo observado en campo, es necesario considerar esa localización dispersas en la estimación de emisiones de contaminantes y no circunscribirá, como hasta ahora a las grandes ciudades.

Se identificaron tres tipos de espacios: el periurbano consolidado (correspondiente con lo previsto en la teoría), el periurbano (en donde la periurbanización es incipiente) y los rurales en donde todavía no se manifiestan signos de periurbanización.

En el tipo consolidado habitan 3.4 millones de personas con una densidad de ocupación de 17.6 hab./ha (la óptima es 150) lo que indica una subutilización del suelo, tiene un nivel de urbanización cerca del 50%, y se encuentran a una distancia promedio de 30 km de la cabecera municipal principal de la ZM más cercana. La población que trabaja fuera de esos municipios es de medio millón.

3. Las estimaciones anteriores se hicieron con la mejor información disponible. A manera de proxy dicha información deja claro que se requiere levantar una Encuesta Origen Destino Regional para un diagnóstico certero y actualizado; ello nos permitirá contar con datos confiables para corroborar o en su caso reformular, las conclusiones anteriores.
4. La extensión inusitada de esos espacios no conurbados pero vinculados estrechamente con las diferentes ciudades de la región, se debe en parte a la falta de un control efectivo de usos del suelo en las periferias urbanas, metropolitanas y en espacios periurbanos. Este grave problema tiene un largo antecedentes en la periferia convencional de las ciudades que se agrava en los espacios periurbanos debido a la debilidad política y técnica de los municipios involucrados.

   La población periurbana consolidada actualmente ocupa aproximadamente 194 mil has; si mediante un control del suelo creciera a la densidad promedio de las ciudades de la corona (sin incluir a la de ciudad de México) ocuparía solamente unas 90 mil has. Si lo hiciera a la densidad de la ciudad de México serían únicamente 39 mil has ocupadas. Podemos sostener que el desperdicio de suelo es de aproximadamente 100 mil has en el primer caso y 156 mil en el segundo. Lo que también puede leerse que esa misma superficie se pierde para otras actividades económicas.

   Lo anterior es sin considera otros usos del suelo —industrial, comercial—, en las áreas periurbanas consolidadas.

5. La perspectiva sumamente crítica que muestran nuestros resultados se ve agravada con el traslape normativo entre los Planes Estatales de Ordenamiento Territorial y los de Ordenamiento Ecológico Territorial. Ello constituye un fuerte obstáculo institucional debido que ambos ordenamientos están sujetos a una legislación previa que no ha podido ser superada mediante la figura de distintas “coordinaciones metropolitanas”, ya que sus resultados han sido escasos.

   No se trata sólo de mejorar la coordinación metropolitana e impulsar la regional (prácticamente inexistente), sino de reformular esa instancia con indicaciones precisas sobre: i) la entidad institucional

responsable de aplicar la normatividad respectiva, ii) la responsable de darle seguimiento a las aplicaciones y iii) la responsable de sancionar en su caso, los incumplimientos.

6. Para reforzar la capacidad institucional para llevar a cabo esas tareas es necesario reforzar la capacidad técnica financiera en los municipios —sobre todo en aquellos con mayores rezagos—, para instrumentar la coordinación de políticas regionales, estatales y nacionales. Este problema es también antiguo y en cierta medida, estructural.

   Para resolverlo se debe tomar en cuenta:

   a) la dimensión local y regional de cada problema —de infraestructura, urbanización, manejo ambiental—, a distintas escalas, y
   b) reforzar la capacidad de respuesta de los municipios más débiles, de manera de preservar la soberanía municipal y estatal y hacer operativas las directrices federales.

Bibliografía

Conapo (2010), Delimitación de las zonas metropolitanas de México, 2010, Conapo, México D.F., México, como base para definir las zonas metropolitanas en estudio.

Conapo (2010), Proyecciones de la Población 2010-2050, Conapo, México D.F., México, como base para cálculo de probabilidades de urbanización a 2020.

Delgado, J.

—— (1991), "Valle de México: El crecimiento por conurbaciones" en la *Revista Interamericana de Planificación*, vol. XXIV, núm. 94, abril-junio de 1991, Guatemala, pp. 226-249.

—— (1998) Ciudad Región y transporte en el México central. Un largo camino de rupturas y continuidades, Plaza y Valdez, México D.F., México.

—— (2003), "La urbanización difusa, arquetipo territorial de la ciudad región", en revista *Sociológica,* enero-abril, año 18, no. 51, ISSN 0187-0173, pp. 13-48, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México.

Delgado, J., C. Anzaldo y A. Larralde (1999), "La Corona regional de la ciudad de México. Primer anillo exterior en formación" en Delgado, J y B. Ramírez (Coords.), *Transiciones. La nueva formación territorial de la ciudad de México*, Programa de Investigación Metropolitana, Plaza y Valdés, UAM, México, pp.171-194.

Galindo, C. y J. Delgado (2006), "Los espacios emergentes de la dinámica rural-urbana", revista *Problemas del Desarrollo*, Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México, ISSN 0301-7036, vol. 37, No. 1476, octubre-diciembre, pp. 187-216.

Geyer, H and T. Kontully (1993), "A theoretical foundation for the concept of Differential Urbanization" en *International Regional Science Review*, vol. 15, No. 2, pp. 157-177.

INEGI

—— Censos nacional de población y vivienda ,2000 y 2010, México

—— Censos económicos 1999 y 2009, México.

—— (2010), Marco Geoestadístico Nacional (MGN) v.5.0,

Ruiz, N. y J. Delgado (2008), "Territorio y nuevas ruralidades: un recorrido teórico sobre las transformaciones de la relación campo—ciudad" revista *EURE*, vol. XXXIV, agosto, número 102, pp. 77-95.

Secretaria del Estado del Gobierno de Hidalgo Consejo Estatal de Población, visto en: http://poblacion.hidalgo.gob.mx/descargables/18pachuca_zm_10

Sedesol, Segob -2010 Delimitación de zonas metropolitanas 2010. Consultado en línea: http://www.inegi.org.mx/Sistemas/multiarchivos/doc/702825003884/DZM20101.pdf -2005 Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005. Consultado en línea: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/delimex05/DZMM-2005

Suárez, M y J. Delgado (2007), "Estructura y Eficiencia Urbanas. Accesibilidad a empleos, localización residencial e ingreso en la *ZMCM* 1990-2000", revista Economía, Sociedad y Territorio, El Colegio Mexiquense, México, vol. VI, núm. 23, pp. 693-724.

Suárez, M y J. Delgado

-(2007), "La expansión urbana probable de la ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020, en la revista *Estudios Demográficos y Urbanos,* El Colegio de México, vol. 22, Núm. 1 (64), pp. 101-142.

-(2010) "Patrones de movilidad residencial en la ciudad de México: ¿Evidencia de Co-localización de población y empleos?", revista EURE, vol. 36, No. 107, abril, pp. 67-91, Santiago de Chile.

Suárez, M., J. Delgado y C. Galindo (2011) "*Local Spatial-Autocorrelation and Urban Ring Identification: Exporations in Mexico City's Regional Belt*" en *Boletín Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM, México, No. 7, pp. 88-102.

Suárez, M., M. Murata y J. Delgado (2015), *Why do the poor travel less?* (enviado).

Apéndice cartográfico

Población en la Corona Regional

ACTIVIDADES ECONÓMICAS

POBLACIÓN OCUPADA Y COEFICIENTE DE LOCALIZACIÓN POR SECTOR:

- Servicios
- Comercio
- Manufacturas
- Finanzas
- Transporte
- Construcción
- Electricidad, Agua y Gas
- Minería

FLUJOS INTRARREGIONALES DE TRABAJO EN LA CORONA REGIONAL

- Población que trabaja en otro municipio
- Coeficiente de Localización de población que trabaja en otro municipio
- Índice de atracción

DISTANCIAS AL TRABAJO

- Distancia promedio al trabajo
- Automóviles

EXPANSIÓN URBANA 2000-2010

CIUDADES PRINCIPALES

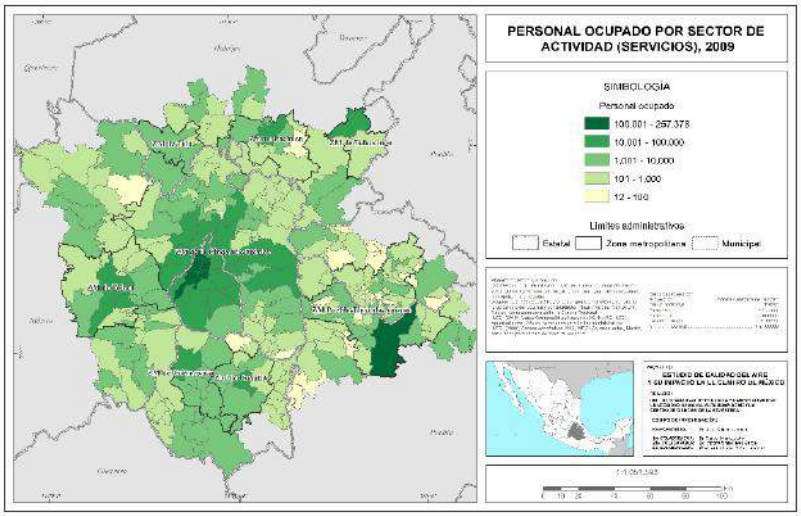
- ZM de la ciudad de México
- ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco
- ZM Toluca
- ZM Cuernavaca

CIUDADES SECUNDARIAS

- ZM Pachuca
- ZM Cuautla
- ZM Tulancingo
- ZM Tula

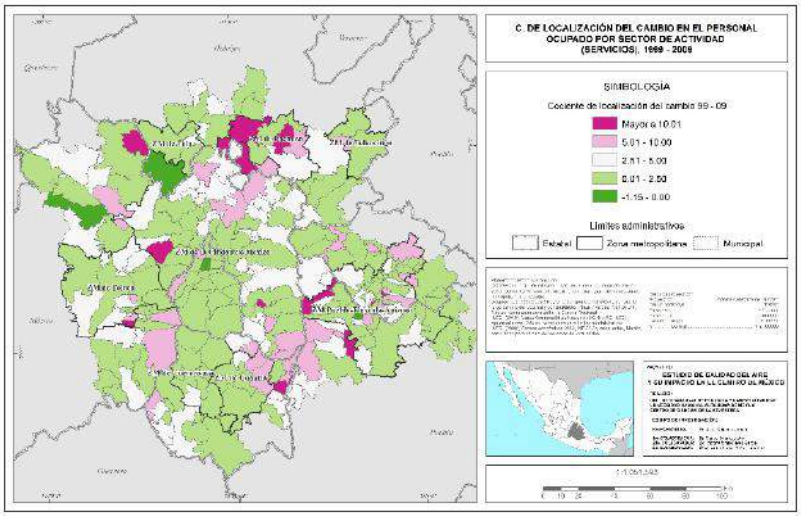
ESCENARIOS PROBABLES DE URBANIZACIÓN 2020

Mapa MC-A03-01 Personal ocupado total en el Sector Servicios, 2009



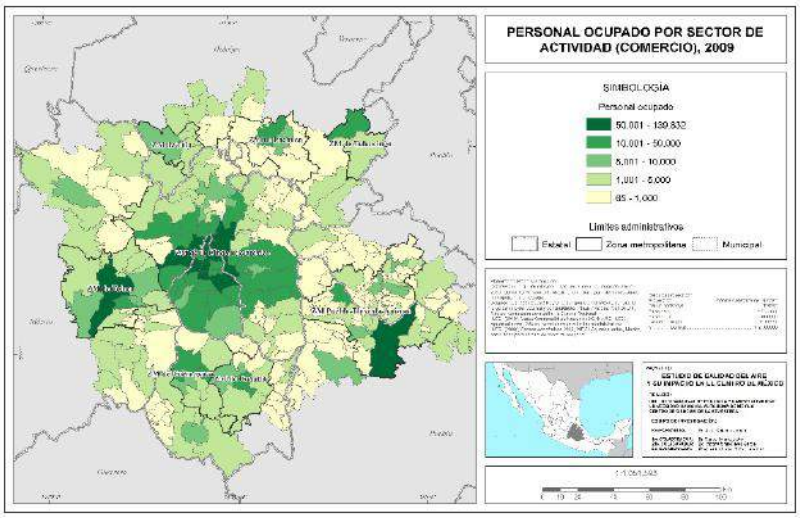
El sector servicios agrupa el mayor volumen de población de todos los sectores. En las ciudades principales hay población ocupada por encima de 10 mil, en el DF resaltan algunas delegaciones que tienen más de 100 mil habitantes dedicados a los servicios, en la periferia se tiene la menor población dedicada a estas actividades.

Mapa MC-A03-02 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Servicios 1999-2009



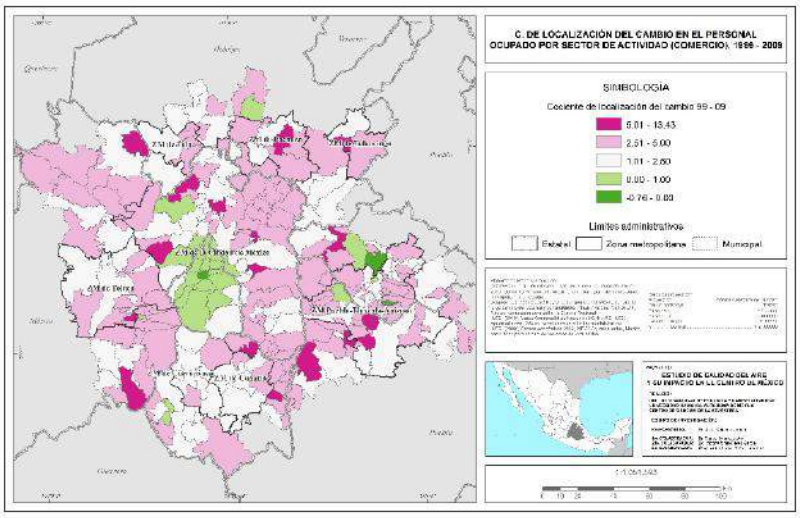
En general en la mayor parte de los municipios de la región aumentó el personal ocupado en servicios, y solo en algunos hubo alguna una pérdida, lo que indica una tendencia hacia la especialización en el sector servicios.

Mapa MC-A03-03 Personal ocupado total en el Sector Comercio, 2009



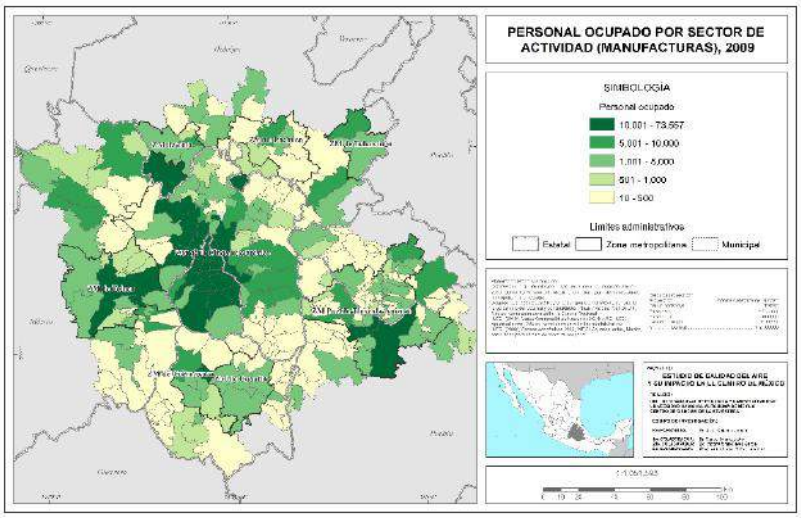
El personal ocupado en este sector se concentra en la ZM de la ciudad de México, en mayor medida en el norte del DF en los límites con el Estado de México. En el resto de las ciudades la población que se dedica al comercio se concentra en las ciudades capitales de su respectivo estado.

Mapa MC-A03-04 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Comercio 1999-2009



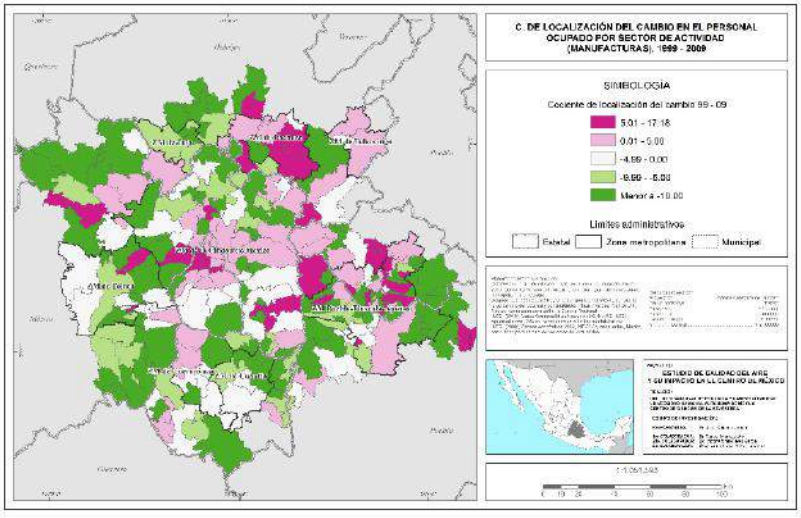
En la ciudad de México, en particular en el DF, el coeficiente de localización disminuyó, por lo que menos población se dedica al comercio, aunque habría que considerar el comercio informal que se considera en el censo. Por el contrario, en muchos municipios de la Periferia destaca la población dedicada al comercio, lo que puede ser indicativo de que están fortaleciendo nuevos (y pequeños) lugares centrales.

Mapa MC-A03-05 Personal ocupado total en el Sector Manufacturas, 2009



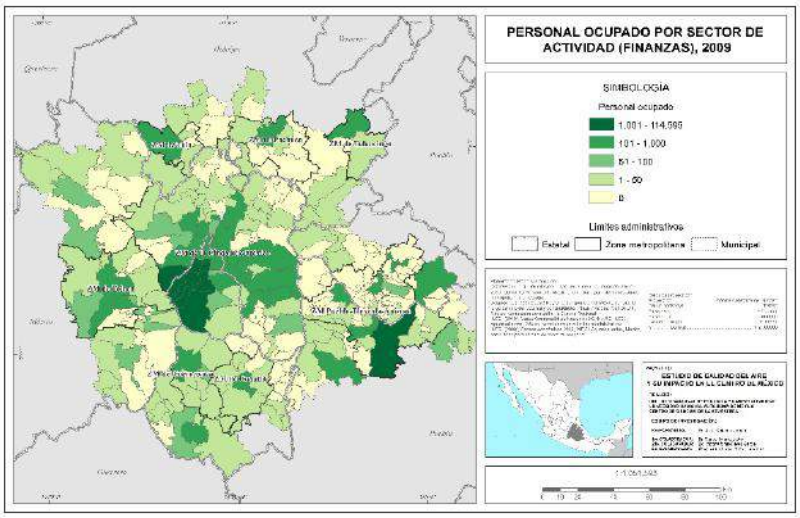
La ZM de la ciudad de México sobresale por la población que se dedica a las manufacturas, así como también en los municipios de las demás ciudades principales. En general, hay más gente trabajando en la manufactura en los municipios del norte de la Periferia de la CR en comparación con el sur.

Mapa MC-A03-06 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Manufacturas 1999-2009



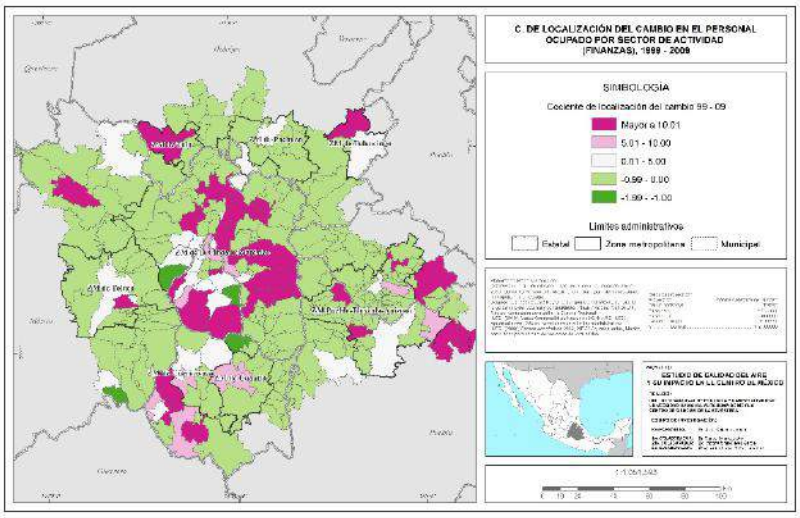
De manera general en las manufacturas se tiene una tendencia a la estabilidad y a la disminución en la población de la CR dedica a esa actividad, dentro de esta tendencia sobresalen positivamente los municipios de la ZM Pachuca en donde hubo más gente que se dedicó a las manufacturas en 2009 que en 1999.

Mapa MC-A03-07 Personal ocupado total en el Sector Finanzas, 2009



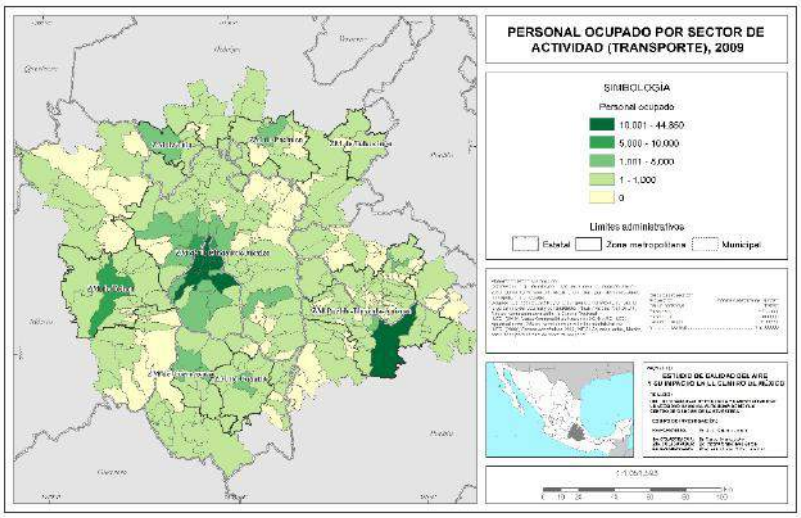
La población del sector finanzas se encuentra principalmente en el DF y en los municipios conurbados más cercanos, así como en el centro de las ciudades principales de la CR lo que ilustra la preferencia por la centralidad de los centros de negocios. Por el contrario en los municipios de la Periferia hay poca o nula población en el sector.

Mapa MC-A03-08 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Finanzas 1999-2009



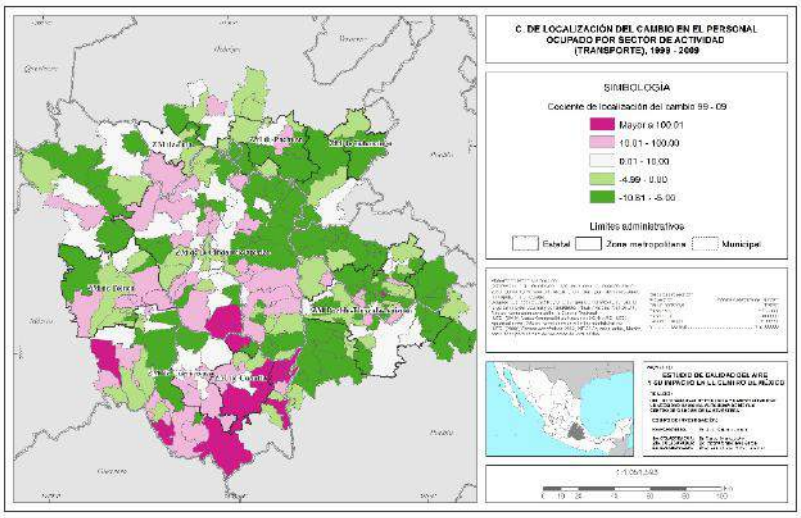
El cambio del coeficiente de localización en el sector finanzas en el periodo 1999-2009 fue de aumento en las principales ciudades, siendo los más importantes los de la ZM de la ciudad de México, mientras que en el resto de la CR la tendencia fue a cambios nulos y disminución de la población ocupada en las finanzas.

Mapa MC-A03-09 Personal ocupado total en el Sector Transporte, 2009



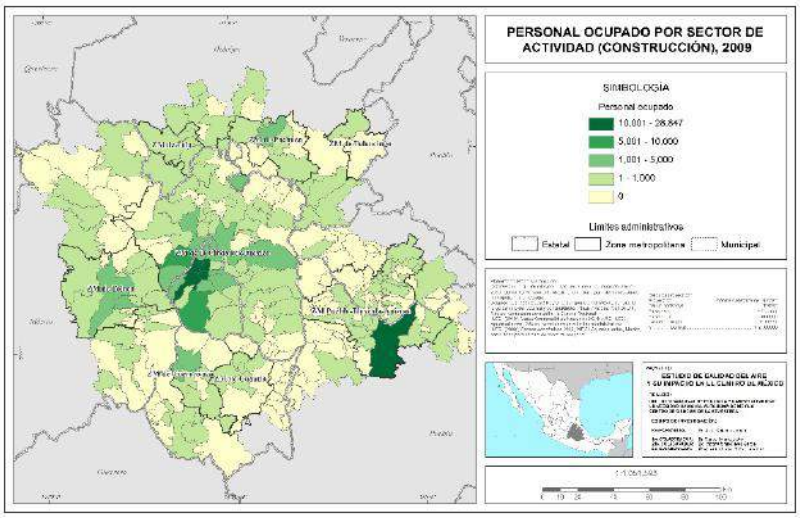
La población empleada en el sector transporte se encuentra principalmente en el DF, en las ZM de Toluca y Puebla-Tlaxcala-Apizaco, las ZM más pobladas de la CR. En el resto de municipios de la CR la población ocupada por municipio es menor a 5 mil personas y hay muchos municipios sin ninguna población ocupada en este sector.

Mapa MC-A03-10 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Transporte 1999-2009



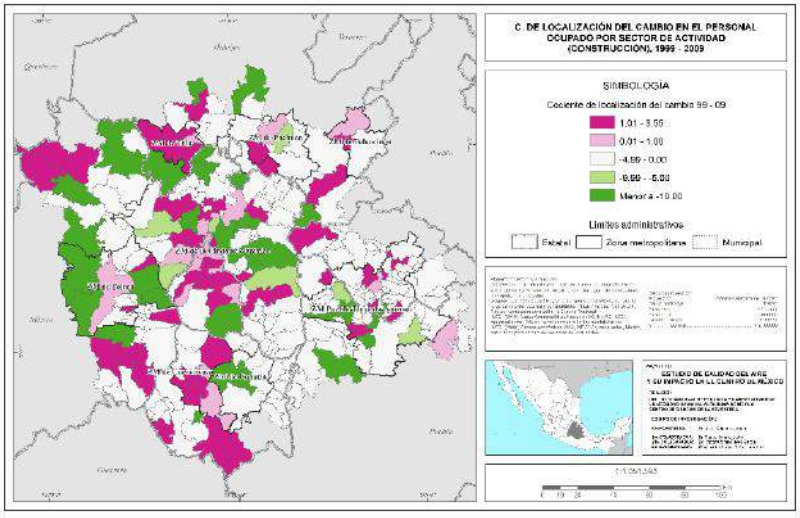
Entre 1999 y 2009 la población ocupada del sector transporte disminuyó en la mayoría de municipios de la CR, los aumentos más importantes se dieron al sur de la CR, en Milpa Alta y Tlalnepantla, en la ZM de Cuautla y en el sur de la Periferia.

Mapa MC-A03-11 Personal ocupado total en el Sector Construcción, 2009



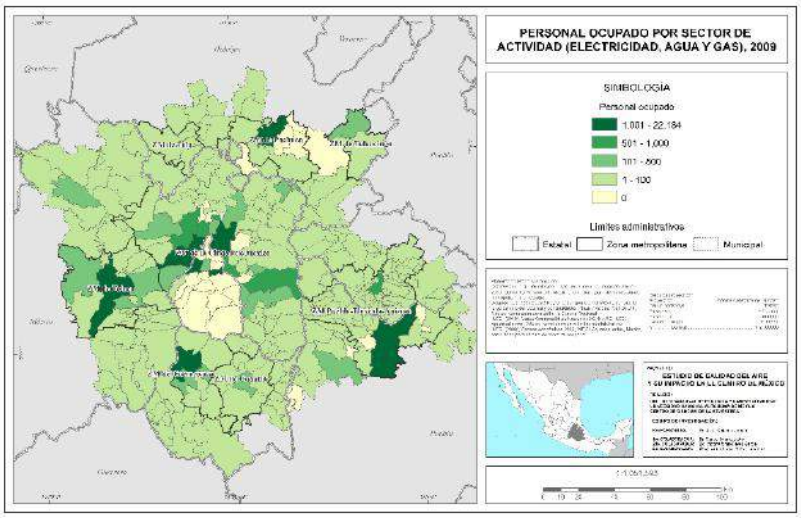
La población ocupada en el sector construcción se concentra en la ciudad de México (DF) y Puebla-Tlaxcala-Apizaco (Puebla) en donde su número supera las 10 mil personas en cada municipio. En el resto de la CR, por municipio, 5 mil personas o menos se dedican a la construcción, mientras que para la Periferia sobresale el número de municipios en los cuales no se tiene población dedicada a esa actividad.

Mapa MC-A03-12 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Construcción 1999-2009



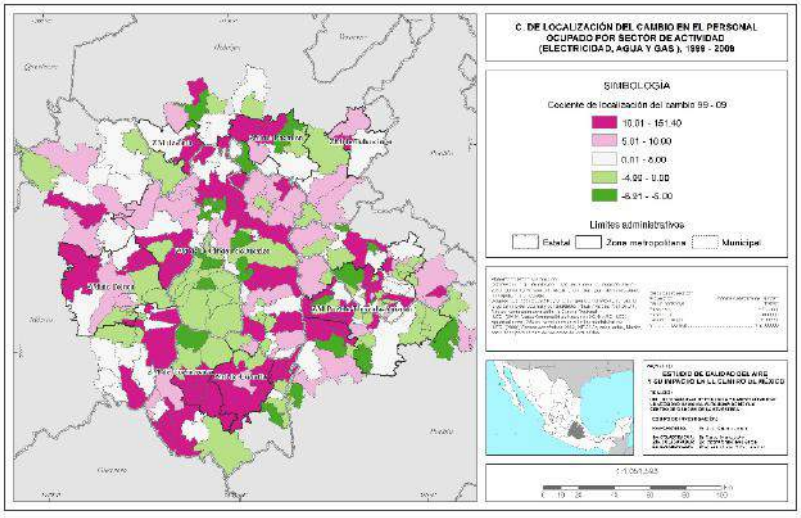
En la CR no se identifica alguna concentración espacial de la actividad, dentro de las ZM hay municipios con aumento y otros con disminución. Es peculiar el caso del DF donde sólo cinco de las 16 delegaciones mantuvieron en población dedicada al sector construcción. Salvo caso de municipios muy puntuales, en la Periferia se aprecia una disminución de personas en la construcción.

Mapa MC-A03-13 Personal ocupado total en el Sector Electricidad, Agua y Gas, 2009



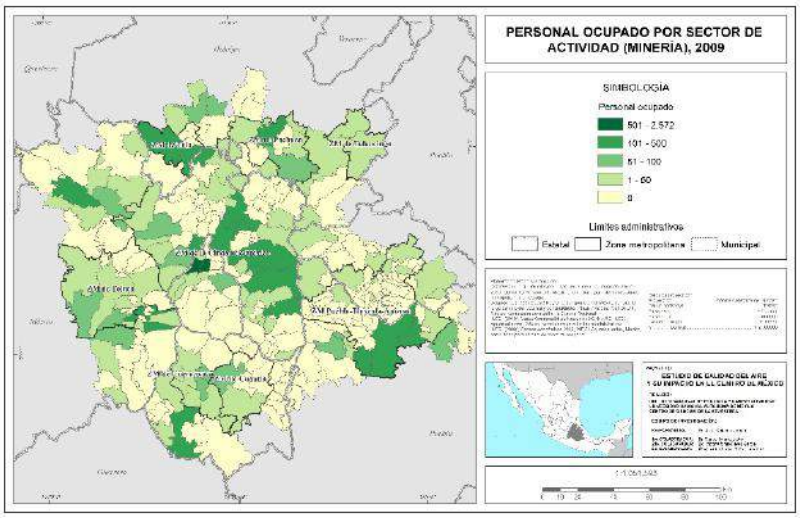
En este sector, en promedio, se tienen entre 100 y 500 personas dedicadas a esa actividad en los distintos municipios y parece una actividad urbana. Por su parte en el DF, cuatro de las 16 delegaciones tienen población ocupada en el sector y ninguno en las restantes 12 delegaciones.

Mapa MC-A03-14 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Electricidad, Agua y Gas 1999-2009



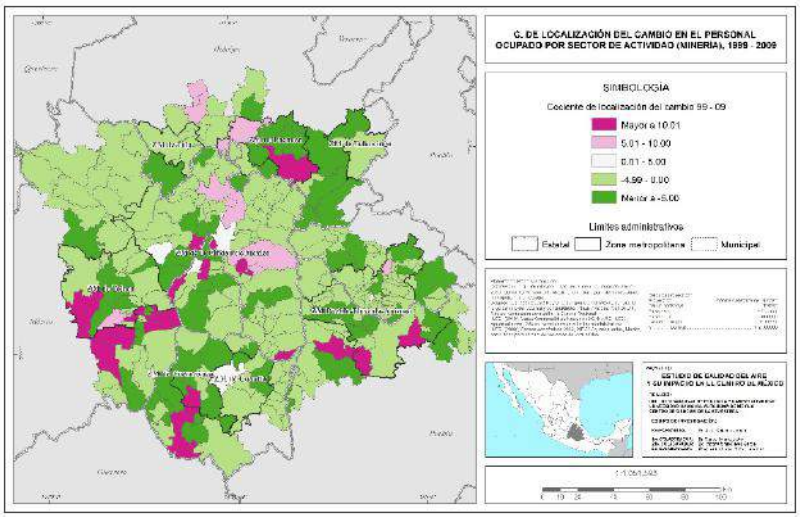
El cambio en el coeficiente muestra que la población total del sector disminuyó en el DF, mientras que fuera del DF hubo cambios muy variados de aumento y disminución, siendo clara una tendencia hacia la periferización de la localización alrededor de las ciudades principales.

Mapa MC-A03-15 Personal ocupado total en el Sector Minería, 2009



Las principales ubicaciones de esta ocupación son las ZM de Pachuca, Tula, ciudad de México y Toluca. Las minas en ZM de Pachuca y Tula son a cielo abierto con diversos efectos ambientales incluidas las emisiones a la atmosfera. En el resto de los municipios es necesaria una mayor desagregación de los sectores económicos para conocer con mayor precisión el tipo de actividades mineras que ahí se realizan. En la Periferia también hay un gran número de municipios con personal dedicado a la minería.

Mapa MC-A03-16 Coeficiente de Localización del cambio en el personal ocupado total en el Sector Minería 1999-2009

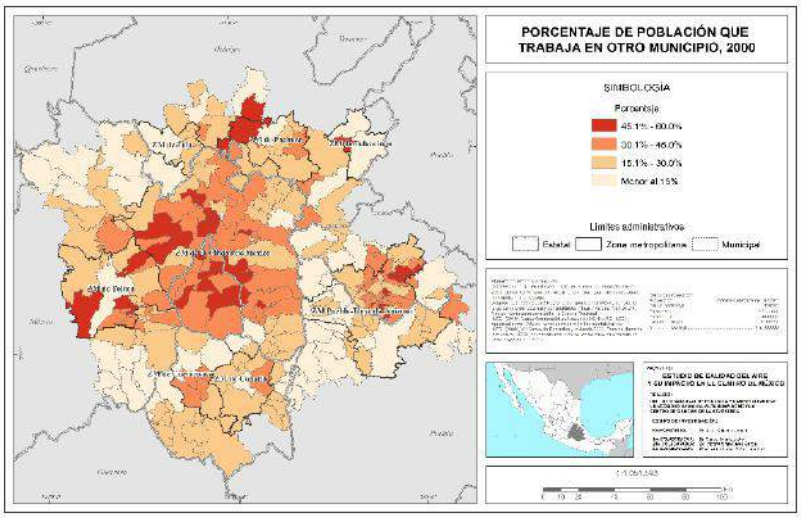


Los cambios más altos de personal ocupado en minería se presentan en municipios del sur de la Periferia de la CR. Su predominio es en la ZM de Pachuca pero también algunos de sus municipios tienen los niveles más bajos de cambio, lo mismo sucede en la ciudad de México y en menor medida en Puebla-Tlaxcala-Apizaco. Las ZM de Cuernavaca y en especial de Tula sobresalen por tener los valores más altos de cambio en el coeficiente de localización.

3.7.3 Flujos de Trabajo Intrarregionales en la Corona Regional

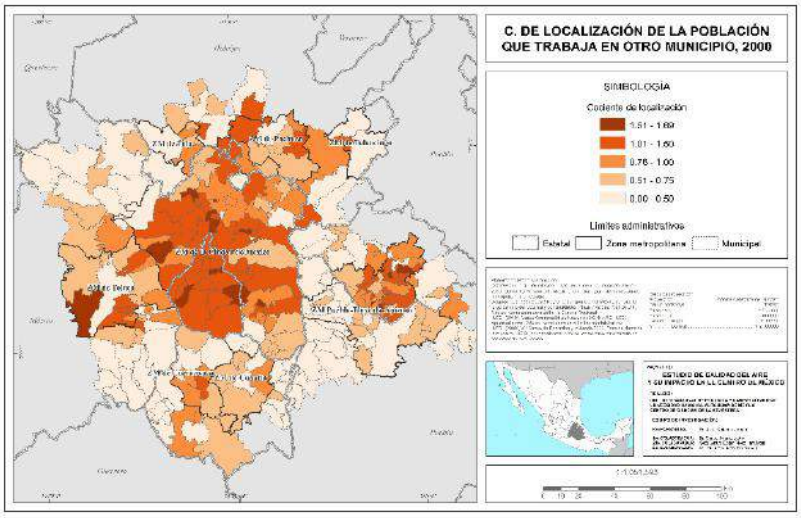
En los siguientes mapas se muestran los flujos municipales, a través de la población que trabaja en un municipio distinto al de residencia, cambios, cocientes de localización e índice de atracción, para el periodo 2000-2010:

Mapa MC-A03-17 Población que trabaja en otro municipio, 2000



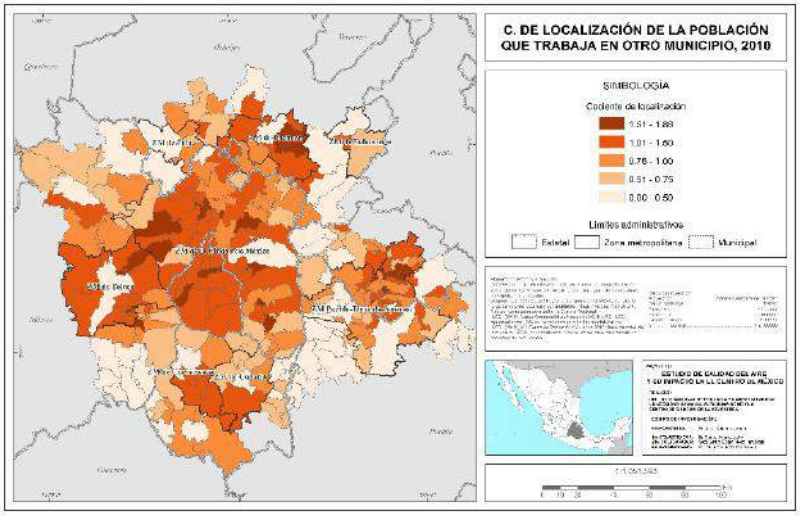
En el 2000 más del 30% de población salía de su municipio o delegación para ir trabajar, principalmente en las ciudades principales de la CR mientras que en la periferia el porcentaje es mucho menor.

Mapa MC-A03-18 Coeficiente de Localización de población que trabaja en otro municipio, 2000



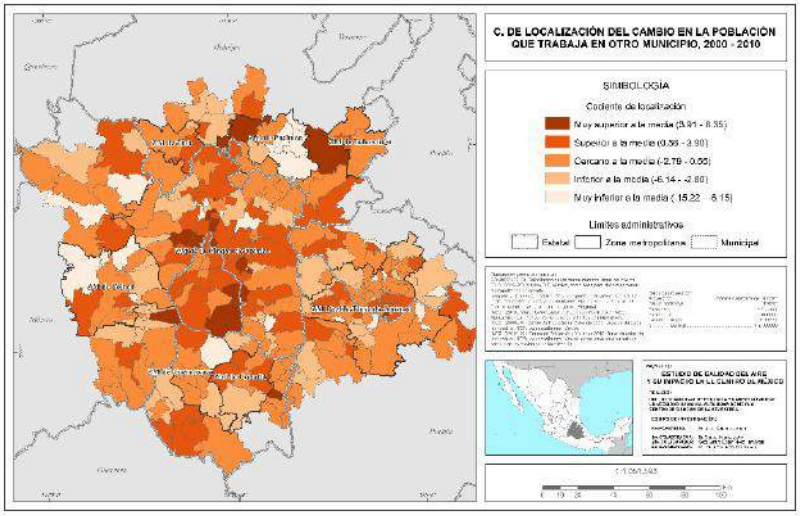
Los resultados del coeficiente de localización de quienes trabajan en municipio distinto al de residencia, confirma la anterior, que la población de las ciudades está saliendo a trabajar a otros municipios, mientras que las cifras por debajo de 0.5 (salen menos) se dan en la Periferia de la CR.

Mapa MC-A03-19 Coeficiente de Localización de población que trabaja en otro municipio, 2010



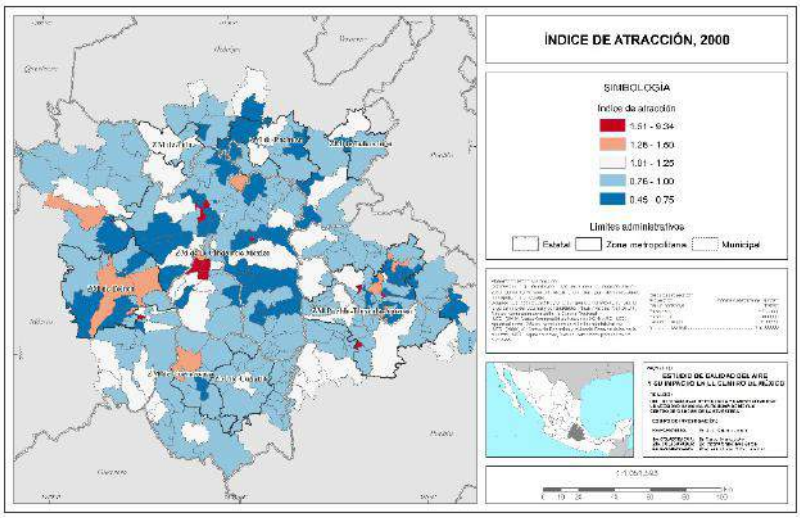
En el 2010, la tendencia anterior se acentuó en mayor medida en la población de la periferia conurbada de las ciudades principales salió a trabajar en un municipio distinto al de residencia, mientras que en la Periferia se tienen los coeficientes más bajos lo que indica que esa población trabaja en el mismo municipio de residencia.

Mapa MC-A03-20 Coeficiente de Localización del cambio de la población que trabaja en otro municipio 2000-2010



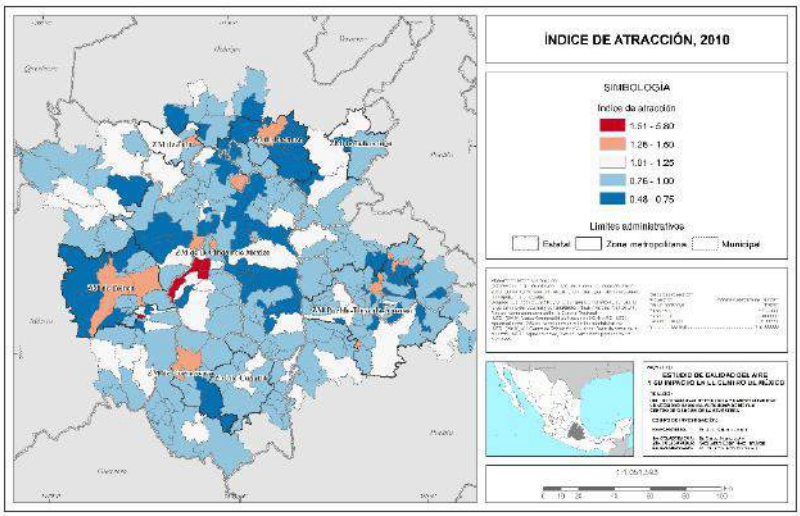
De manera general, el cambio del coeficiente en la CR está cercano a la media o por encima de la media, pocos son los municipios que tuvieron un cambio inferior a la media. Los cambios se acentuaron más en la ciudad de México donde se tuvieron cambios muy superiores a la media, por el contrario en Pachuca se tuvieron cambios muy inferiores a la media.

Mapa MC-A03-21 Índice de atracción, 2000



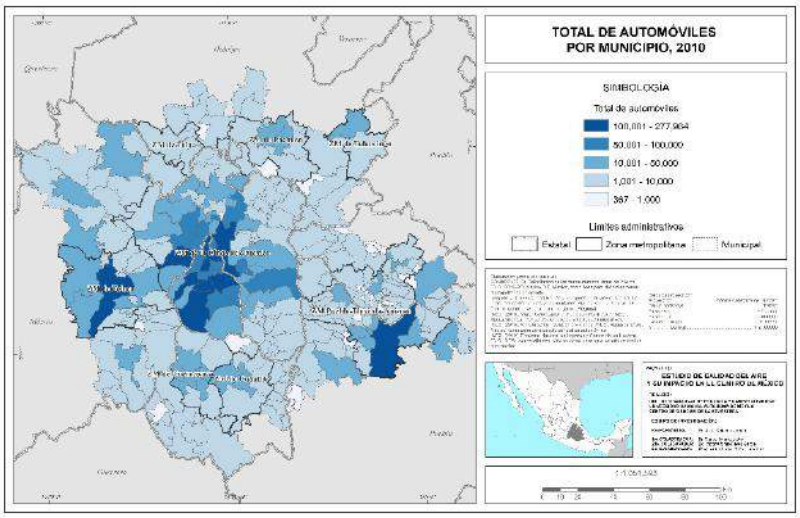
El Índice de Atracción indica según la escala que municipios tienen más flujos de llegada que de salida; los valores mayores a 1.5, mayor atracción que expulsión, se dan en la ZM de la ciudad de México y este patrón es similar en las distintas ciudades secundarias de la CR.

Mapa MC-A03-22 Índice atracción, 2010



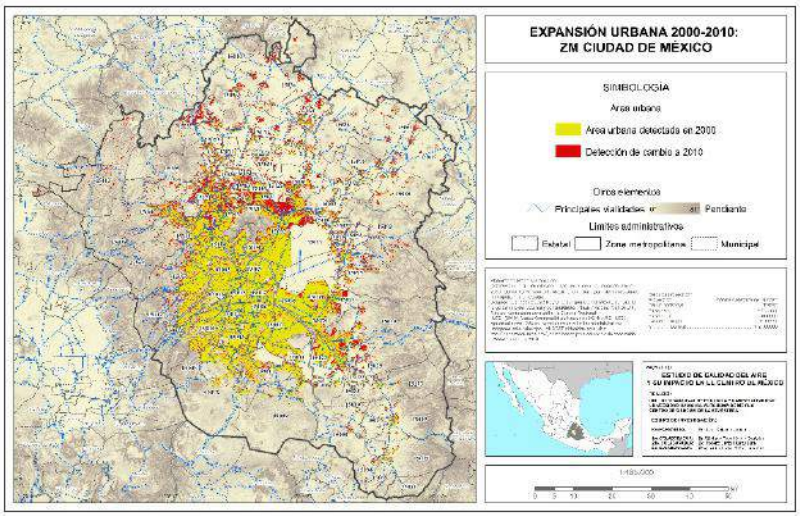
En 2010 los valores más altos del Índice de Atracción, arriba de 1.25, se concentraron en delegaciones del DF y en las capitales y ciudades principales de la CR, mientras que los valores más bajos se dieron en las áreas que las rodean. En la Periferia los valores fueron cercanos a uno lo que indica flujos similares de llegada y salida.

Mapa MC-A03-23 Automóviles totales por municipio, 2010



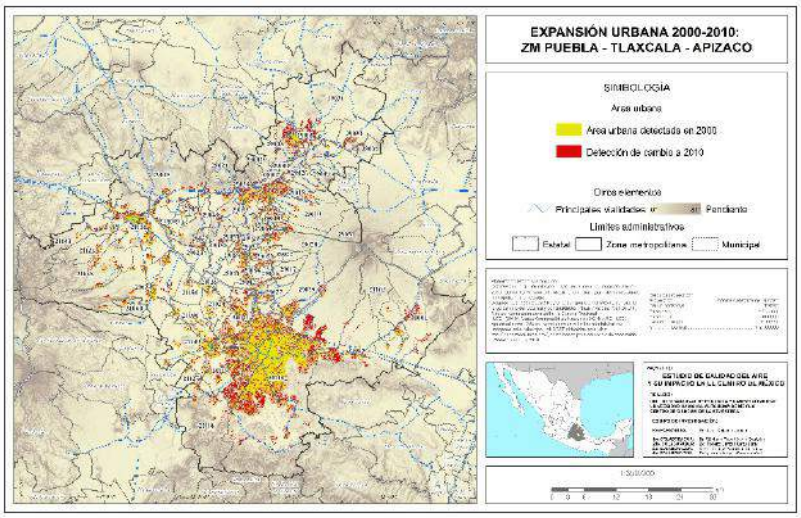
En términos absolutos, la mayor cantidad de automóviles está en la ZM de la ciudad de México, en particular, en el DF en donde se tienen más de 50 mil automóviles por delegación. El comportamiento general en la CR indica que se tienen menos de diez mil automóviles por municipio en las distintas ZM y la Periferia.

Mapa MC-A03-24 Expansión urbana en la ZM ciudad de México 2000 - 2010



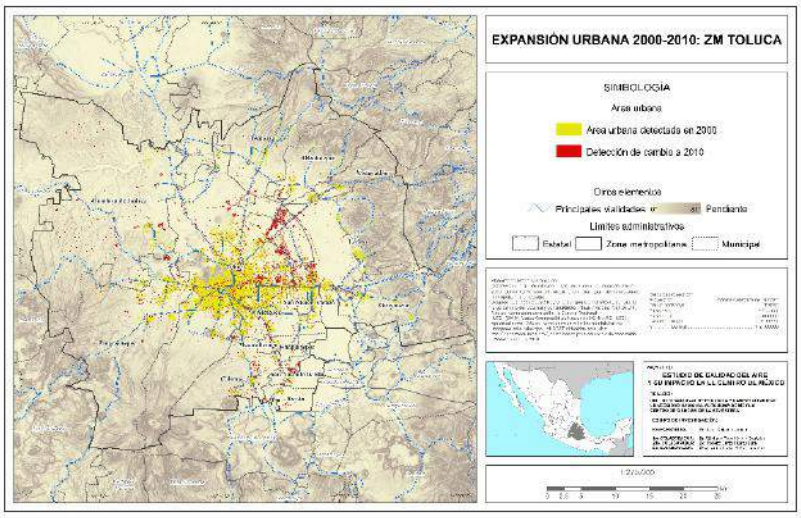
Las principales área de expansión del área urbana fueron hacia el norte y oriente de la ciudad, mientras que para el sur fue mínimo y nulo en algunas áreas del suroeste.

Mapa MC-A03-25 Expansión urbana en la ZM Puebla-Tlaxcala-Apizaco 2000 - 2010



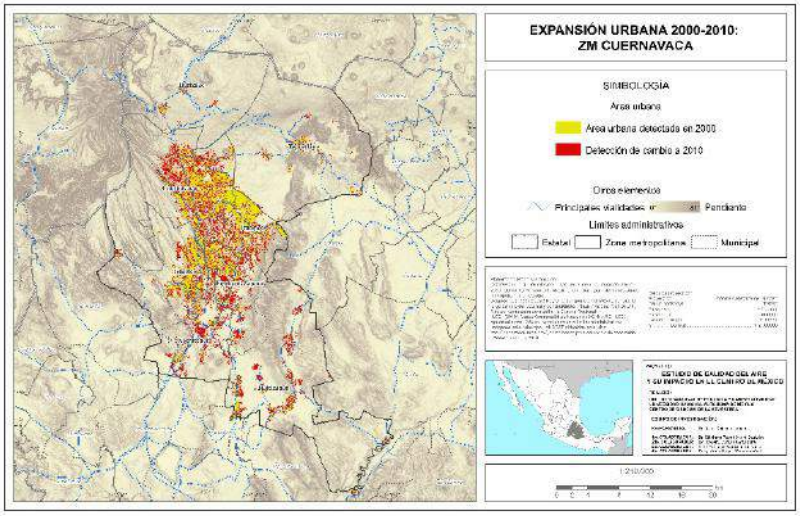
La ZM de Puebla-Tlaxcala-Apizaco se expandió alrededor de las tres ciudades principales, sobre el corredor sur-norte que las conecta y también sobre las carreteras, al oeste con la ciudad de México, al norte con la Ciudad de Tlaxcala, al este con Veracruz y al sureste con Oaxaca.

Mapa MC-A03-26 Expansión urbana en la ZM Toluca 2000-2010



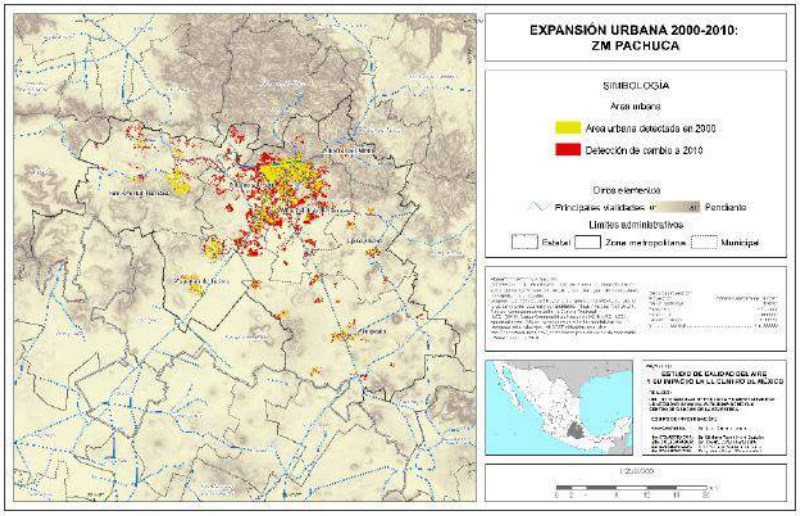
En la ZM de Toluca, la expansión urbana para 2010 con referencia en 2000 se dio principalmente en el municipio de Toluca hacia la porción este y noroeste, por lo que el crecimiento se está dando en los alrededores del centro de la ZM. Lo que es importante resaltar es que viendo a detalle el mapa, se observa que hacia el oeste y noroeste de la ZM empiezan a surgir puntos que indican cre4cimiento urbano o tal vez el surgimiento de puntos urbanos fuera del concentrado del centro de Toluca.

Mapa MC-A03-27 Expansión urbana en la ZM Cuernavaca 2000 - 2010



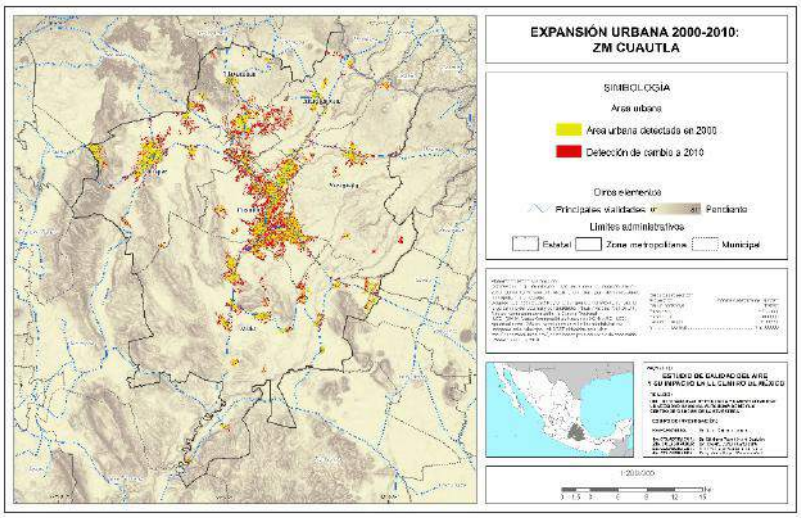
En esta ZM la dirección principal de la expansión fue alrededor del centro hacia el sur y sureste en colindancia con la ZM de Cuautla y hacia el noreste en dirección a la ciudad de México.

Mapa MC-A03-28 Expansión urbana en la ZM Pachuca 2000 - 2010



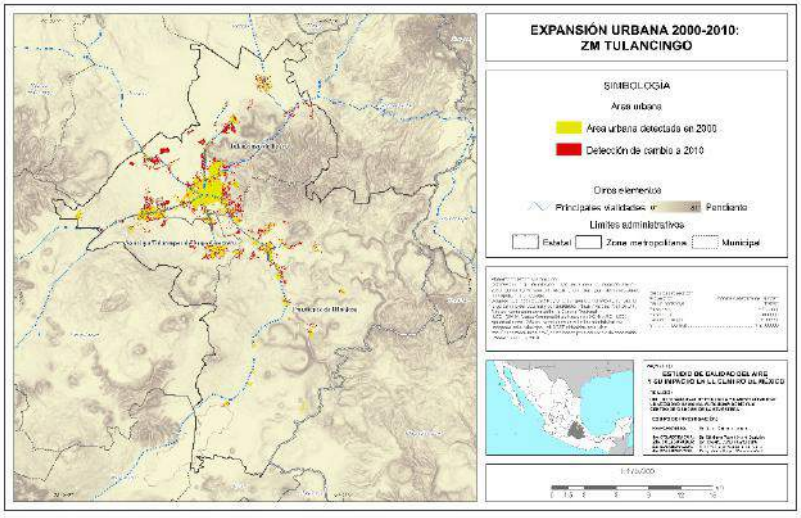
El crecimiento urbano detectado para 2010 en la ZM de Pachuca se presentó hacia el sur y suroeste en mayor medida, y una menor cantidad pero presente hacia el noroeste, hacia el noreste no se observa crecimiento esto en gran medida por la barrera que presenta la orografía de la zona, como se observa en el mapa se tienen fuertes pendientes que impiden o frenan en gran medida el crecimiento hacia ese lugar.

Mapa MC-A03-29 Expansión urbana en la ZM Cuautla 2000-2010



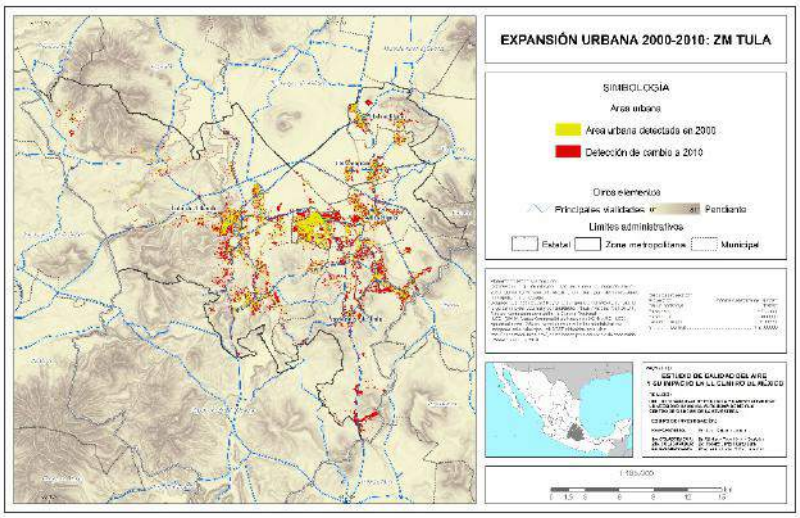
En la ZM de Cuautla la expansión urbana para 2010 se dio en los alrededores de las áreas urbanas ya existentes en 2000, el crecimiento se da hacia afuera en las áreas cercanas a los centros urbanos, se observan pocos crecimiento esporádicos o alejados de las ciudades de la ZM y aquellas nuevas áreas urbanas están ligadas al centro por las vías de comunicación como se observa en el mapa.

Mapa MC-A03-30 Expansión urbana en la ZM Tulancingo 2000-2010



El mayor cambio para 2010 en la ZM de Tulancingo se observa hacia el noroeste y oeste en áreas urbanas que poco a poco se hacen continúas con el centro de Tulancingo, las nuevas áreas urbanas que más crecieron para 2010 son las del lado noroeste que aún está separado del conglomerado urbano de Tulancingo.

Mapa MC-A03-31 Expansión urbana en la ZM Tula 2000-2010



En la ZM de Tula el crecimiento urbano se está dando alrededor de las áreas urbanas que ya existían en 2000, sobresaliendo en los municipios de Tula y Atitalaquia, en este último municipio en mayor medida, también sobresale el cambio o crecimiento que se dio y puede estarse dando hacia el Sur de la ZM en Atotonilco donde por lo que se muestra en el mapa de 2000 a 2010 surgieron nuevas áreas urbanas.

Apéndice municipal

NOMBRES Y CLAVES GEOESTADÍSTICAS

Clave municipal	Nombre del municipio
9002	Azcapotzalco
9003	Coyoacán
9004	Cuajimalpa de Morelos
9005	Gustavo A. Madero
9006	Iztacalco
9007	Iztapalapa
9008	La Magdalena Contreras
9009	Milpa Alta
9010	Álvaro Obregón
9011	Tláhuac
9012	Tlalpan
9013	Xochimilco
9014	Benito Juárez
9015	Cuauhtémoc
9016	Miguel Hidalgo
9017	Venustiano Carranza
13003	Actopan
13005	Ajacuba
13008	Apan
13009	El Arenal
13010	Atitalaquia
13013	Atotonilco de Tula
13016	Cuautepec de Hinojosa
13021	Emiliano Zapata
13022	Epazoyucan
13023	Francisco I. Madero
13039	Mineral del Monte
13041	Mixquiahuala de Juárez
13048	Pachuca de Soto
13050	Progreso de Obregón
13051	Mineral de la Reforma
13052	San Agustín Tlaxiaca
13056	Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero
13057	Singuilucan
13061	Tepeapulco
13063	Tepeji del Río de Ocampo
13065	Tetepango
13066	Villa de Tezontepec
13067	Tezontepec de Aldama
13069	Tizayuca
13070	Tlahuelilpan
13072	Tlanalapa
13074	Tlaxcoapan
13075	Tolcayuca
13076	Tula de Allende
13077	Tulancingo de Bravo
13082	Zapotlán de Juárez
13083	Zempoala
15001	Acambay

Clave municipal	Nombre del municipio
15002	Acolman
15005	Almoloya de Juárez
15006	Almoloya del Río
15009	Amecameca
15010	Apaxco
15011	Atenco
15012	Atizapán
15013	Atizapán de Zaragoza
15014	Atlacomulco
15015	Atlautla
15016	Axapusco
15017	Ayapango
15018	Calimaya
15019	Capulhuac
15020	Coacalco de Berriozábal
15022	Cocotitlán
15023	Coyotepec
15024	Cuautitlán
15025	Chalco
15026	Chapa de Mota
15027	Chapultepec
15028	Chiautla
15029	Chicoloapan
15030	Chiconcuac
15031	Chimalhuacán
15033	Ecatepec de Morelos
15034	Ecatzingo
15035	Huehuetoca
15036	Hueypoxtla
15037	Huixquilucan
15038	Isidro Fabela
15039	Ixtapaluca
15040	Ixtapan de la Sal
15042	Ixtlahuaca
15043	Xalatlaco
15044	Jaltenco
15045	Jilotepec
15046	Jilotzingo
15047	Jiquipilco
15048	Jocotitlán
15049	Joquicingo
15050	Juchitepec
15051	Lerma
15052	Malinalco
15053	Melchor Ocampo
15054	Metepec
15055	Mexicaltzingo
15056	Morelos
15057	Naucalpan de Juárez

Clave municipal	Nombre del municipio
15058	Nezahualcóyotl
15059	Nextlalpan
15060	Nicolás Romero
15061	Nopaltepec
15062	Ocoyoacac
15063	Ocuilan
15065	Otumba
15067	Otzolotepec
15068	Ozumba
15069	Papalotla
15070	La Paz
15072	Rayón
15073	San Antonio la Isla
15075	San Martín de las Pirámides
15076	San Mateo Atenco
15079	Soyaniquilpan de Juárez
15081	Tecámac
15083	Temamatla
15084	Temascalapa
15085	Temascalcingo
15087	Temoaya
15088	Tenancingo
15089	Tenango del Aire
15090	Tenango del Valle
15091	Teoloyucan
15092	Teotihuacán
15093	Tepetlaoxtoc
15094	Tepetlixpa
15095	Tepotzotlán
15096	Tequixquiac
15098	Texcalyacac
15099	Texcoco
15100	Tezoyuca
15101	Tianguistenco
15102	Timilpan
15103	Tlalmanalco
15104	Tlalnepantla de Baz
15106	Toluca
15107	Tonatico
15108	Tultepec
15109	Tultitlán
15112	Villa del Carbón
15113	Villa Guerrero
15115	Xonacatlán
15118	Zinacantepec
15119	Zumpahuacán
15120	Zumpango
15121	Cuautitlán Izcalli
15122	Valle de Chalco Solidaridad
15125	Tonanitla
17001	Amacuzac
17002	Atlatlahucan
17004	Ayala
17005	Coatlán del Río
17006	Cuautla
17007	Cuernavaca

Clave municipal	Nombre del municipio
17008	Emiliano Zapata
17009	Huitzilac
17010	Jantetelco
17011	Jiutepec
17012	Jojutla
17013	Jonacatepec
17014	Mazatepec
17015	Miacatlán
17016	Ocuituco
17017	Puente de Ixtla
17018	Temixco
17020	Tepoztlán
17021	Tetecala
17022	Tetela del Volcán
17023	Tlalnepantla
17024	Tlaltizapán
17025	Tlaquiltenango
17026	Tlayacapan
17027	Totolapan
17028	Xochitepec
17029	Yautepec
17030	Yecapixtla
17031	Zacatepec
17032	Zacualpan
17033	Temoac
21001	Acajete
21004	Acatzingo
21005	Acteopan
21015	Amozoc
21019	Atlixco
21022	Atzitzihuacán
21026	Calpan
21033	Cohuecan
21034	Coronango
21041	Cuautlancingo
21048	Chiautzingo
21060	Domingo Arenas
21074	Huejotzingo
21090	Juan C. Bonilla
21102	Nealtican
21104	Nopalucan
21106	Ocoyucan
21114	Puebla
21117	Rafael Lara Grajales
21119	San Andrés Cholula
21122	San Felipe Teotlalcingo
21125	San Gregorio Atzompa
21126	San Jerónimo Tecuanipan
21132	San Martín Texmelucan
21134	San Matías Tlalancaleca
21136	San Miguel Xoxtla
21138	San Nicolás de los Ranchos
21140	San Pedro Cholula
21143	San Salvador el Verde
21148	Santa Isabel Cholula
21163	Tepatlaxco de Hidalgo

Clave municipal	Nombre del municipio
21164	Tepeaca
21175	Tianguismanalco
21180	Tlahuapan
21181	Tlaltenango
21188	Tochimilco
29001	Amaxac de Guerrero
29002	Apetatitlán de Antonio Carvajal
29005	Apizaco
29006	Calpulalpan
29009	Cuaxomulco
29010	Chiautempan
29011	Muñoz de Domingo Arenas
29012	Españita
29013	Huamantla
29014	Hueyotlipan

Clave municipal	Nombre del municipio
29015	Ixtacuixtla de Mariano Matamoros
29016	Ixtenco
29017	Mazatecochco de José María Morelos
29018	Contla de Juan Cuamatzi
29019	Tepetitla de Lardizábal
29020	Sanctorum de Lázaro Cárdenas
29021	Nanacamilpa de Mariano Arista
29022	Acuamanala de Miguel Hidalgo
29023	Nativitas
29024	Panotla
29025	San Pablo del Monte
29026	Santa Cruz Tlaxcala
29027	Tenancingo
29028	Teolocholco

Apéndice metodológico

EXPANSIÓN URBANA

El incremento de la superficie urbana se calculó a partir de la superficie en hectáreas 2000 y 2010 medidas en archivos *shape* de las AGEB urbanas del Marco Geoestadístico Nacional. Estos *shapes* se rasterizaron en SIG con el fin de facilitar el cálculo, asignando un tamaño de celda de 100 por 100 metros (1 hectárea), una vez obtenidos los rasters, se realizó una resta de las superficies de 2010 y de 2000 con lo cual se obtuvieron tanto áreas que no presentaron ningún cambio como las áreas de crecimiento en el periodo referido, estas se reportaron para cada zona metropolitana y la periferia.

Estos datos se complementaron con los datos obtenidos por el procesamiento de imágenes de satélite mediante clasificación supervisada en el programa ENVI, posteriormente las áreas detectadas como áreas urbanas se exportaron a formato *shape* para su procesamiento en el SIG. Hay que aclarar que en este proceso, el programa Arc Map no logró excluir *elementos* que no son urbanos, por lo que el área urbana reportada puede variar en las siguientes entregas, en las que se pretende corregir éste problema.

En la tabla de atributos de los *shapes* creados se agregó una columna con la superficie en hectáreas de cada uno de los vectores que componen los shapes, con el fin de poder sumarlas y de esta forma obtener las superficies urbanas de las zonas metropolitanas.

Para ésta entrega se tienen los cálculos de las siguientes zonas metropolitanas:

CIUDADES PRINCIPALES

- Ciudad de México: 2000 y 2010 (se tienen diferencias en la cobertura de ambos *shapes*, dado que la imagen base para el *shape* del año 2010 no incluye a los municipios del extremo sureste de ésta zona metropolitana)
- Cuernavaca: 2000 y 2010
- Toluca: 2000 y 2010
- Puebla-Tlaxcala-Apizaco: 2000 y 2010

CIUDADES SECUNDARIAS

- Pachuca: 2000 y 2010 (no obstante, se tienen diferencias en la cobertura de ambos *shapes*, dado que la imagen base para el *shape* del año 2000 sólo abarca la zona más próxima a la ciudad de Pachuca)
- Cuautla: 2000 y 2010

A los dos resultados se les calculó la densidad de población, con base en la población total de las AGEB creadas en el periodo 2000 a 2010 que no fueran resultado de la división de una AGEB ya existente.

Cambio en la densidad de población

Se calculó a partir de la superficie en hectáreas de los archivos *shape* de AGEB urbanas del Marco Geoestadístico Nacional de 2000 y 2010, estos *shapes* se rasterizaron en SIG con el fin de facilitar el cálculo, asignando un tamaño de celda de 100 por 100 metros (1 hectárea), el valor asignado a cada uno de los pixeles correspondió al de la densidad de población del AGEB donde se localiza el pixel. Una vez obtenidos los rasters, se realizó una resta entre el raster de 2010 y el de 2000 con lo cual se obtuvieron los cambios en la densidad de población en el periodo referido, estos se representaron en un mapa.

Automóviles y automóviles per cápita

Se hizo con datos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2010 (ENIGH) y los datos ITER del Censo de Población y Vivienda 2010. La ENIGH no cuenta con datos para todos los municipios por lo que se tuvo que crear un factor para el cálculo de vehículos de cada municipio. De la ENIGH se obtuvieron los datos de vehículos por hogar (automóviles, camiones cerradas o con cabina y camionetas con caja) y los factores para obtener el total de vehículos por estado. Del censo de población se obtuvo el total de viviendas por estado y por municipio. El factor para cada estado fue resultado de la dividir total de vehículos entre viviendas por estado. Los vehículos por municipio se dio al multiplicar número de viviendas por municipios con el factor para cada estado y para los vehículos per cápita se tomo de referencia la población para cada municipio de los censos de población y vivienda. Ambos cálculos fueron mapeados.

Actividades económicas

Se cálculo de los Censos Económicos 1999 y 2009, las variables utilizadas fueron el Personal Ocupado Total, Unidades Económicas y Valor Agregado Censal Bruto, agregadas por estado y municipio. A partir de esos datos se calculo para cada variable el total de cada año y los cambios absolutos y porcentuales en cada Zona Metropolitana y la Periferia. Los coeficientes de localización de cambio del personal ocupado total se hicieron a nivel municipal para ser mapeado.

Índice de atracción

Se utilizaron los microdatos de los censos de población y vivienda de 2000 y 2010 que muestran, para cada registro, el municipio de residencia y el

municipio de trabajo. A partir de estos datos se construyeron 2 matrices de origen y destino para cada año censal, de los flujos detectados se eliminaron aquellos cuyo destino se encontrara fuera de los municipios que conforman la corona regional. Posteriormente se agrupó el total de flujos que llegan (destino) o salen (origen) de cada uno de los municipios, por último, el índice de atracción se obtuvo con la división de los viajes que reciben los municipios sobre los que salen de estos. Se elaboraron mapas con el índice de atracción para el año 2000, 2010 y el cambio en el periodo.

Personas que trabajan en otro municipio

Se utilizaron los microdatos de los censos de población y vivienda de 2000 y 2010 que muestran, para cada registro, el municipio de residencia y el municipio de trabajo. Se integró una base de datos con el total de población que reportó un municipio de trabajo para cada uno de los municipios de la corona regional, así como con la cantidad de esta población cuyo lugar de trabajo fuese distinto al municipio de residencia. Se elaboraron mapas con el porcentaje de población que trabaja en otro municipio para los años 2000, 2010 y el cambio en el periodo, así como del coeficiente de localización de esta población para los mismos años.

Flujos de trabajo

Se utilizaron los microdatos de los censos de población y vivienda de 2000 y 2010 que muestran, para cada registro, el municipio de residencia y el municipio de trabajo. A partir de dichas bases, se agregaron los factores de expansión para las 71289 combinaciones posibles de orígenes y destinos. De éstas, 70756 muestran al menos un flujo en al menos uno de los dos periodos censales.

Para cada par municipal se calculó la distancia por carretera utilizando la red de transporte 1:1,000,000 de INEGI con las coordenadas de las cabeceras municipales como orígenes y destinos únicos dentro de cada municipio. Con estos datos se calcularon las distancias promedio de recorrido para cada municipio de origen como ponderando la distancia a los destinos por el número de flujos. Para fines descriptivos se agregaron los datos a nivel de zona metropolitana.

Grado de consolidación urbano regional (GCUR)

El GCUR se calculó para 2000 y 2010 en todos los municipios de la Corona Regional.

- Primero se sistematizaron las bases de datos con las variables necesarias para calcular los indicadores, los datos fueron extraídos de los Censos de Población y Vivienda 2000 y 2010, los Censos Económicos 1999 y 2009 y el Censo Agropecuario 2007.
- Después se estimaron los indicadores, cuyo cálculo se explica en la Memoria de Cálculo.
- Los indicadores fueron estandarizados mediante la fórmula :

$$\mathbf{Z} = \frac{(\mathbf{Xi} - \bar{\mathbf{X}})}{\boldsymbol{\sigma}}$$

- Con los nueve indicadores se realizó un Análisis por Componentes Principales, de donde se obtuvieron las puntuaciones (*score*) para cada uno de ellos.
- Lo siguiente fue diseñar una Matriz de Correlación entre los indicadores y los componentes para identificar los componentes y variables que coinciden con las características esperadas de los diferentes espacios (urbano, rural, perirubano) de acuerdo con la teoría.
- De igual forma se calculó una Matriz de Distancia con base en un método de medición "Euclidiana" a partir de las puntuaciones de los componentes.
- Con la matriz de distancia se hizo un análisis de Conglomerados Jerarquizados (método "Ward"), mismos que se agruparon (técnica de Corte de Árbol) para obtener el GCUR lo cual arroja cinco categorías de conglomerados. A partir de de esos resultados se calcularon las medias de cada uno de los indicadores para saber su importancia respecto a los demás y así identificarlo. Los resultados fueron mapeados por municipio y para cada año.

INDICADORES DEL GCUR

DENSIDAD DE POBLACIÓN

$$DP = \frac{PT}{S(Km^2)}$$

PT= Población Total del municipio

S= Superficie en kilómetros cuadrados.

NIVEL DE URBANIZACIÓN

$$\boldsymbol{NU = \frac{0.5\,(P > 5000 + P > 15000)}{PT} * 100}$$

P>5000= Población del municipio que reside en localidades de más de 5 mil habitantes.

P>15000= Población del municipio que reside en localidades de más de 5 mil habitantes.

PT= Población Total del municipio

PORCENTAJE DE POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA (PEA) NO AGRÍCOLA

$$\%\boldsymbol{PEA = \frac{PEA_{Ssec} + PEA_{Ster}}{PEA_{12\ y\ más}}}$$

PEA_{Ssec}= Población Económicamente Activa del municipio ocupada en el sector secundario.

PEA_{Ster}= Población Económicamente Activa del municipio ocupada en el sector terciario.

$PEA_{12\ y\ más}$= Población económicamente activa ocupada del municipio de 12 años y más.

DISTANCIA DE LA CABECERA DEL MUNICIPIO A LA CABECERA MUNICIPAL PRINCIPAL DE LA ZONA METROPOLITANA MÁS CERCANA

La distancia fue calculada en sistema de información geográfica, ArcView SIG con base en las coordenadas municipales dadas por INEGI en el Marco Geo-estadistico Nacional.

COEFICIENTE DE LOCALIZACIÓN DEL SECTOR INDUSTRIAL

$$CLI = \frac{PEA\ Ind_{mun}/PEA\ Ind_{reg}}{PEA_{mun\ 12\ y\ más}/PEA_{reg\ 12\ y\ más}}$$

PEA Indmun= Población Económicamente Activa municipal ocupada en los sectores electricidad y agua, construcción y manufacturas.
PEA Indreg= Población Económicamente Activa de la región ocupada en los sectores electricidad y agua, construcción y manufacturas.
PEAmun 12 y más= Población económicamente activa ocupada del municipio de 12 años y más.
PEAreg 12 y más= Población económicamente activa ocupada de la región de 12 años y más.

ÍNDICE DE DISPERSIÓN

$$ID = \frac{P < 5000 * L < 5000}{PT}$$

P<5000= Población del municipio que reside en localidades de menos de 5 mil habitantes.
L<5000= Número de localidades en el municipio con menos de 5 mil habitantes.

INTENSIDAD DE USO DE TIERRA AGRÍCOLA

$$IUTA = \frac{SAR}{SAT} * 100$$

SAR= Superficie agrícola bajo labor de riego del municipio.
SAT= Superficie agrícola total del municipio.

INDUSTRIALIZACIÓN RURAL

$$IR = \frac{PEA\ Man_{mun}/PEA\ Man_{reg}}{PEA_{mun\ 12\ y\ más}/PEA_{reg\ 12\ y\ más}}$$

PEA Man_{mun}= Población Económicamente Activa municipal ocupada en el sector manufacturas.
PEA Man_{reg}= Población Económicamente Activa de la región ocupada en el sector manufacturas.
$PEA_{mun\ 12\ y\ más}$= Población económicamente activa ocupada del municipio de 12 años y más.
$PEA_{reg\ 12\ y\ más}$= Población económicamente activa ocupada de la región de 12 años y más.

MIGRACIÓN INDIRECTA[11]

$$MI = D_{70-00}/PF * 100$$
$$D_{70-00=(P_F - P_E)}$$
$$P_{E=(P_I)*\left(\frac{T_{70-00}}{100+1}\right)^{30}}$$
$$TC = (P_F/P_I)^{1/30} - 1 * 100$$

$D_{70\text{-}00}$= Diferencia de población en el municipio en el periodo 1970-2000.
P_F= Población total del municipio en el año final del periodo o población total del municipio en 2000.
P_E= Población esperada.
P_I= Población total del municipio en el año inicial del periodo o población total del municipio en 1970.
$T_{70\text{-}00}$= Tasa de crecimiento nacional 1970-2000.

$$MI = D_{70-10}/PF * 100$$
$$D_{70-10=(P_F - P_E)}$$
$$P_{E=(P_I)*\left(\frac{T_{70-10}}{100+1}\right)^{40}}$$
$$TC = (P_F/P_I)^{1/40} - 1 * 100$$

$D_{70\text{-}10}$= Diferencia de población en el municipio en el periodo 1970-2001.
P_F= Población total del municipio en el año final del periodo o población total del municipio en 2010.
P_E= Población esperada.
P_I= Población total del municipio en el año inicial del periodo o población total del municipio en 1970.
$T_{70\text{-}10}$= Tasa de crecimiento nacional 1970-2010.

Escenarios de expansión urbana

La metodología seguida en este apartado modifica la publicada por Suarez y Delgado (2007) en la que se predijo la expansión urbana en la ZMCM al año 2020 con base en diferentes supuestos de densidad poblacional, estudio a su vez basado en el de Landis y Reilly (2003) de pronóstico de crecimiento urbano en el estado de California al año 2010. Las modificaciones realizadas se derivan de la disponibilidad de insumos con mayor nivel de agregación con que no se contaban en el tiempo de elaboración del estudio base.

(Las tablas están distribuidas en el texto principal de este anexo 3.)

[11] Se ponen las fórmulas para el cálculo de la Migración Indirecta de ambos periodos en estudio.

Anexo 4 Calidad aerobiológica del aire

Resumen

Se determinaron los principales alérgenos polínicos del aire de las estaciones de los estados de México, Morelos y Puebla, sus concentraciones y su variación a lo largo del tiempo monitoreado. Se elaboraron con mayor resolución y de manera más específica los mapas de vegetación predominante de la Corona Regional del Centro de México, con base en la información presentada en la Serie IV de Uso del Suelo y Vegetación, actualizada con imágenes del satélite LANDSAT del año 2011 y con información de inventarios o registros de la vegetación local de cada zona. Con la información generada se hicieron asociaciones entre los tipos aeropolínicos y los tipos de vegetación predominantes. Asimismo, se encuentra en proceso el manejo de las variables atmosféricas como magnitudes y dirección del viento que permitan trazar las posibles trayectorias de transporte de los granos de polen a través del aire dentro y fuera de las cuencas.

Palabras clave: partículas biológicas en el aire, calidad del aire, aeroalérgenos, granos de polen, contaminación biológica, salud.

4.1 Introducción

El estado de salud de un ecosistema puede determinarse por la cantidad y la calidad de la carga atmosférica generada por él mismo y por aquella que proviene de zonas más lejanas, para lo cual es necesario conocer las partículas biológicas a las que estamos expuestos, las cuales pueden ocasionar daños tanto a la salud de la población como a la del entorno.

Dentro de las partículas suspendidas en la atmósfera se encuentran las originadas de forma natural como son los granos de polen, que forman parte del proceso reproductivo de angiospermas y gimnospermas (de Weerd *et al*, 2002). Los pólenes constituyen una de las fuentes principales de alérgenos en el aire y una causa significativa de enfermedades alérgicas como el asma y la rinitis estacional, que afectan aproximadamente entre el 20% y el 30% de la población en ciudades industrializadas, producto de una respuesta de hipersensibilidad inmediata a componentes inocuos en el ambiente (Zuk *et al*., 2007).

Determinar la prevalencia de los diversos tipos polínicos en la atmósfera a través del monitoreo continuo de granos de polen liberados y transportados en la atmósfera de manera local o regional permite identificar sus variaciones estacionales, intradiarias e intra-anuales, a lo largo del tiempo, lo que apoya al sector público y al sector salud para que se tomen las medidas de prevención y control de enfermedades respiratorias causadas por la exposición a aeroalérgenos. Además, de la posibilidad de evaluar a los pólenes como bioindicadores de contaminación ambiental, ya que pueden acarrear en su exina partículas de tipo inorgánico, lo que puede potencializar sus efectos en la salud al ser inhalados por la población sensible. Asimismo, la generación de bases de datos de manera permanente permitirá a los 10 años de monitoreo continuo, determinar el posible efecto del cambio climático sobre la floración de las plantas y la alteración de la biodiversidad de las especies de cada lugar.

La dispersión de aeropartículas presentes en la atmósfera a través del viento, transporta a los aeroalérgenos polínicos de una región a otra, por lo cual los individuos quedan expuestos a aeroalérgenos locales o provenientes de zonas más lejanas. Por lo anterior, es importante determinar la calidad biológica del aire de los diferentes Estados de la República Mexicana, con el fin de contribuirá a generar información sobre el tipo y concentración de pólenes en el aire de cada región.

4.2 Objetivo general

Determinar la calidad biológica del aire en la Corona Regional del Centro de México (CRCM), mediante el monitoreo de granos de polen del aire de las cuencas de los Estados de México (Toluca), Morelos y Puebla que permitan caracterizar los principales aeroalérgenos polínicos, sus fuentes de origen y sus trayectorias de transporte a través de la atmósfera dentro y fuera de las cuencas.

4.3 Áreas de estudio

El monitoreo de granos de polen en este estudio se lleva a cabo en las cuencas del Estado de México, Morelos y Puebla (**Figura A04-1**).

Figura A04-1 *Ubicación de las estaciones de muestreo aerobiológico en la Corona Regional del Centro de México. Toluca (Localización: 19°18'24.35"N, 99°37'47.68"O), Morelos (Localización: 18°58'50.48"N, 99°14'7.68"O) y Puebla (Localización: 19° 1'52.21.21"N, 98°14'28.88"O).*

4.4 Método de monitoreo

Para determinar la variación en tiempo y espacio de los principales alérgenos polínicos presentes en el aire, se lleva a cabo de manera permanente el muestreo de granos de polen dispersos en la atmósfera con la Trampa de esporas tipo Hirst (TEH; Burkard Manufacturing, UK) (**Figura A04-2**).

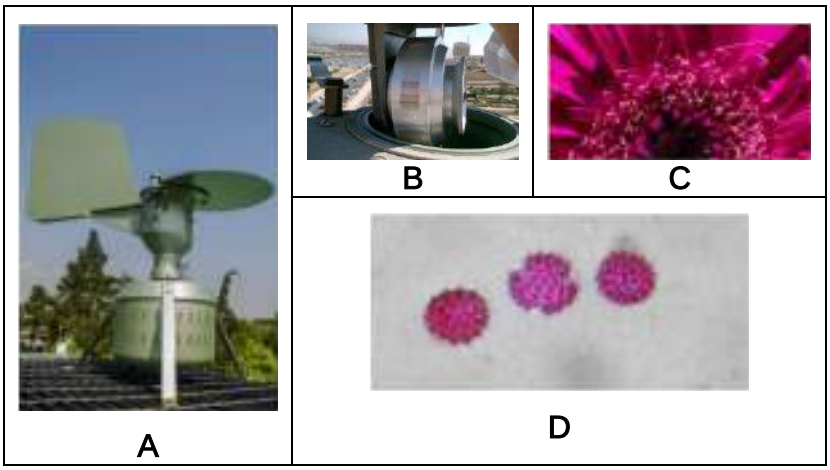


Figura A04-2 *A) Trampa de esporas tipo Hirst; B) Cinta con aeropartículas muestreadas; C) Flor con polen; D) granos de polen colectados del aire.*

4.5 Resultados

4.5.1 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CRCM

En la **Figura A04-3** se muestra el mapa sobre el uso de suelo y la cobertura vegetal para la crcm. Esta capa se generó durante el periodo 2011-2012 y se derivó con base en la información presentada en la Serie IV de Uso del Suelo y Vegetación, actualizada con imágenes del satélite LANDSAT del año 2011.

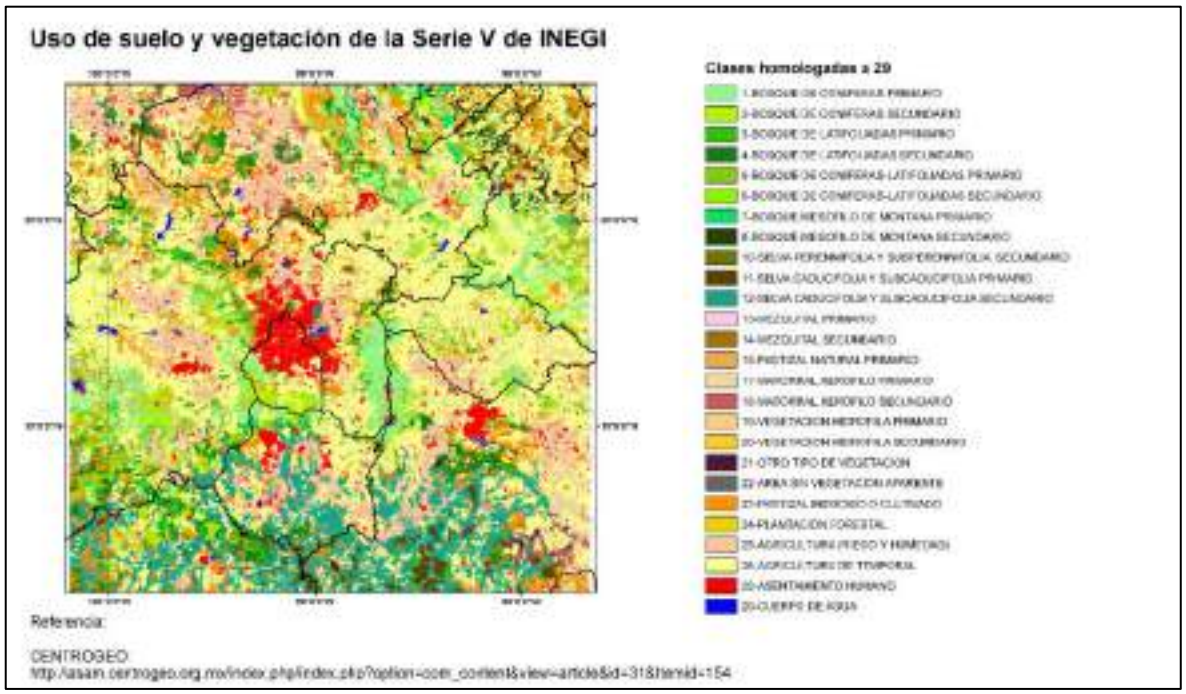


Figura A04-3 *Tipo de Vegetación en la CRCM, mostrando la vegetación de las cuencas de Toluca, Morelos y Puebla.*

Asimismo, se continúa con el registro de la vegetación local, en donde quedaron establecidas cada estación de monitoreo aerobiológico en los Estados de México, Morelos y Puebla. Los tipos predominantes de vegetación en la CRCM se muestran en los mapas que se incluyen en el **Apéndice 1.** De manera general la vegetación se describe como sigue:

Estado de México; superficie 22, 256.6 km²
Tipos predominantes de vegetación: bosque de coníferas templado; bosque de latifoliadas perennifolio tropical; bosque de latifoliadas caducifolio tropical y templado; bosque mixto; pastizal; suelo agrícola, y arbolado urbano.

Estado de Morelos; superficie 4,859.4 km²
Tipos predominantes de vegetación: bosque de coníferas; bosque de latifoliadas caducifolio o tropical o subtropical; bosque de latifoliadas caducifolio templado; pastizal; suelo agrícola, y arbolado urbano.

Estado de Puebla; superficie 34,152.1 km²
Tipos predominantes de vegetación: bosque de coníferas; bosque de latifoliadas caducifolio o tropical o subtropical; matorral; suelo agrícola, y arbolado urbano.

El porcentaje de los principales tipos de vegetación, según los pólenes colectados de la atmósfera de las cuencas monitoreadas, se muestran en la **Figura A04-4**.

Figura A04-4 *Porcentaje de tipos de vegetación, según los pólenes colectados de la atmósfera de Toluca, Méx. (jun. 2014-mar. 2015); Cuernavaca, Mor. (sep. 2014-mar. 2015), y Puebla, Pue. (ene.-mar. 2015).*

En las tres cuencas monitoreadas se observó que el porcentaje mayor de pólenes colectados del aire lo obtuvieron aquellos provenientes de árboles, seguidos por los de herbáceas, aun tomando en cuenta la diferencia en los tiempos de muestreo en los que éstos se realizaron.

En Toluca se contabilizaron un total de 15,672 granos de polen por m^3 (gp/m^3) de aire durante los 11 meses de muestreo; en Cuernavaca un total de 7,536 gp/m^3 de aire en 7 meses de muestreo; y en Puebla 2,771 gp/m^3 de aire en los tres meses de monitoreo.

La composición de los principales tipos polínicos colectados e identificados en el aire de cada región de la CRCM se muestra en la **Tabla A04-1.**

Tabla A04-1 Tipos polínicos identificados en muestras de aire en la CRCM

(Presencia, verde; ausencia, rojo)			
Tipo polínico	**Toluca (10 meses)**	**Cuernavaca (7 meses)**	**Puebla (3 meses)**
Acer			
Acacia			
Alnus			
Amaranthaceae			
Ambrosia			
Apiaceae			
Artemisia			
Asteraceae			
Begonia			
Brassicaceae			
Buddleia			
Cecropia			
Carya			
Casuarina			
Castanea			
Celtis			
Corylus			
Citrus			
Cyperaceae			
Cupressaceae			
Ericaceae			
Fagus			
Ficus			
Fraxinus			
Grevillea			
Lamiaceae			
Jacaranda			
Juglans			
Liliaceae			
Ligustrum			

(Presencia, verde; ausencia, rojo)			
Tipo polínico	**Toluca (10 meses)**	**Cuernavaca (7 meses)**	**Puebla (3 meses)**
Liquidambar			
Moraceae			
Myrtaceae			
Olea			
Onagraceae			
Passiflora			
Palmae			
Pinus			
Plantago			
Platanus			
Poaceae			
Populus			
Prosopis			
Quercus			
Ricinus			
Rosaceae			
Rumex			
Salix			
Sapindaceae			
Schinus			
Solanaceae			
Tamarix			
Tilia			
Thypha			
Ulmus			
Urticaceae			
Wigandia			
Indeterminados			
Total	**48**	**47**	**33**

En las tres ciudades monitoreadas se determinaron que los diversos tipos polínicos registrados fueron similares, a pesar de la diferencia en meses de muestreo y de que aún no se cumple un ciclo anual de monitoreo, con el

que se podrá determinar la presencia de la diversidad de pólenes dependiendo de la época del año, las condiciones ambientales prevalecientes (secas y lluvias), y la vegetación predominante. A pesar de que en Puebla se ha monitoreado solo durante tres meses, la diversidad de tipos polínicos colectados con respecto a los registrados en Toluca y Cuernavaca fue de un 68.8%.

La variación estacional de la concentración de granos de polen totales en el aire de las CRCM se muestra en la **Figura A04-5**.

En Toluca, se observaron concentraciones bajas de polen durante la época de lluvias (junio a octubre) sin embargo, se observó una clara tendencia hacia la alza conforme disminuyó la intensidad de las lluvias, incrementándose las concentraciones a partir del mes de noviembre y diciembre de 2014, y enero de 2015, Asimismo, en Cuernavaca se registraron concentraciones bajas de polen, incrementándose hacia los meses de diciembre (54 gp/m^3 de aire) a marzo, con picos máximos en enero (330 gp/m^3 de aire) y febrero (202 gp/m^3 de aire) de 2015. En la atmósfera de la Ciudad de Puebla, a pesar de la diversidad de tipos polínicos registrados con respecto a las otras cuencas, las concentraciones fueron menores de 100 gp/m^3 de aire alcanzando un máximo de 136 gp/m^3 de aire.

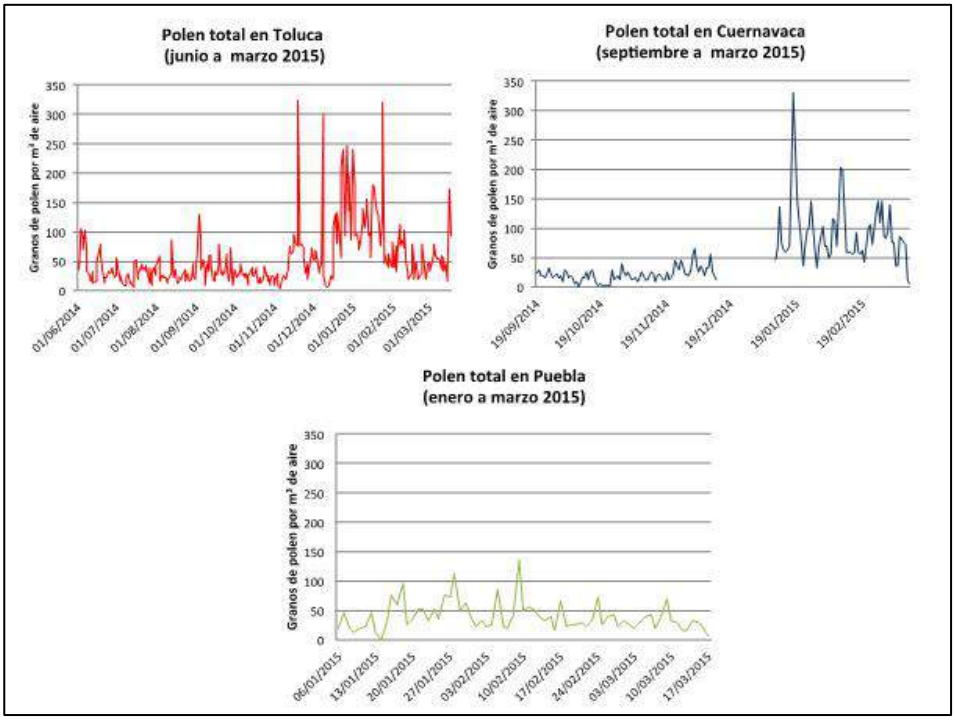


Figura A04-5 *Variación estacional de la concentración de granos de polen totales en la atmósfera de las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Puebla.*

En la **Figura A04-6** se muestran las concentraciones de pólenes para las tres ciudades de la CRCM monitoreadas, provenientes de árboles, los cuales

son los responsables de los valores máximos totales representados en la gráfica de los pólenes totales.

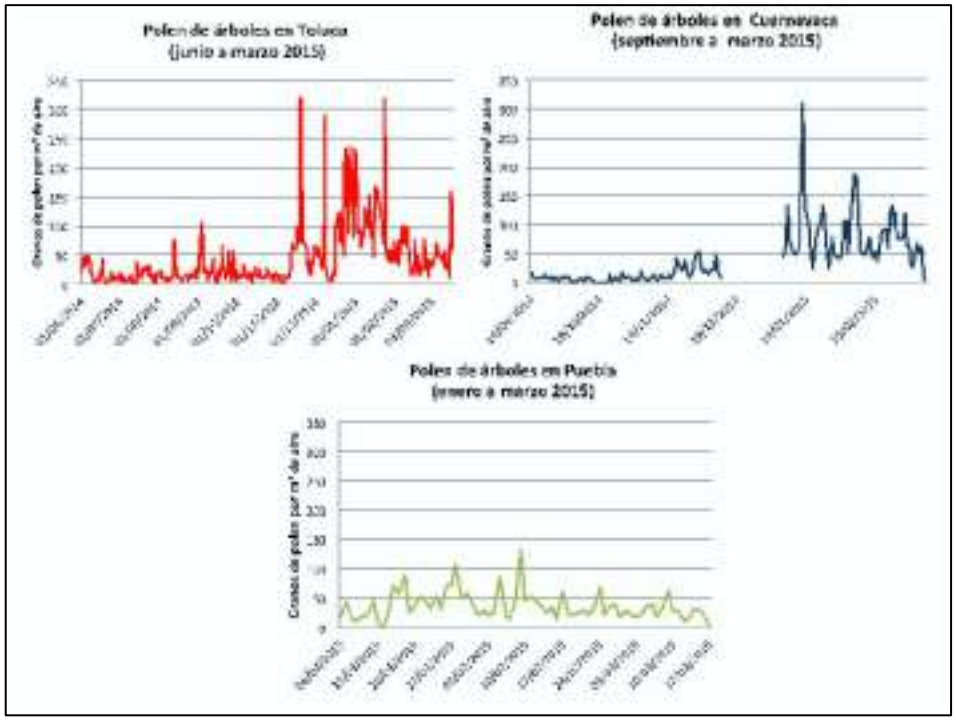


Figura A04-6 *Variación estacional de la concentración de granos de polen de árboles en la atmósfera de las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Puebla.*

El comportamiento descrito para el total de pólenes colectados del aire, es dado por los pólenes provenientes de los árboles para las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Morelos.

En la **Figura A04-7** se muestran las concentraciones de pólenes para las tres ciudades de la CRCM monitoreadas, provenientes de herbáceas, las cuales incluyen a los pólenes provenientes de pastos y malezas.

En Toluca, las máximas concentraciones de polen de herbáceas estuvieron asociadas principalmente, a la época de lluvias, alcanzando concentraciones mayores de junio a septiembre de 2014, con un máximo el 3 de junio de 58 gp/m^3 de aire posteriormente, hacia la época seca disminuyó la concentración de los pólenes, aunque en enero de 2015 se registró una concentración de 24 gp/m^3 de aire. En Cuernavaca no se observó ninguna variación marcada durante el muestreo de septiembre a marzo (lluvias y secas) y las concentraciones registradas fueron menores a 28 gp/m^3 de aire. Mientras que en Puebla el número de pólenes registrados durante los meses de enero a marzo (secas), fueron valores menores a 5 gp/m^3 de aire. Es necesario continuar el monitoreo en todos los estados para poder determinar la variación de los pólenes de herbáceas a lo largo del año.

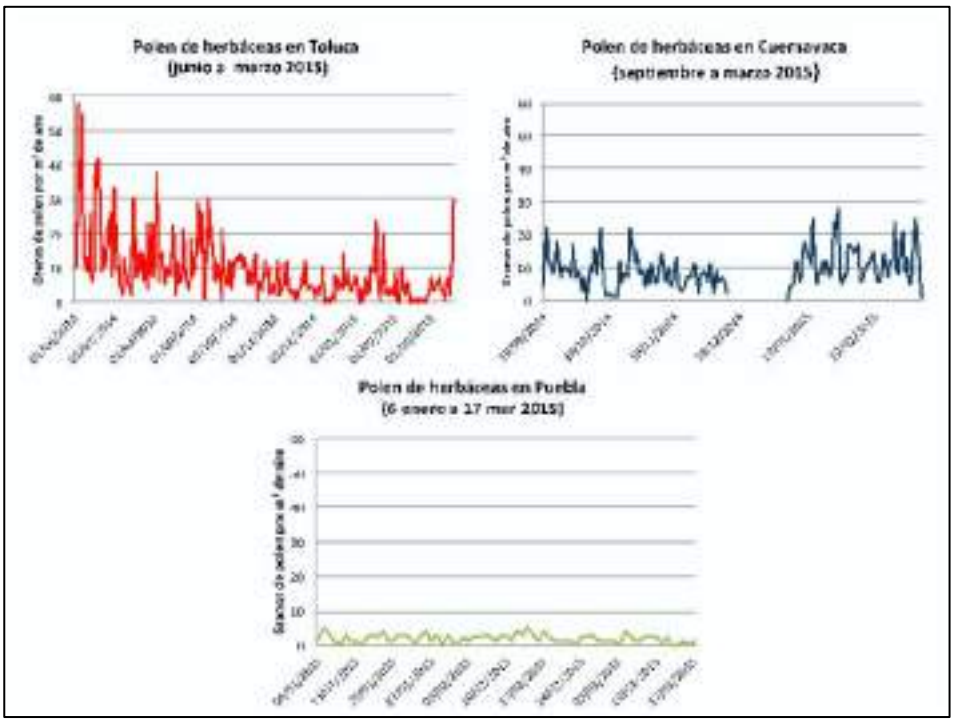


Figura A04-7 *Variación estacional de la concentración de granos de polen de herbáceas en la atmósfera de las cuencas de Toluca, Cuernavaca y Puebla.*

En la Tabla A04-2 se muestra el porcentaje de los tipos polínicos más abundantes colectados del aire de Toluca, Cuernavaca y Puebla.

Tabla A04-2 Porcentajes de los tipos polínicos más abundantes colectados de las ciudades de Toluca, Cuernavaca y Puebla.

Tipo polínico	Toluca %	Cuernavaca %	Puebla %
Cupressaceae*	50.43	21.48	49.36
Alnus*	9.94	11.73	21.98
Quercus*	4.15	5.04	1.11
Fraxinus*	3.45	19.26	18.05
Casuarina**	1.82	5.98	2.19
Tipo Pino	1.12	1.57	2.07
Urticaceae*	12.33	3.72	<1
Poaceae*	4.92	10.98	<1
Amaranthaceae*	1.23	2.7	<1
Asteraceae*	1.27	2.01	<1
Ricinus*	<1	3.11	<1
Solanaceae	<1	2.05	<1

* Altamente alergénicos; ** Moderadamente alergénicos

El mayor porcentaje de pólenes registrados en Toluca, correspondió al de árboles de la familia Cupressaceae (50.43%), seguidos por los de *Alnus* (9.94%), mientras que los principales pólenes de herbáceas correspondieron a la familia Urticaceae (12.33%), seguidos por los de la familia Poaceae.

En Cuernavaca los pólenes de árboles más abundantes fueron los de la familia Cupressaceae (50.43%), seguido por los de *Alnus* (11.73%) y los de

Fraxinus (19.26%), mientras que los más representativos de las herbáceas fueron los de la familia Poaceae (10.98%).

En la ciudad de Puebla los pólenes de árboles más abundantes también fueron los de la familia Cupressaceae (49.36%), seguido por *Alnus* (121.98%) y *Fraxinus* (18.05%), mientras que los pólenes de herbáceas registraron valores por debajo del 1%.

Los 10 tipos polínicos más abundantes colectados la atmósfera de las tres cuencas de la CRCM, están reportados como altamente alergénicos.

Los tipos polínicos presentes en la atmósfera de la ciudad de Toluca, provienen de la vegetación, tanto de la ciudad como de sus alrededores, en donde se encuentran bosques de coníferas, cupresáceas, latifolias (Quercus-encinos), pinos, bosques mesófilos de montaña (ailes), vegetación urbana (*Salix*, *Casuarina,* Myrtaceae, *Fraxinus, Alnus*), así como de pastizales y de zonas agrícolas (Poaceae y Urticaceae, Compositae) (Fig. 4.8).

Los tipos polínicos presentes en la atmósfera de la ciudad de Cuernavaca provienen de la vegetación, tanto de la ciudad como de sus alrededores, en donde se encuentran bosques de latifolias (encinos) y selva caducifolia (*Quercus, Acacia*, otras), bosques de Coníferas, Cupressaceae, *Pinus* y vegetación urbana (Salix, *Casuarina, Fraxinus,* Myrtaceae, *Shinus*), así como de pastos (Poaceae y Uricaceae) provenientes de pastizales y de zonas agrícolas (Fig. 4.9).

Los tipos polínicos registrados en la ciudad de Puebla provienen de bosques de coníferas como Cupressaceae y *Pinus*, de bosques mesófilos de montaña (*Alnus*) y del arbolado urbano, *Fraxinus* y Casuarina, principalmente (Fig. 4.10).

4.5.2 INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE MÉXICO

Representan a la vegetación del Estado de México tres ecosistemas: templado-frío (bosques), semicálido y cálido subhúmedo (selvas bajas caducifolias) y zonas áridas (áridas y semiáridas). De acuerdo con el Inventario Forestal Periódico del Estado de México de 1994, de las 894,613 hectáreas con superficie forestal, se pueden encontrar las siguientes comunidades (**Figura A04-8**):

Bosques de coníferas

El bosque de pino, (80,808 ha) tiene una presencia mayor de 80% de árboles de pino, con especies de mayor valor económico por su aprovechamiento con fines maderables como: *Pinus douglassiana, P. michoacana, P. montezumae, P. pseudostrobus y P. teocote*. Se localiza principalmente en las regiones montañosas del estado, en climas donde la temperatura media anual fluctúa entre 10 y 18 °C y en altitudes entre 2600 y 2800 metros sobre el nivel del mar.

El bosque de pino-encino (209,238 ha) comprende las comunidades mezcladas de los géneros *Pinus y Quercus* (Latifolias) en proporción diversa; se distribuye en áreas cuyas altitudes son similares a las de bosque de pino en la entidad.

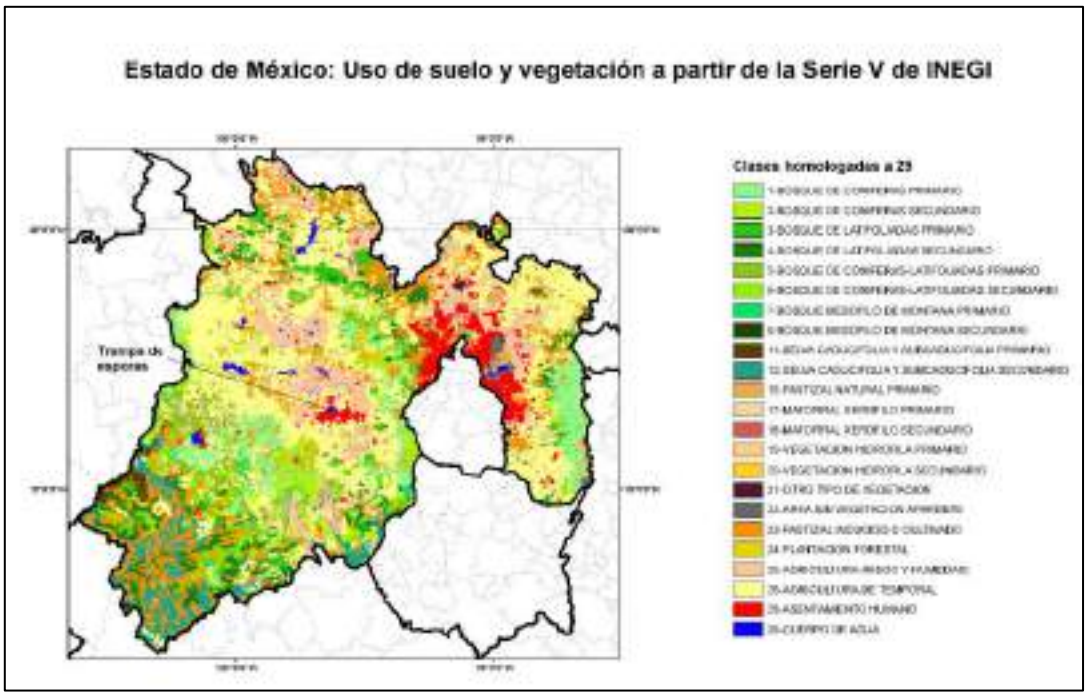


Figura A04-8 *Tipos de vegetación presentes en el Estado de México de México y localización de la TEH en el sitio del muestreo aerobiológico en la ciudad de Toluca.*

El bosque de oyamel *(Abies)* (59,999 ha) tiene una distribución más restringida. Forman bosques en manchones, localizándose los más importantes en el Eje Volcánico sobre el Nevado de Toluca, la Sierra Nevada (Iztaccíhuatl-Popocatépetl), la Sierra de las Cruces y en Zempoala, con climas húmedos, temperaturas entre 7 y 15 °C y una precipitación media anual de 1000 mm. Se ubican en cañadas, entre los 2500 y 3600 msnm. La especie dominante es el oyamel (*Abies religiosa*).

El bosque de otras coníferas (10,307 ha) lo integran el cedro blanco (*Cupressus lindleyi*), presente en cañadas y suelos profundos con climas húmedos y frescos, en algunas áreas dentro de las regiones típicas de bosque de oyamel y pino-encino, las especies de táscate *Juniperus spp* (*J. flaccida y J. deppeana*) ubicadas en condiciones ecológicas más bajas y secas. Los bosques fragmentados de clima templado (61,154 ha) están afectados por actividades agropecuarias, al grado de quedar sólo manchones de la vegetación original.

Bosque de encino (126, 016 ha)

Prospera entre 0 y 1500 msnm, en laderas abiertas y escarpadas, ocupan suelos que varían desde rocosos hasta profundos, junto con los pinares constituyen la mayor cubierta vegetal de las áreas de clima templado frío y semihúmedo. Su distribución corresponde a las mismas zonas del bosque de pino-encino y altitudes más bajas. Las principales especies de encino en este tipo de bosques son: *Quercus rugosa Q. macrophylla, Q. crassipes, Q. elliptica, Q. acutifolia y Q. castanea.*

Bosque de galería (636 ha)
Se desarrolla en los márgenes de ríos y arroyos, con la mayor humedad existente en áreas de clima templado frío y puede estar compuesta de especies arbóreas *como Taxodium mucronatum, Salix spp., Fraxinus spp.* o de especies como la jarilla (*Baccharis spp*.) o el mimbre (*Chilopsis linearis).*

Plantaciones forestales (9,496 ha)
Son áreas reforestadas en terrenos que se encontraban con escasa vegetación o con cambio de uso de suelo.

Bosque mesófilo de montaña (7,763 ha)
Se desarrolla en algunas cañadas y laderas abruptas, muy protegidas y húmedas, incluye comunidades vegetales clasificadas como "bosque caducifolio", "selva nublada" y "selva mediana" en áreas de transición. Su distribución es sumamente limitada, se les encuentra entre los 1900 y 2500 metros de altitud, en las laderas del Popocatépetl, Iztaccíhuatl y en algunas partes de la Sierra de las Cruces, así como en los municipios de Sultepec, Temascaltepec y Valle de Bravo. Las principales especies son: *Cornus disciflora, Garrya laurifolia, Meliosma dentata, Oreopanax xalapensis, Prunus spp. y Quercus laurina.*

Áreas forestales perturbadas (225,974 ha)
Son suelos que han sido deforestados con fines diversos tales como agricultura, ganadería, infraestructura y centros de población, donde sólo se encuentran relictos de vegetación natural.

Selvas bajas caducifolias (37,325 ha)
Reciben este nombre porque sus árboles no alcanzan alturas de más de 20 metros y sus principales especies son*: Ipomoea spp., Cordia dodecandra, Bursera spp., Acacia farnesiana, Lysiloma acapulcensis.*

Pastizales
La diversidad de la flora agrostológica (disciplina que estudia a la las gramíneas) del Estado de México comprende 106 géneros y 405 especies, siendo los principales géneros: *Muhlenbergia, Bouteloua, Paspalum, Aristida, Eragrostis, Panicum, Agrostis, Festuca, Digitaria, Penisetum* (Rescala-Perez, 2009).

Uso de suelo
Más de la mitad de la superficie del estado se dedica a la agricultura, dominando ampliamente el cultivo del maíz y posteriormente el de fríjol, cebada, avena y papa; con casi un 13% se ubican a los pastizales y alrededor del 27% está ocupado por bosques de tipo templado como bosques de coníferas (pino, oyamel y junípero, entre otros), bosque mesófilo de montaña, bosque de encino, así como sus respectivas asociaciones. Aún se reconoce cerca de 5% de superficie ocupada con selva baja caducifolia propia de la cuenca del Balsas y 0.5% de matorral propio de los límites con los estados de Hidalgo y Querétaro (López-Cano et al, 2009.) (**Cuadro A04-1,** "Mapas por tipo de vegetación", ver **Apéndice 1.**)

Cuadro A04-1. Vegetación y uso de suelo del Estado de México

Uso	Superficie (ha)	Vegetación	%
Agricultura	1,155,600	*Zea mays* (maíz), *Phaseolus vulgaris* (fríjol), *Hordeum sativum* (cebada), *Avena sativa* (avena), *Solanum tuberosum* (papa)	51.36
Bosque	608,175	*Abies religiosa* (oyamel), *Pinus montezumae* (ocote blanco), *P. teocote* (pino chino), *Quercus rugosa* (encino quebracho), *Q. laurina* (encino laurelillo)	27.03
Pastizales	290,925	*Bouteloua gracilis* (navajita), *Aristida divaricada* (zacate), *Buchloe dactyloides* (zacate chino), *Muhlenbergia rigida* (zacatón)	12.93
Selva baja caducifolia	112,275	*Acacia cymbispina* (huizache), *Ipomoea wolcottiana* (cazahuate), *Bursera copallifera* (copal), *Eysenhardtia polystachya* (palo dulce), *Haematoxylon brasiletto* (palo de Brasil)	4.99
Matorral	9,450	*Opuntia streptacantha* (nopal), *Mimosa biuncifera* (uña de gato), *Jartropha dioica* (sangre de Drago), Acacia farnesiana (huizache), *Opuntia tomentosa* (nopal)	0.42
Otros	73,575	Zona urbana, cuerpos de agua	3.27
Total	**2,250,000**		**100**

INEGI, 2006[b]

4.5.2.1 VEGETACIÓN EN LA CIUDAD DE TOLUCA

Desde finales del siglo XIX, hubo en Toluca políticas de arbolado urbano. En 1892 se plantaron los cedros blancos (*Cupressus lusitanica*) a lo largo de Paseo Colón, la misma especie fue plantada a principios del siglo XX en el panteón general. Durante el gobierno de Wenceslao Labra (1937-41) se plantaron las palmeras datileras (*Phoenix canariensis*). En el camellón de Hidalgo y en Isidro Fabela. Durante el Sexenio de Salvador Sánchez Colín (1951-57) se plantaron chopos (*Populus canadensis*) a lo largo de las vías de salida de Toluca. En el sexenio de 1963 a 1969 se plantaron colorines (*Erythrina americana*).

Durante el gobierno de Carlos Hank González (1969-1975) se construyó el Paseo Tollocan y se plantaron chopos y sauces llorones (*Salix babilonica*). También se plantaron fresnos (*Fraxinus spp.*) en diversos puntos de la ciudad (Rojas 1999). En administraciones más recientes hubo algunas plantaciones, como las de palmeras datileras en Vicente Guerrero e Isidro Fabela durante la administración municipal 2003-06, y plantaciones de jacarandas (*Jacaranda mimosifolia*) en Carranza en la administración 2006-09, así como algunos árboles de liquidámbar (*Liquidambar styracifula*) cuando se ampliaron las banquetas de Hidalgo, Morelos y Juárez.

Actualmente, el arbolado urbano va cediendo terreno al maltrato de la gente, a las podas de la Comisión Federal de Electricidad o las realizadas por dueños de anuncios comerciales. Muchos camellones con plantaciones han desaparecido por la construcción de puentes vehiculares o pasos a desnivel (Bianconi, 2012). Además, existen diversas especies sembradas en jardínes particulares, la mayoria de las cuales tienen flores de la familia Asteraceae, pero por lo demás no existe un censo de ellas.

Principales especies vegetales

La flora útil del Estado de México comprende las especies de plantas a las que el hombre ha otorgado alguna categoría de uso. Pueden ser útiles para solventar necesidades en primera instancia de salud, alimento y abrigo. En total suman 594 especies útiles, 359 géneros y 111 familias botánicas.

En mayor cantidad son usadas las angiospermas (559) y en menor proporción las pteridofitas (18). De las 111 familias botánicas reportadas, el mayor número de especies útiles corresponden a las Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Lamiaceae, Cactaceae, Solanaceae, Rosaceae, Polypodiaceae y Pinaceae. De la familia Asteraceae, los géneros mejor representados son *Baccharis spp*. (escoba), *Gnaphalium spp*. (gordolobo, hierba del lobo), *Senecio spp*. (jara, jaral, jarilla) y *Tagetes spp*. (anís, cinco llagas, pericón), en los estratos herbáceos y arbustivos. Por otra parte, las especies de Poaceae registradas con mayor frecuencia son los nombrados popularmente zacates o pastos, siendo los géneros más representativos *Muhlembergia y Paspalum*, utilizados como forraje. El estrato arbóreo esta representado por los pinos (*Pinus spp*.), encinos (*Quercus spp*.), abetos (*Abies spp*.), cedros blancos (*Cupressus spp*.), entre otros. Además de los cultivados en huertos familiares como el durazno *(Prunus persica*), la pera (*Pyrus com munis*) y otras especies silvestres como el capulín (*Prunus serotina ssp*. capuli), tejocote (*Crataegus mexicana*) y el aile (*Alnus spp*.) (Lopez-Villafranco *et al.* 2009).

4.5.3 INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE MORELOS

De acuerdo con Monroy y Colín (1991), el estado de Morelos está dividido en tres regiones ecológicas: la región montañosa del norte, el valle intermontano y la región montañosa del sur (**Figura A04-9**).

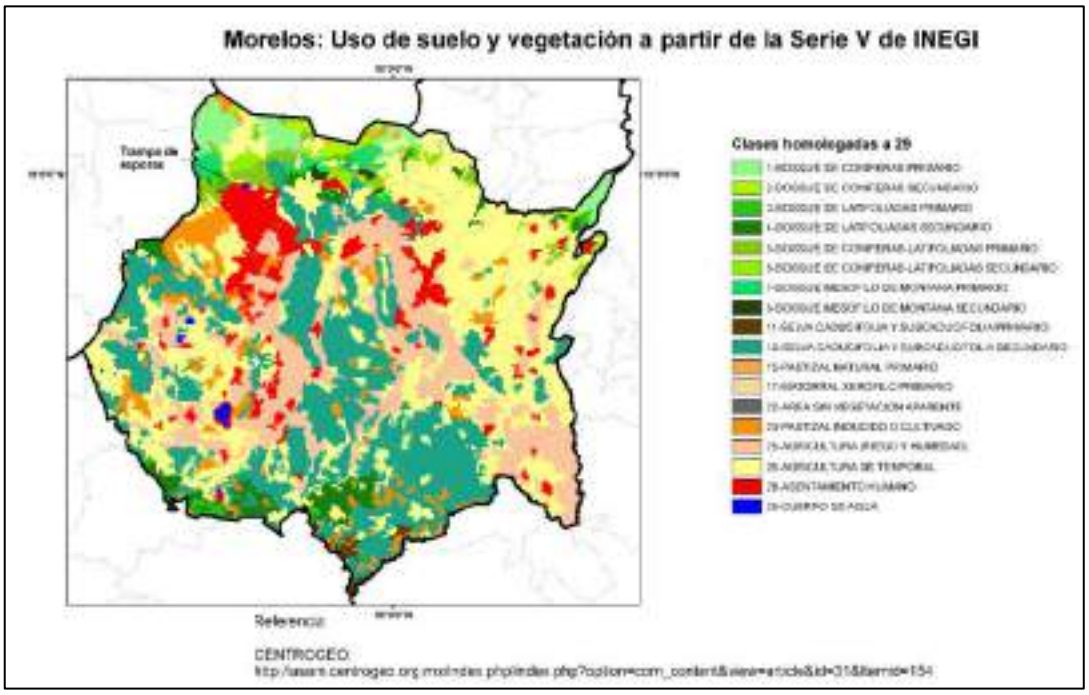


Figura A04-9 *Tipos de vegetación presentes en el estado de Morelos y localización de la TEH en el sitio del muestreo aerobiológico en la ciudad de Cuernavaca.*

La región montañosa del norte se caracteriza por presentar una vegetación primaria de bosque templado, tanto de pino como de pino-encino, y algunas asociaciones de latifolias. Esta región se distribuye en la provincia del Eje Neovolcánico, y se encuentra en tres estados de conservación: bosque conservado, bosque francamente deteriorado por tala inmoderada y terrenos cultivados; esta zona ecológica es el hábitat natural del teporingo, zacatuche o conejo de los volcanes (*Romerolagus diazi*) que se encuentra en peligro de extinción.

El valle intermontano se localiza en la parte central del estado. Sus recursos naturales han sufrido un serio detrimento cualitativo y cuantitativo ante la expansión de la frontera urbana por un lado, y por otro, por la contaminación en todos sus elementos, como suelo, agua y aire. En esta región se siembra la mayoría de los cultivos agrícolas que se producen en la entidad, aunque también se pueden encontrar algunos manchones perturbados de la selva baja caducifolia o bosque tropical caducifolio.

La región montañosa del sur se ubica en la provincia de la Cuenca del Balsas, está caracterizada por la presencia de una vegetación de selva baja caducifolia, que está todavía conservada en algunas partes de la entidad.

Otro modelo de regionalización es el propuesto por la Semarnat (2000), que responde plenamente a las particularidades de la problemática y las características ambientales de la entidad. Bajo este enfoque se han definido tres grandes regiones ecológicas: zona norte, zona centro y zona sur.

La zona norte está integrada por ocho municipios que albergan una población de 115,740 habitantes, lo que representa el 7.4% de la población estatal. En esta zona se localiza el macizo forestal más importante del estado, dentro del cual se ubica el Corredor Biológico Chichinautzin que incluye el Parque Nacional Lagunas de Zempoala y el Parque Nacional El Tepozteco. En la zona norte se originan seis microcuencas: Chalma-Tembembe, Apatlaco, Yautepec, Cuautla, Nexapa y Amacuzac, y además es la zona más importante de recarga de acuíferos de la entidad. En esta región existe una constante presión sobre el bosque por el crecimiento urbano y las actividades agropecuarias; el 80% de la tala es clandestina y el 90% de los incendios forestales ocurren en esta región.

La zona centro tiene una topografía accidentada (mesetas y barrancas) que, sin embargo, no ha evitado el crecimiento urbano. En esta región se localiza el Área Natural Protegida Sierra de Monte Negro, con vegetación de selva baja caducifolia. En la zona centro continúa el acelerado crecimiento de las conurbaciones de Cuernavaca (con Jiutepec, Temixco, E. Zapata y Xochitepec) y Cuautla (con Ayala, Yecapixtla, Yautepec y Tlayacapan).

La zona sur está conformada por el macizo de selva baja caducifolia más importante de la entidad, que incluye la Reserva de la Biósfera Sierra de Huautla, y en ella se integra la mayor concentración de biodiversidad de Morelos. En esta zona confluyen los escurrimientos de seis microcuencas en el subsistema Amacuzac, que forma parte de la gran Cuenca del Balsas. En

cuanto a su problemática, esta zona presenta un desarrollo agrícola y pecuario intensivo, con un notable cambio de uso de suelo de agrícola a urbano, además, en esta región se ubican las zonas más marginadas del estado y hay escasez de agua.

Boyás (1989; 1991; 1992) elaboró una regionalización ecológica del estado de Morelos tomando en cuenta criterios climáticos, fisiográficos, geológicos, edafológicos y de uso actual; como resultado se elaboró un mapa de unidades ecológicas en donde cada unidad o zona ecológica se encuentra definida por factores ambientales homogéneos, es decir, tienen similar topografía y el mismo tipo de clima, geología, unidades de suelo y tipos de vegetación. De acuerdo con esta regionalización, en Morelos el 45% de la superficie estatal está ocupada por unidades ecológicas agrícolas y el resto (55%) por unidades ecológicas forestales.

Otro tipo de clasificación de zonas de agua y barrancas, ya que en éstas se registra la mayor concentración industrial ecológicas ha sido propuesto por Toledo y Ordóñez (1993, citados por Conabio, 1998). Se basa en criterios que incluyen el tipo de vegetación, el clima y aspectos biogeográficos, por lo que cada zona ecológica se caracteriza por conjuntos de vegetación con condiciones climáticas y linajes biogeográficos similares.

El estado de Morelos posee una gran diversidad ambiental, la cual ha dado lugar al establecimiento de siete tipos de vegetación; siguiendo el criterio de Rzedowski (1978), en esta entidad se reconocen los tipos de vegetación: bosque de coníferas, bosque de *Quercus* (latifolias), bosque mesófilo de montaña, bosque tropical caducifolio, pastizal, zacatonal, bosque de galería y vegetación acuática (Bonilla-Barbosa *et al.*, 2000).

Bosque de coníferas

El bosque de coníferas constituye la más importante de las áreas boscosas que ocupan la totalidad de las partes altas de la Cordillera Neovolcánica, al norte del estado. Las coníferas se desarrollan entre los 1500 y los 4000 msnm. Este bosque se caracteriza por ser una comunidad más o menos densa, formada por un estrato arbóreo que varía de 8 a 35 m de altura, con una amplia representación florística en los estratos herbáceo y arbustivo (Rzedowski, 1978). En el estado de Morelos el bosque de coníferas ocupa 10, 335 ha en masas puras y 5, 194 ha forman bosques mixtos con encinares principalmente (SARH, 1994). Este tipo de vegetación está representado por las comunidades forestales: a) bosque de pino, b) bosque de pino-encino y c) bosque de *Abies* (Boyás, 1992; Boyás *et al.*, 1993; Bonilla-Barbosa y Villaseñor, 2003).

El bosque de pino se distribuye en los municipios de Huitzilac, Tepoztlán, Tlalnepantla, Totolapan y Tetela del Volcán, sobre una topografía de cerros y laderas, y en sustratos rocosos de origen volcánico. Entre los 2000 y 3500 msnm las especies de pino son *Pinus montezumae* (ocote), *P. Ayacahuite* var. *veitchii* (ayacahuite), *P. pseudostrobus* (ocote jarano) *P. michoacana* (pino) *P. michoacana* var. *cornuta* (pino). Altitudes mayores, entre los 3500 y 4000 metros, *Pinus hartwegii* es la única especie de pino que forma

masas puras, o bien puede presentarse asociada con *Alnus firmifolia* (aile) en terrenos con menores altitudes. Abajo de los 2500 metros de altitud, las especies de pino que forman bosques puros o mezclados con especies de encino son *P. leiophylla* (ocote chino), *P. teocote* (ocote colorado) y *P. oocarpa* (Boyás, 1992; Boyás *et al.*, 1993; Bonilla-Barbosa y Villaseñor, 2003). Esta comunidad forestal ocupa aproximadamente 8068 ha, constituidas por bosques de pinos cerrados o abiertos (SARH, 1994).

El bosque de pino-encino ocupa una extensión de 5194 ha en la zona norte del estado de Morelos (SARH, 1994); se distribuye principalmente en los municipios de Tetela del Volcán, Ocuituco, Totolapan, Tlayacapan, Cuernavaca, Huitzilac, Tlalnepantla y Tepoztlán, en topografía de serranía y sobre sustratos rocosos de naturaleza ígnea, con suelos profundos o someros. La asociación de pino y encino está dada por las siguientes especies: *Pinus montezumae, P. leiophylla, P. teocote, P. pringlei, P. oocarpa, P. lawsoni, P. michoacana* var. *cornuta, Quercus rugosa, Q. obtusata, Q. laurina, Q. castanea y Q. crassifolia* (Cotecoca, 1979; SPP, 1981; Boyás, 1992; Boyás *et al.*, 1993; Bonilla-Barbosa y Villaseñor, 2003).

El bosque de *Abies* u oyamel (*Abies religiosa)* está confinado a sitios de alta montaña, en laderas de cerros protegidos de la acción de los vientos y la insolación, y forma un piso por debajo de las especies dominantes de *Pinus*. Esta especie se localiza en la parte norte del estado entre los 2800 y 3500 m de altitud, en sitios como el Km 59 de la autopista México-Cuernavaca, las inmediaciones entre Coajomulco y El Mirador, así como en la región del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, donde forma un bosque de grandes extensiones escasamente perturbado, y en las laderas de los conos volcánicos del Chichinautzin y del Popocatépetl (Contreras-MacBeath *et al.*, 2002). Generalmente, *Abies religiosa* está formando masas puras o asociado con *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* o con *Cupressus lindleyi* (cedro blanco) (Cotecoca, 1979; SPP, 1981; Boyás, 1992; Boyás *et al.*, 1993). El bosque de *Abies* ocupa una superficie de 2267 ha en el estado de Morelos (SARH, 1994).

Bosque de *Quercus*. Este bosque se distribuye en la zona norte, sur y suroeste del estado de Morelos, particularmente en los municipios de Cuernavaca, Huitzilac, Amacuzac, Puente de Ixtla, Tlaquiltenango y Tepalcingo. En los municipios del norte del estado las especies de encino dominantes son *Quercus rugosa, Q. candicans, Q. obtusata, Q. laurina, Q. castanea, Q. decipiens y Q. crassifolia*; en los municipios del sur-suroeste del estado las especies más frecuentes son *Quercus glaucoides, Q. magnoliifolia, Q. rugosa y Q. elliptica* (Cotecoca, 1979; SPP, 1981; Boyás, 1992; Boyás *et al.*, 1993). Estos bosques pueden ser desde totalmente caducifolios, como sucede con los formados por *Quercus glaucoides* o *Q. magnoliifolia* que se desarrollan en climas subtropicales, hasta los totalmente perennifolios, típicos de lugares templados y húmedos. Este tipo de bosque está distribuido en altitudes entre los 1500 y 2200 msnm, ocupando una superficie aproximada de 10, 832 ha (SARH, 1994; Contreras-MacBeath *et al.*, 2002).

Bosque mesófilo de montaña

Tiene una distribución limitada en el estado debido a las condiciones climáticas que requiere este tipo de vegetación. Se localiza en los municipios de Huitzilac y Tepoztlán, sobre barrancas y laderas húmedas aledañas a las zonas montañosas. Fisonómicamente se puede describir como un bosque denso, con árboles de 15 a 25 metros de altura.

Con frecuencia la comunidad incluye tanto árboles perennifolios como de hoja decidua, de tal manera que nunca se encuentra completamente defoliado. Por lo común, existen varios estratos arbóreos y uno o más arbustivos. El estrato herbáceo no tiene gran desarrollo en las comunidades bien conservadas, aunque en los claros la composición es compleja y exuberante. Las epífitas suelen estar bien representadas, con abundancia de líquenes, musgos y pteridofitas, así como fanerógamas. Las principales especies que se encuentran en este tipo de bosque, en el estrato arbóreo, son *Quercus laurina, Clethra mexicana, Ternstroemia pringlei, Styrax ramirezii, Cornus disciflora, Meliosma dentata, Oreopanax peltatus, Carpinus caroliniana, Symplocos prionophylla* y *Arbutus xalapensis* (Boyás, 1992; Boyás *et al.*, 1993; Contreras-MacBeath *et al.*, 2002). De acuerdo con la SARH (1994), este tipo de vegetación ocupa aproximadamente 5700 ha.

Bosque tropical caducifolio

Recibe también el nombre de selva baja caducifolia; ocupa la mayor extensión superficial del estado de Morelos, ya que se distribuye en aproximadamente 56,000 ha (SARH, 1994). Este tipo de vegetación se desarrolla típicamente en climas cálidos y semicálidos subhúmedos; se puede encontrar en terrenos cerriles, lomeríos y aún en planicies, aunque su mayor superficie forestal se ubica en las sierras del centro y sur de Morelos. Su área de distribución en la entidad se ubica entre los 900 y los 1600 msnm (Boyás, 1992).

Pastizal

Se distribuye en pequeñas superficies de los municipios de Cuautla, Yecapixtla, Zacualpan y Jantetelco, principalmente en climas cálidos y semicálido subhúmedo. Se localiza en terrenos planos o de lomerío, sobre sustratos geológicos de naturaleza ígnea o sedimentaria, en suelos de tipo feozem principalmente, aunque también crece en suelos regosoles, acrisoles y vertisoles (Boyás, 1992). Las especies más frecuentes en este tipo de vegetación son *Hilaria cenchroides, Cynodon dactylon, Buchloe dactyloides, Settaria lutescens, Microchloa kunthii, Panicum obtusum, Sporobolus poiretti, Paspalum notatum* y *Bouteloa curtipendula* (Cotecoca, 1979).

Zacatonal

Se distribuye en las zonas montañosas de mayor altitud del norte del estado de Morelos, generalmente por arriba de los 3500 msnm. Está formado por especies de gramíneas amacolladas, altas o medianas, que por su fisonomía también se denominan “zacatones”. Esta comunidad vegetal se localiza en climas semifríos, en planicies, lomeríos o sierras. Las especies dominantes

que conforman el zacatonal son *Festuca tolucensis, Calamagrostis tolucensis, Festuca amplissima, Stipa ichu, Muhlenbergia macroura* y *quadridentata* (Boyás, 1992).

Bosque de galería

Llamado también bosque perennifolio ripario y deciduo entre los 800 y 1800 m de altitud. Esta agrupación vegetal está compuesta principalmente por *Taxodium mucronatum, Salix bonplandiana, S. humboldtiana, Inga vera y Ficus cotinifolia*. Destacan también algunos árboles de talla sobresaliente y arbustos, estos últimos generalmente trepadores que conservan, en su mayoría, el follaje todo el año.

Otras especies que se encuentran en este tipo de vegetación son *Licania arborea, Enterolobium cyclocarpum y Pithecellobium dulce*.

El estado de Morelos tiene una gran riqueza florística dentro del grupo taxonómico de las fanerógamas, las cuales están representadas por 176 familias, 962 géneros y 3155 especies. Los taxónomos han dividido a las angiospermas en monocotiledóneas y dicotiledóneas; estas últimas contribuyen con el 70% de la flora fanerogámica de esta entidad (Bonilla-Barbosa y Villaseñor, 2003).

Al nivel de familia, predominan por su número de especies las Asteraceae, Fabaceae, Poalceal y Orchidaceae, es decir, dominan las que son consideradas como las más ricas en especies vegetales en el mundo. Por otra parte, en los ambientes templados, las familias Asteraceae, Poaceal, Fabaceae, Pinaceae y Fagaceae son las más importantes por su número de especies, mientras que en los ambientes tropicales se tiene a las familias Burseraceae, Fabaceae, Anacardiaceae y Cactaceae entre las de mayor riqueza en especies fanerogámicas.

Para dar una idea general de la forma en que contribuyen las diferentes formaciones vegetales para integrar la flora de Morelos, en el Cuadro A04-2 se presenta la vegetación en cinco conjuntos, a cada uno de los cuales se le asigna el porcentaje estimado de su participación. De acuerdo con esta valoración, el bosque tropical caducifolio y el de coníferas contribuyen con cerca del 60% de la flora fanerogámica estatal (Bonilla Barbosa y Villaseñor, 2003).

México ocupa en el mundo un lugar importante por su número de especies endémicas de flora (Rzedowski, 1978; Ramamoorty y Lorence, 1987; Rzedowski, 1991), calculándose para este endemismo más del 50% al nivel específico. La flora de Morelos registra el 40% las de especies endémicas del país, con 25 especies endémicas dentro de sus límites políticos, las cuales están agrupadas en cuatro géneros (Bonilla-Barbosa y Villaseñor, 2003).

Cuadro A04-2. Número de especies en los principales tipos de vegetación fanerogámica e importancia porcentual estimada

Tipo de vegetación	Número de especies	%
Matorral* y pastizal	234	10
Bosque de coníferas y de Quercus	937	40
Bosque mesófilo de montaña	234	10
Bosque tropical caducifolio	703	30
Vegetación acuática y bosque perennifolio ripario	234	10
*En este trabajo el matorral se integra dentro del bosque tropical caducifolio. (Bonilla-Barbosa y Villaseñor , 2003)		

4.5.4 VEGETACIÓN DE LA CIUDAD DE CUERNAVACA

El norte de la zona se encuentra cubierto por bosques de tipo mesófilo de montaña, pino y encino, al extremo sur predomina el pastizal inducido asociado con condiciones secundarias de selva baja caducifolia, representada por herbáceas altas como la higuerilla y acahuales; en las barrancas que se localizan al poniente y en las que cruzan la ciudad se aprecian distintas variedades de árboles como fresno, jacaranda, ciruelo, sauce, amate y guayabo.

Dentro de las barrancas, en las partes húmedas, se presentan aún bosques de galería, la acción depredadora causada por el hombre se observa con el crecimiento de la mancha urbana sobre éstas.

La flora vascular del Bosque de Cuernavaca, está compuesta de 451 especies y comprenden 84 géneros de 107 familias.

Las familias con mayor número de especies en orden descendente son Orchidaceae (76), Asteraceae (44), Pteridaceae (28) Poaceae y Fabaceae (20). Con referencia al número de géneros por familia, Orchidaceae presentó el mayor número con 33, seguida por Asteraceae con 32, Poaceae con 20, Fabaceae con 14, y Pteridaceae con 9 géneros.

En general, la vegetación que presenta en el municipio de Cuernavaca es diversa. No obstante, en algunas regiones se encuentra deteriorada, debido a que ha sido intervenida en diferentes intensidades por los asentamientos humanos locales. Así como, la presión que ejercen los sistemas agrícolas. Estas actividades han provocado la reducción de la mancha forestal. Esta área, estaba constituida, en la porción norte, por una mezcla de varios tipos de vegetación de ambientes templados y uno tropical como son: bosque de pino, bosque de encino, bosque de pino-encino y bosque mesófilo de montaña. En la porción centro-sur bosque tropical caducifolio, así como bosque perennifolio y deciduo ripario en la mayoría de las barrancas que se encuentran en dicho municipio. También se presenta otro tipo de vegetación dominante en la porción poniente de Cuernavaca que es el pastizal natural e inducido.

Bosque de pino

Son asociaciones de especies del género *Pinus* son ampliamente distribuidas en las regiones montañosas del país. Las características morfológicas de estos árboles le da una fisonomía conspicua relativamente fácil identificar. Se tienen pinares desde climas húmedos hasta pinares de clima más bien secos (Rzedowski, 2006). Está vegetación está conformada por las siguientes especies: *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. Ehrenb. ex Schltdl., *P. leiophylla* Schltdl. & Cham., *P. montezumae* Lamb., *P. patula* Schltdl. & Cham., *Pinus pringlei* Shaw y *P. Pseudostrobus* Lindl.

En el borde altitudinal superior (2,500 msnm) este bosque se encuentra asociado con escaso *Abies religiosa* (Kunth Schltdl & Cham). En borde altitudinal menor con algunas especies de *Quercus* principalmente en los bordes de las barrancas. El estrato arbustivo es escaso y sobresalen las especies *Verbesina oncophora* B.L. Rob. & Seaton, *Acacia angustissima* (Mill.) Kuntze, *Calliandra grandiflora* (L' Her.) Benth., *Eysenhardtia polystachya* (Ort.) Sarg., *Indigofera thibaudiana* DC. Las especies herbaceas son entre otras: *Echeandia durangensis* (Greenman) Cruden, *Eleocharis elegans* (Kunth) Roem. & Schult., *Muhlenbergia* sp., *Aristida adscensionis* L., *Bidens bigelovii* Gray, *Dahlia coccinea* Cav., *Salvia lavanduloides* Benth., *S. polystachya* Ort.

Bosque de encino

Los bosques de *encino* (latifolias) o encinares son comunidades vegetales características de las zonas montañosas de México (Rzedowski, 2006). Inclusive, junto con los pinares conforman la mayor parte de la vegetación de regiones de clima templado o semifrío, semisecas o subhúmedas. La composición de especies es variada según las condiciones ecológicas en donde se encuentran, ya que existen alrededor de 250 especies de *Quercus* (Miranda y Hernández X., 1963).

Las especies más frecuentes son: *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Q. rugosa* Née, *Q. obtusata* Humb. & Bonpl. y *Q. castanea* Née. En los bordes de las barrancas, colindando con los bosques mesófilos, se encuentran elementos como *Arbutus xalapensis* Kunth. En las áreas del límite sur y sureste del polígono, corresponde a la zona con perturbación de media a baja. En ésta, se pueden encontrar elementos como *Mimosa benthamii* Macbr, *M. lacerata* Rose, *Eysenhardtia polystachya,* entre otras. También, se presentan algunos elementos relacionados con reforestaciones, tales son los casos de *Eucalyptus globulus* Labill., *Casuarina equisetifolia* L. y *Cupressus lusitanica* Mill.

Bosque mesófilo de montaña

Este tipo de vegetación, también conocido como selva mediana o baja perennifolia (Pennington y Sarukhan, 1968), se encuentra en las zonas montañosas de ambas vertientes, la del Golfo y la del Pacífico. Son bosques húmedos y frecuentemente expuestos a nieblas. Las precipitaciones anuales por arriba de los 1500 mm. Se localizan en regiones abruptas en suelos someros

pero con enormes cantidades de materia orgánica (Pennington y Sarukhan, 1968). Es una comunidad vegetal densa, con la altura de los árboles entre 15 y 25 m. Una de las características más sobresaliente es la presencia de una gran cantidad de musgos, líquenes y helechos. Estos llegan a cubrir completamente los suelos y troncos de árboles.

Esta vegetación se presenta en forma de manchones discontinuos en los lomeríos y bordes de las barrancas y en forma más o menos continua en las laderas profundas y barrancas en altitudes que varían desde los 1800 a los 2500 msnm, se caracteriza por presentar elementos arbóreos tales como *Ternstroemia pringlei* (Rose) Standl., *Arbutus xalapensis, Carpinus caroliniana* Walt*, Clethra mexicana* A. DC.*, Oreopanax xalapensis* (Kunth) Decne. & Planch.*, O. peltatus* Lienden ex Regel, *Pinus leiophylla, Quercus castanea*, *Q. candicans, Styrax argenteus* Presl. var. *ramirezii* (Greenm.) Gonsoulin. Y *Ternstroemia pringlei* (Rose) Standley*.*

Bosque mixto

Está constituido por asociaciones de pino y encino en diferentes proporciones. Este tipo de vegetación se encuentra en manchones discontinuos en la zona de estudio por arriba de los 2000 msnm, se mezcla con el bosque mesófilo*.* Esta comunidad tiene una altura aproximada de 10 a 25 m, dependiendo de las especies que las conforma y está constituida por *P montezumae,* que es un árbol dominante junto con *Pinus pringlei* y *P. leiophylla,* asociados con *Quercus rugosa, Q. laurina*. Los elementos estructurales arbóreos que lo componen en menor abundancia son *Arbutus xalapensis, P. pseudostrobus, P. Patula,* Q. *candicans*, *Q. castanea*.

Especies Introducidas

Plantas que no son nativas de la región, es decir, que fueron introducidas artificialmente (reforestaciones) o escapadas de cultivo (llevadas por dispersores naturales). Se registran especies como *Cupressus lusitanica* Mill.*, Eucalyptus globulus* Labill., *Casuarina equisetifolia* L. y *Pyracantha coccinea* M. Roem. Las primeras dos especies seguramente introducidas por el hombre y la última pudiera ser escapada de cultivo. La más abundante es *Cupressus lusitánica.*

4.5.5 INVENTARIO DE LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA

El estado de Puebla aporta el 15% de total de la biodiversidad mexicana. Está catalogado como el cuarto estado con mayor riqueza natural.

En el estado de Puebla se tienen registradas 4104 especies de angiospermas (plantas con flor) y 35 especies de gimnospermas (plantas sin flor), de un total de 6026 especies de los diferentes grupos taxonómicos como anfibios, aves, etc. De las 4,104 especies ya mencionadas, un elevado porcentaje representan una fuente importante de partículas biológicas que pueden ser suspendidas en el aire mediante el polen, el cual es considerado un aeroalérgeno suspendido en el aire que propicia efectos negativos en la salud del ser humano.

Se encuentran una gran cantidad de sistemas agroforestales los cuales son formas de uso y manejo de los recursos naturales en los que las especies leñosas (árboles, arbustos y palmas) son utilizadas en asociaciones deliberadas con cultivos agrícolas o con animales en el mismo terreno, de manera simultánea o en secuencia temporal (CATIE 1986).

La Mixteca Poblana cuenta con una riqueza natural de plantas arbóreas y arbustivas, muchas de ellas pertenecientes a la familia de las leguminosas (Rzedowsky 1994) (Figura A04-10).

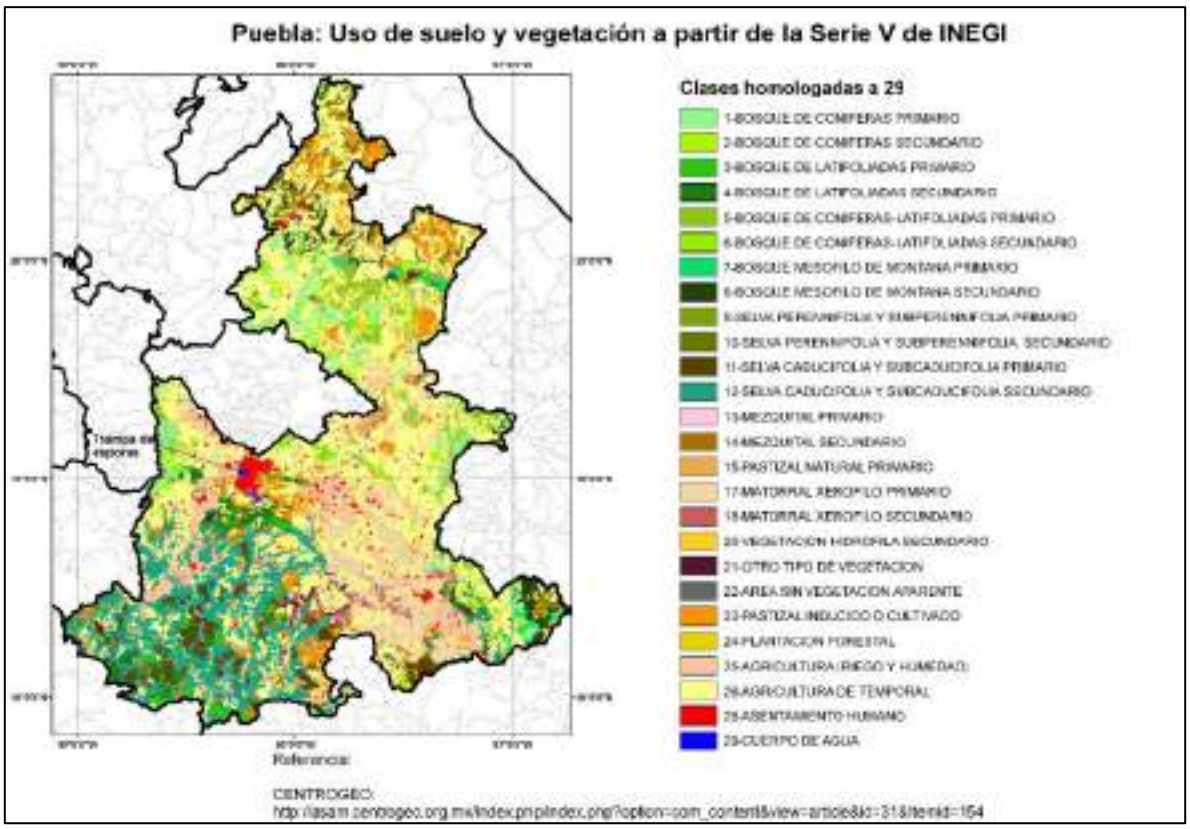


Figura A04-10 Tipo de Vegetación en el estado de Puebla y en la ciudad Puebla de los Ángeles.

De una existencia de más de 200 árboles y arbustos correspondientes a la cuenca alta del río Balsas, se realizaron una serie de estudios de identificación, clasificación taxonómica, fenología y uso forrajero de la selva baja caducifolia ubicada en el municipio de Piaxtla.

El área boscosa de Puebla abarca 770,000 ha, de las que 190,000 tienen potencial para el aprovechamiento forestal maderable. La Conafor (2004) reporta que sólo 84 mil ha se encuentran bajo manejo; de éstas, corresponde un 93.2 % a coníferas, 6.4 % a latifolias y un 0.4 % a otras especies. La superficie forestal del estado lo ubica en el vigésimo quinto lugar con relación al total nacional. La superficie reforestada para la entidad en un período de once años (1993-2003) se reportó en 75, 706.30 ha, lo que representa sólo el 4.3 % del total nacional.

En contraparte, de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal (2000), la tasa de deforestación anual para la entidad se estima en 10, 012 ha, lo que sugiere que la superficie reforestada no es suficiente para contrarrestar y revertir el proceso.

El principal grupo botánico aprovechado son los pinos, ya que representa del 66 al 76 % del volumen total autorizado, seguido por el encino con el 10 al 18 % del total y por el oyamel que va del 6 al 15 %; en conjunto, los tres grupos representan el 94 % del total de la producción. Los municipios con mayor producción son Chignahuapan, Zacatlán y Tlatlauquitepec (Mallén *et al.* 2005).

4.5.5.1 VEGETACIÓN EN LA CIUDAD DE PUEBLA DE LOS ÁNGELES

En la ciudad de Puebla de los Ángeles, 4.9% de la superficie total es de bosque de pino-encino. Estas dos especies —principalmente el encino *(Quercus)*— poseen un nivel de alergenicidad alto para la población. En el centro de la ciudad, el árbol más abundante en calles, parques y plazas es el laurel de la India *(Ficus).*

En general, las juntas auxiliares del municipio de Puebla, cuenta con moderadas extensiones de áreas agrícolas, y son consideradas dentro de la clasificación de espacios abiertos agrarios, mientras que las extensiones de área verde, son parte de las condicionantes del medio físico natural.

Los espacios abiertos y áreas verdes son amplios en las zonas habitacionales, colonias periféricas, juntas auxiliares, como emplazamientos urbanos, son espacios para la concentración, reunión, esparcimiento y recreación, en éstos se expresan parte de tradiciones y costumbres y se fomenta en ellos la cultura. Sin embargo, estas áreas se han reducido, por aumento del área urbana, que ha abarcado bordes de la Ciudad, que se mantenían como área natural, se cambian los usos del suelo por asentamientos irregulares, transformado la ocupación de fracciones del territorio natural, no respetando la tipología y valores ecológicos, sin respetar decretos. Las áreas de reserva están en peligro de ser transformadas en áreas urbanas.

Uno de los problemas de áreas verdes es la falta de hidratación del suelo y la falta de oxigenación del sistema de raíces, ejemplo de esto se presenta en el zócalo de la ciudad de Puebla, donde los fresnos del área central se encuentran con limitado espacio en su desplante y consecuentemente se tienen raíces que tienden a salir y modificar los pavimentos.

La inadecuada elección de los árboles que se plantan en sitios determinados propicia que posteriormente sean derribados debido a que dañan la infraestructura urbana o las propiedades privadas.

De acuerdo a datos del INEGI en el año 2005 a nivel urbano Puebla cuenta con una población de 1,397,886 habitantes, y según la norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se requiere 9 m² de área verde por habitante, la demanda de área verde, para impactar en forma positiva a la población y para contar con servicios ambientales se requiere a futuro un

total de; 1258.10 ha. Actualmente, el municipio cuenta con un área de 160.971 ha y tiene un déficit de 1097.13 ha de áreas verdes.

La situación actual de las áreas verdes y espacios abiertos se han reducido, por aumento del área urbana, no respetando la topografía y valores ecológicos

4.6 Discusión

Se inició y avanzó en el cumplimiento del objetivo general del proyecto, poniendo en marcha los diversos objetivos particulares:

1. Se inició y actualmente se continua con el monitoreo de alérgenos polínicos del aire en las ciudades de Toluca (10 meses), Cuernavaca (7 meses) y Morelos (3 meses) ubicados en la CRCM, lo que ha permitido caracterizar los tipos polínicos presentes, sus concentraciones y su nivel de alergenicidad para la población sensible, alérgica o asmática. Asimismo, se inició la elaboración de tablas de datos acumulados, las cuales son la base para la elaboración de los primeros calendarios polínicos de cada cuenca monitoreada (>4 años).
2. Se llevó a cabo la búsqueda de información local y regional y la elaboración de mapas de uso de suelo y vegetación de cada cuenca monitoreada de la CRCM, lo que permitió caracterizar las principales fuentes de origen de los pólenes presentes y transportados en la atmósfera de las cuencas monitoreadas.
3. Se registraron los parámetros meteorológicos de cada zona y su análisis y asociación con los datos del polen colectado del aire, lo que permitirá correlacionar las variables ambientales con la presencia de los tipos polínicos, según la variación diurna y estacional en cada una de las cuencas evaluadas.
4. Se encuentra en proceso el manejo de las variables atmosféricas como magnitudes y dirección del viento que permitan trazar las posibles trayectorias de transporte de los granos de polen a través del aire dentro y fuera de las cuencas.

4.7 Conclusiones, propuestas de política pública y propuestas de investigación

Para cumplir en su totalidad con el objetivo general propuesto en este estudio será necesario continuar generando información que posteriormente, sirva como insumo para caracterizar los principales aeroalérgenos polínicos a través de ciclos anuales, establecer sus fuentes de origen, y determinar sus trayectorias de transporte a través de la atmósfera dentro y fuera de las cuencas evaluadas a través de modelos numéricos como el COSMO ART.

4.7.1 PROPUESTAS DE POLÍTICA PÚBLICA

- Elaborar programas de reforestación urbana con especies arbóreas cuyo polen no sea alergénico. Ver anexo 5, donde se muestra una lista de especies de árboles seleccionados para la reforestación que producen polen alergénico (Conabio-Instituto de Ecología, UNAM, 2009).
- Dar difusión de información real y actualizada sobre la calidad biológica del aire, tanto a la población en general, como al sector salud de cada estado, para la toma de medidas de prevención y control de enfermedades alérgicas y asma, principalmente en niños y adultos mayores.
- Concientizar a las Secretarías del Medio Ambiente y de Salud sobre la importancia de estimar y difundir diariamente las condiciones de la calidad biológica del aire, para que tomen acciones contundentes en beneficio de la población.

4.7.2 PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN

- Elaborar calendarios polínicos para la Corona Regional del Centro de México (CRCM), lo que permitiría apoyar con información verídica, tanto a la población sensible por exposición a pólenes, como al sector salud de cada región (médicos alergólogos, inmunólogos).
- Extender el sistema de alerta polínica proporcionado por la Red Mexicana de Aerobiología (REMA) a toda la CRCM.
- Registrar de manera continua los diversos parámetros meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación, dirección y magnitud del viento, horas de sol) con el fin establecer su influencia, tanto en el desarrollo y maduración de los granos de polen, como en su liberación y transporte en el aire, mediante la estimación de correlaciones entre las concentraciones de los granos de polen colectados y las variables meteorológicas.
- Elaborar tablas de datos acumulados (años) que permitan determinar los efectos del cambio climático en la fenología de las plantas, principalmente de las alergénicas.
- Establecer estaciones aerobiológicas y monitorear, de manera continua, biopartículas (pólenes y esporas de hongos) en la atmósfera de diferentes zonas de la CRCM, permitirá estimar sus concentraciones y trayectorias de dispersión en el aire de manera local y regional, mediante la aplicación de modelos numéricos como el COSMO-ART.

Referencias

Bonilla-Barbosa, J., J. A. Viana Taser y F. Salazar-Villegas. 2000. *Flora acuática de Morelos*. Listados florísticos de México. XX. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

Bonilla-Barbosa, J. R. y J. L. Villaseñor R. 2003. *Catálogo de la flora del estado de Morelos*. Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma de estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos. 129 p.

Boyás, D. J. C. 1989. *Regionalización ecológica del estado de Morelos*. Campo Experimental Zacatepec, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Informe Técnico.

——1991. "Regionalización ecológica del estado de Morelos". En: Tapia U.,M. (ed.). Primeras jornadas de investigación en el estado de Morelos. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuernavaca, Morelos. pp. 25-44.

——1992. *Determinación de la productividad*, *composición y estructura de las comunidades arbóreas del estado de Morelos en base a unidades ecológicas*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 269.

——M.A. Cervantes S., J.M. Javelly G., M.M. Linares A., F. Solares A., R. M. Soto E., I. Naufal T., y L. Sandoval C. 1993. *Diagnóstico forestal del estado de Morelos*. Campo Experimental Zacatepec, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Publicación especial No. 7. México.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) 1986. *Crecimiento y rendimiento de especies para leña en áreas secas y húmedas del América Central*. Serie Técnica. Informe Técnico no. 79, V. 2, 724 p.

Contreras-MacBeath, T., E. Ongay-Delhumeau y V. Sorani D. 2002. Programa Estatal de Ordenamiento Territorial Sustentable de Morelos Fases I, II y III. Incluyendo los subsistemas Natural, Social y Económico. SEDESOL. 600p. y 62 mapas.

Cotecoca. 1979. *Determinación regional de los coeficientes de agostadero en los estados de México*, *Morelos y Distrito Federal*. Subsecretaria de Ganadería, SARH. México. 153 pp.

D' Amato G, Liccardi G, Russo M, D' Amato M. (2000) On the interrelationship between outdoor air pollution and respiratory allergy. *Aerobiologia*;16:1-6.

De Weerd NA, Bhalla PL, Singh MB. 2002. Aeroallergens and polinosis: molecular and immunological characteristics of cloned pollen allergens. *Aerobiologia*; 18:87-106.

Emberlin J. 1998. The effects of air pollution on allergenic pollen. Eur Respir Rev;53:164-167.

Galindo-Bianconi, Andrés Salvador; Victoria-Uribe, Ricardo. 2012. "La vegetación como parte de la sustentabilidad urbana: beneficios, problemáticas y soluciones, para el Valle de Toluca". *Quivera*, num. Enero-Junio, pp. 98-108.

Hajat S, Haines A, Atkinson RW, Bremner SA, Anderson HR, Emberlin J. (2001) Association between air pollution and daily consultations with general practitioners for allergic rhinitis in London, United Kingdom. *Am J Epidemiol*; 153:704-714.

INEGI. 2006b. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, 1:250000, serie III. En: INEGI 2006. Anuario.

López Cano, R., Becerril-Zepeda G., Benítez, C., Cuevas Solórzano, S. 2009. "Medio físico biológico y social" En: La diversidad biológica del Estado de México. Estudio de estado" Ceballos, G., Rurik, L., Garduño, G., López-Cano, R., Muñozcano-Quintanar, MJ., Collado, E., San Roman, J. (Editores). 2009, Gobierno del Estado de México, Mexico. 531 pp.

López Villafranco, ME., Jácquez Ríos, P., Aguilar Contreras, A. 2009. Flora útil. En: La diversidad biológica del Estado de México. Estudio de estado" Ceballos, G., Rurik, L., Garduño, G., López-Cano, R., Muñozcano-Quintanar, MJ., Collado, E., San Roman, J. (Editores). 2009, Gobierno del Estado de México, México. 531 pp.

Mallén, R., C, Vidal Guerra de la Cruz, Tamarit, U,J,C. 2005. *El manejo de los bosques templados en Puebla*. *Criterios e indicadores para evaluar la sustentabilidad*. Libro técnico 1. CENID COMEF. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,Agrícolas y Pecuarias. INIFAP. México. P 262.

Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasas A, Ahass R, Alm-Kübler K. *et al*. (2006) European phonological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biol*;12:1969-1976.

Miranda, F., y E. Hernández X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 28: 29-179.

Pennington, T.D., y J. Sarukhán. 1968. *Árboles tropicales de México*. *Manual para la identificación de las principales especies*, 1a. ed. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-José Sarukhán, México.

Ramamoorthy, T. P. y D. H. Lorence. 1987. Species vicariance in Mexican flora and a new species of Salvia from Mexico. *Adansonia* 2: 167-175.

Rescala-Perez, J. 2009. "Historia del sector forestal" En: *La diversidad biológica del Estado de México*. *Estudio de estado* Ceballos, G., Rurik, L., Garduño, G., López-Cano, R., Muñozcano-Quintanar, MJ., Collado, E., San Roman, J. (Editores). 2009, Gobierno del Estado de México, Mexico. 531 pp

Rojas, F. P. 1996. Formicidae (Hymenoptera). En: Llorente, B. J., A. N. García A. y E. González S. (eds.). *Biodiversidad*, *taxonomía y biogeografía de artrópodos de México*: *hacia una síntesis de su conocimiento*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad-Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-BAYER. México, D. F. pp. 483-500.

Rzedowski, J. 1978. *La vegetación de México*. Editorial Limusa. México, D. F. 432 pp.

——1991. *Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México*. Acta Botánica Mexicana, 14: 3-21.

——G. Calderón de R., 1994. *Linaceae*. En: Dávila A., P. D., J. L. Villaseñor R., R. Medina L. y O. Téllez V. (eds.). Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 5. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

——2006. *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Méxi

Rosas I, McCartney HA, Payne RW, Calderón C, Lacey J, Chapela R, Ruíz-Velasco S. (1998) Analysis of the relationships between environmental factors (aeroallergens, air pollution, and weather) and asthma emergency admissions to a Hospital in Mexico City. Allergy;53:394-401.

Monroy, R. y H. Colín. 1991. Perspectiva ecológica integral 56 Capítulo 3. Biodiversidad. Estudio del estado de Morelo del estado de Morelos. En: Tapia, U. M. (ed.). Primeras jornadas de investigación en el estado de Morelos. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuernavaca, Morelos, México. pp. 45-52.

SARH. 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. México, D. F.

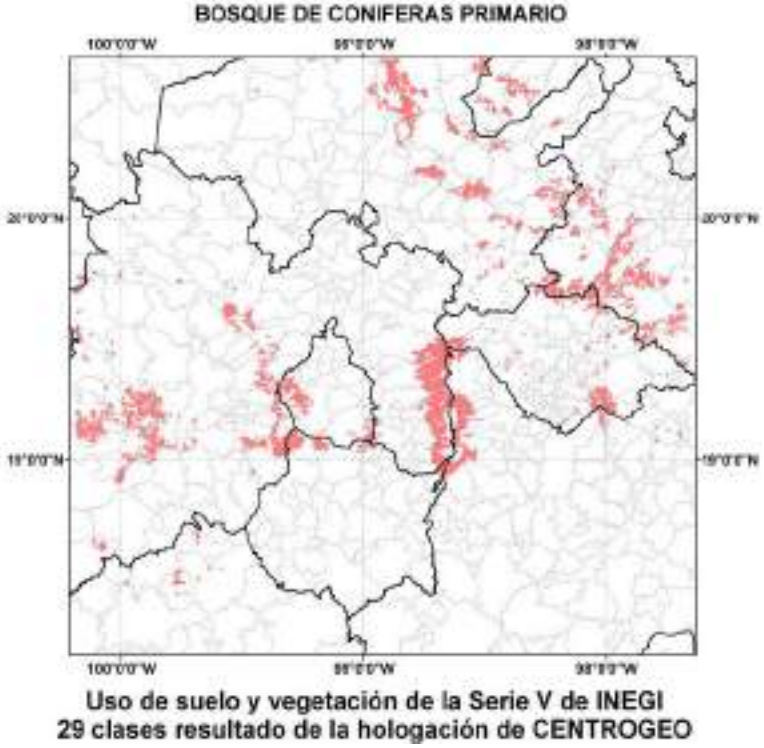
Semarnat. 2000. *Regiones ecológicas del estado de Morelos*. Semarnat. México D.F. Inédito.

SPP. 1981. *Síntesis geográfica de Morelos*. Coordinación General de los Servicios Nacionales de estadística, Geografía e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F. 110pp.

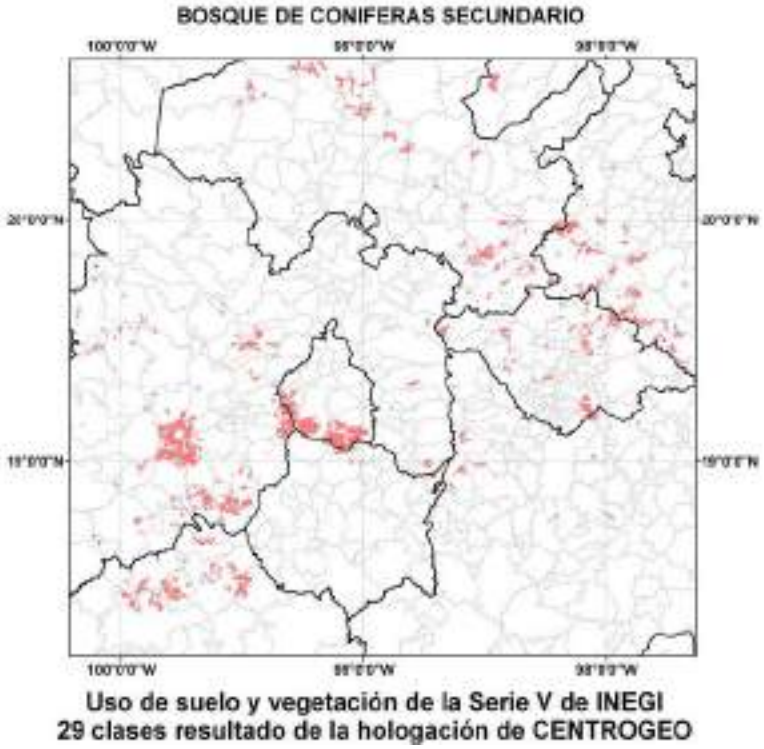
Stach A., García-Mozo H., Prieto-Baena J.C., Czarnecka-Operacz M., Jenerowicz D., Silny W., Galan, C. (2007) Prevalence of Artemisia species pollinosis in western Poland: impact of climate change on aerobiological trends, 1995-2004. *J Investig Allergol Clin Immunol*; 17:39-47.

Zuk M., Tzintzun-Cervantes M. A., Rojas-Bracho L. (2007). *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas*. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. 114pp.

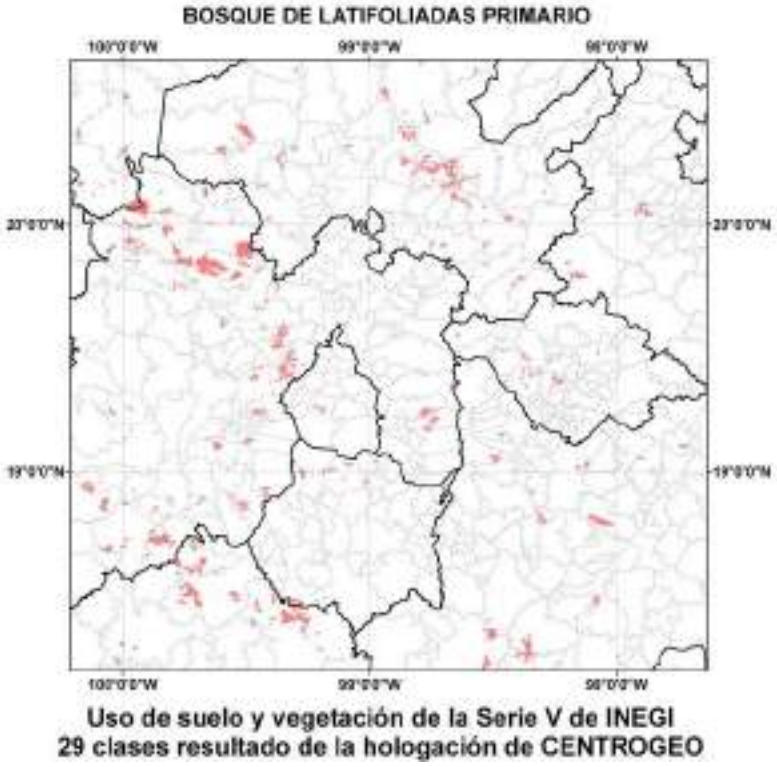
Apéndice 1



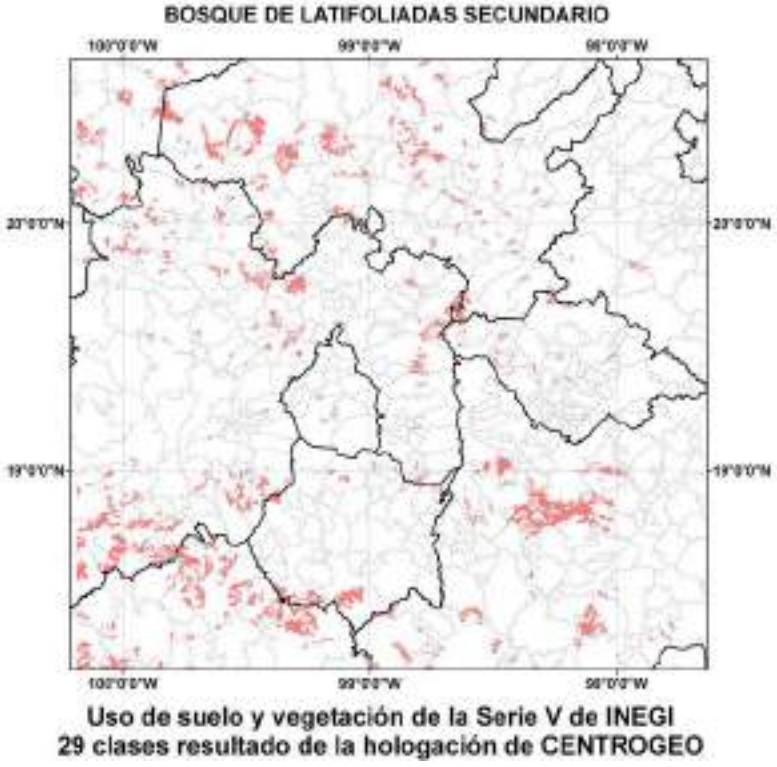
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 01: *Bosque de coníferas primario (3)*



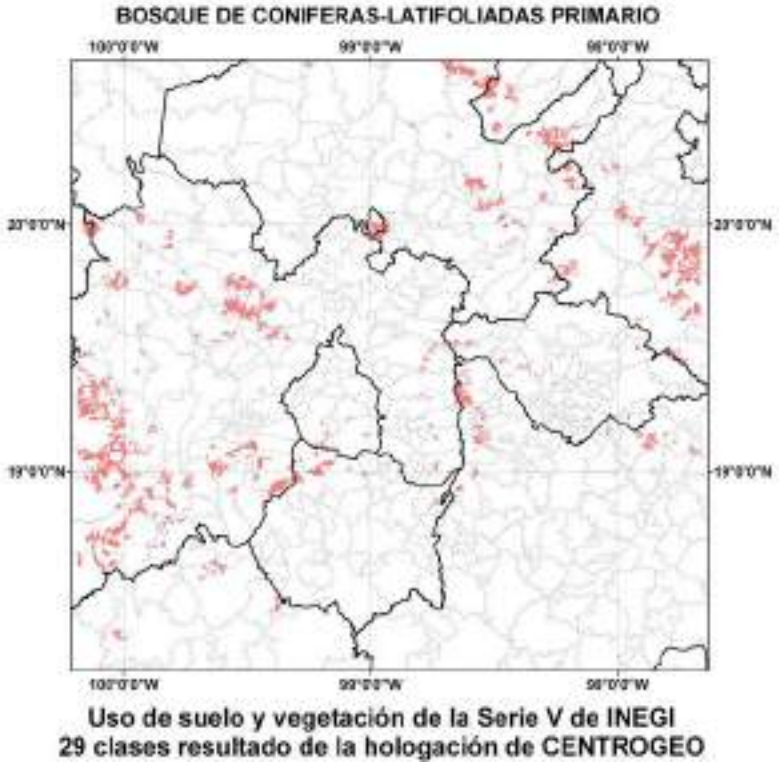
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 02: *Bosque de coníferas secundario (2)*



Anexo 04, apéndice 1 Mapa 03: *Bosque de latifolias primario (2)*

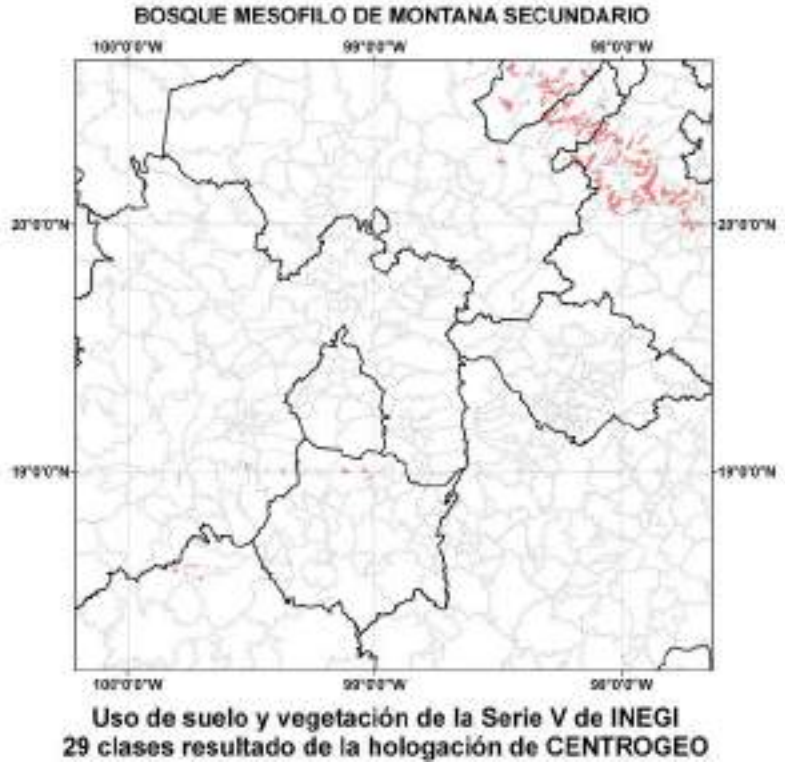


Anexo 04, apéndice 1 Mapa 04: *Bosque de latifolias secundario (1)*



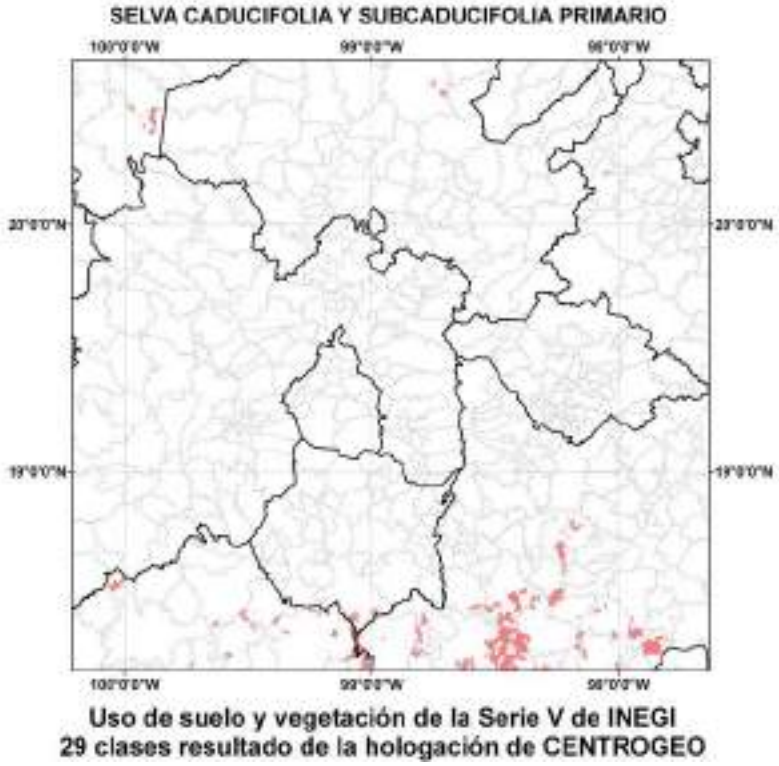
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 05: *Bosque de coníferas-latifolias primario (2)*

Anexo 04, apéndice 1 Mapa 07: *Bosque mesófilo de montaña primario (1)*

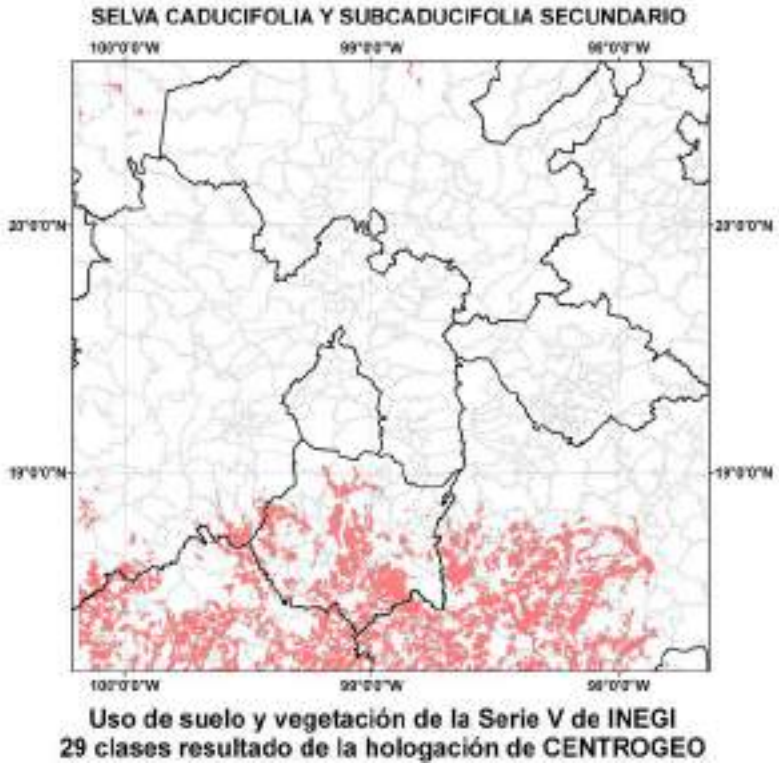


Anexo 04, apéndice 1 Mapa 08: *Bosque mesófilo de montaña secundario (2)*

Anexo 04, apéndice 1 Mapa 10: *Selva perennifolia y subperennifolia secundario (2)*



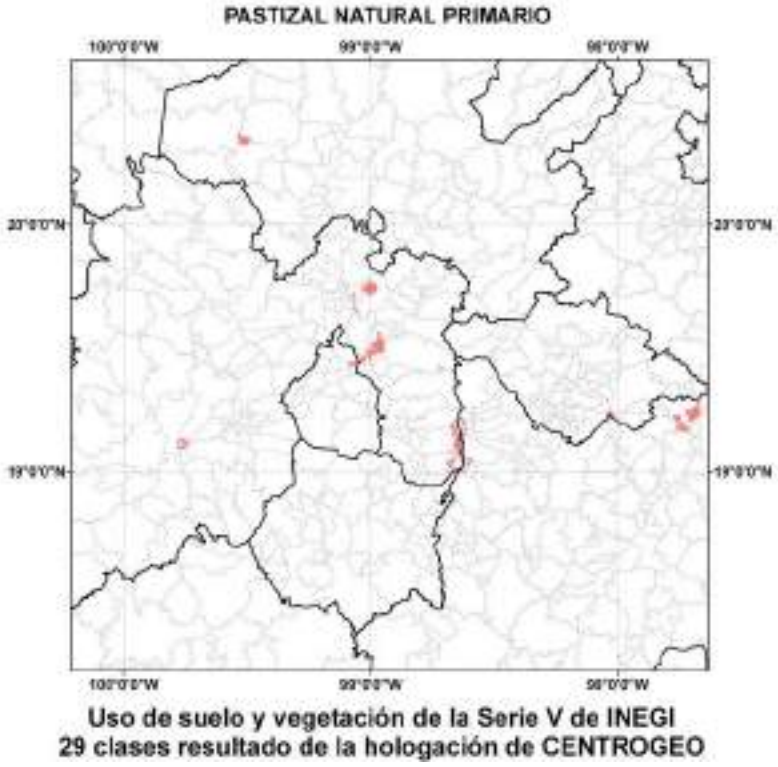
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 11: *Selva caducifolia y subcaducifolia primario (2)*



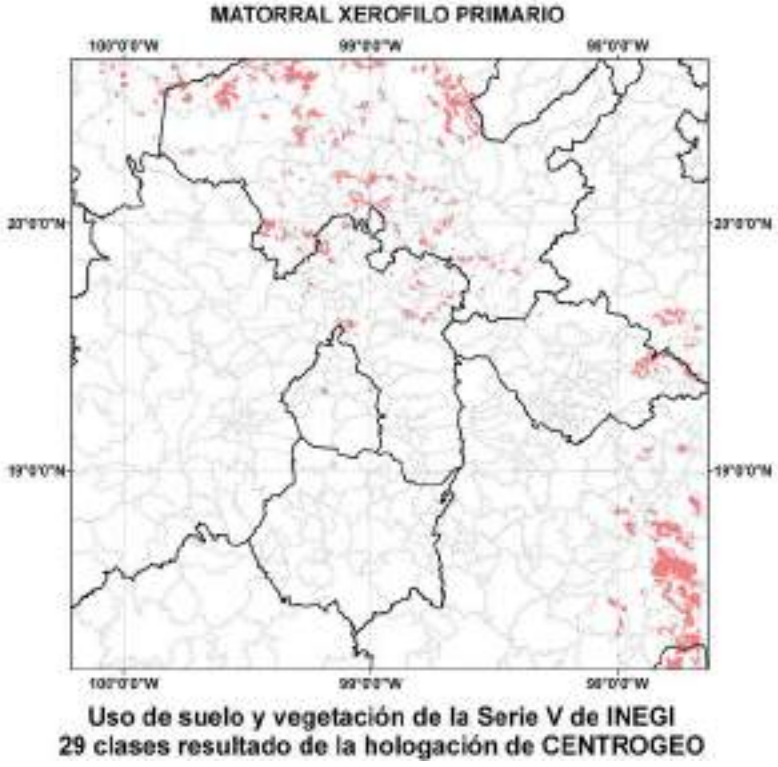
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 12: *Selva caducifolia y subcaducifolia secundario (1)*

Anexo 04, apéndice 1 Mapa 13: *Mezquital primario (1)*

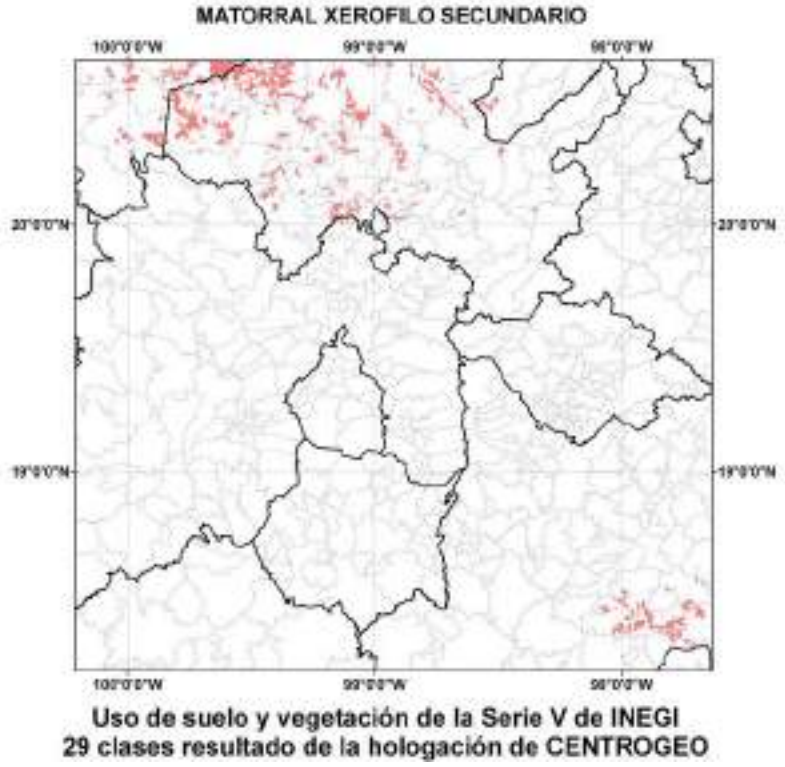
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 14: *Mezquital secundario (2)*



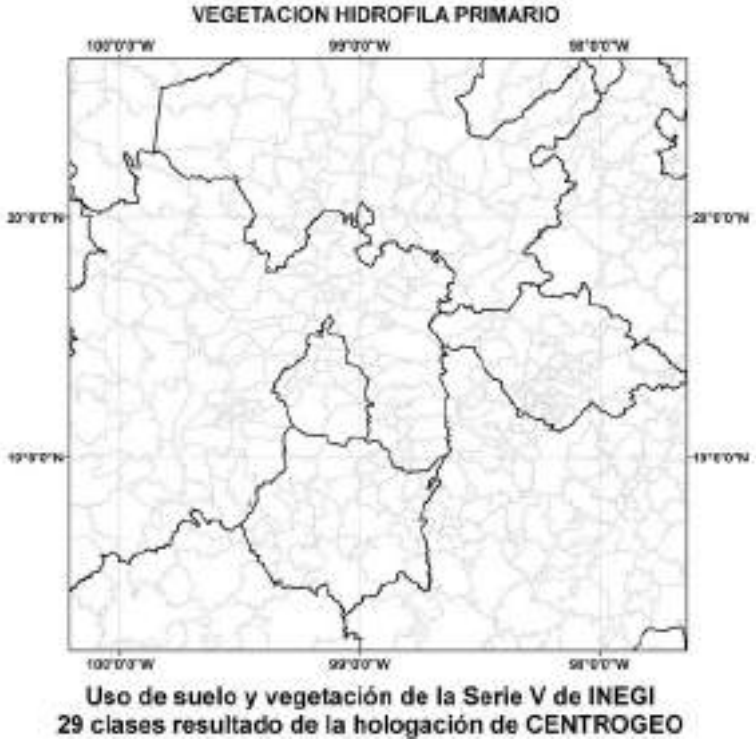
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 15: *Pastizal natural primario (3)*



Anexo 04, apéndice 1 Mapa 17: *Matorral xerófilo primario (3)*

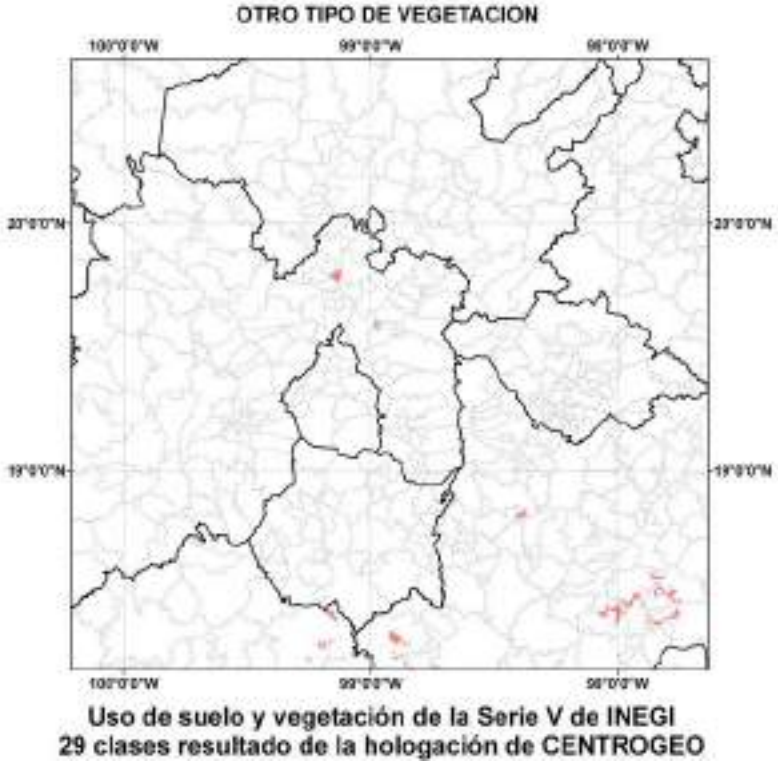


Anexo 04, apéndice 1 Mapa 18: *Matorral xerófilo secundario (1)*



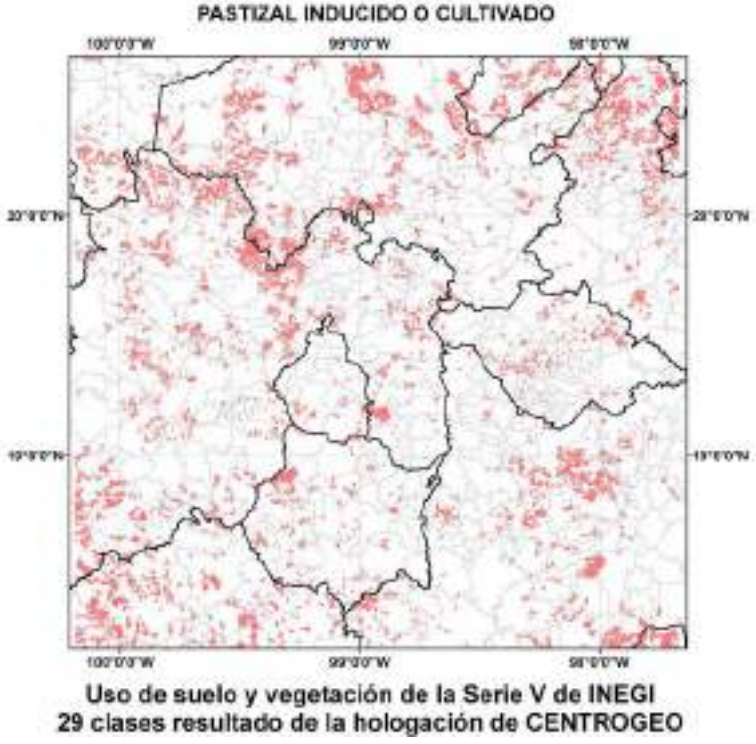
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 19: *Vegetación hidrófila primario (1)*

Anexo 04, apéndice 1 Mapa 20: *Vegetación hidrófila secundario (2)*

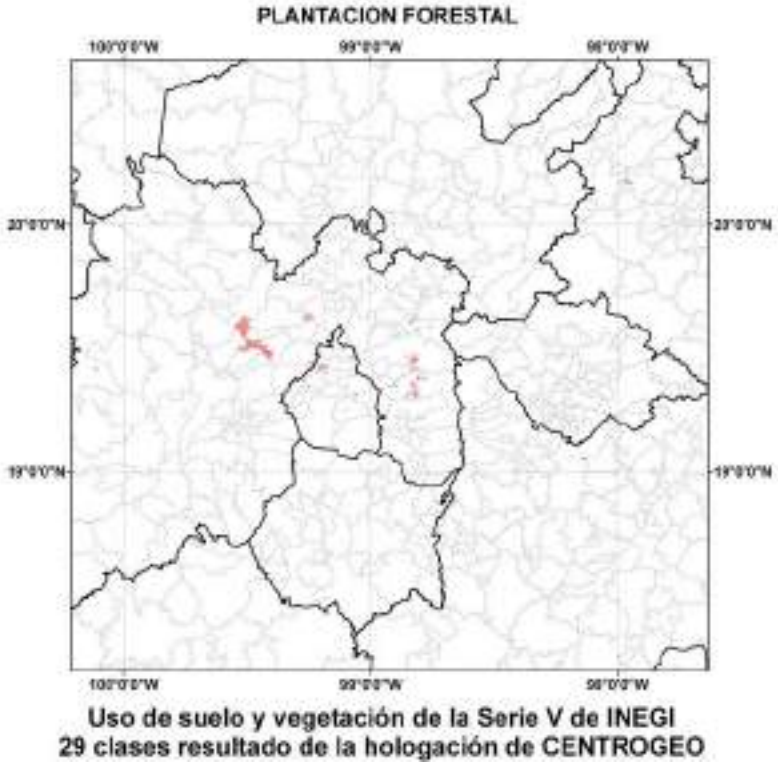


Anexo 04, apéndice 1 Mapa 21: *Otro tipo de vegetación (1)*

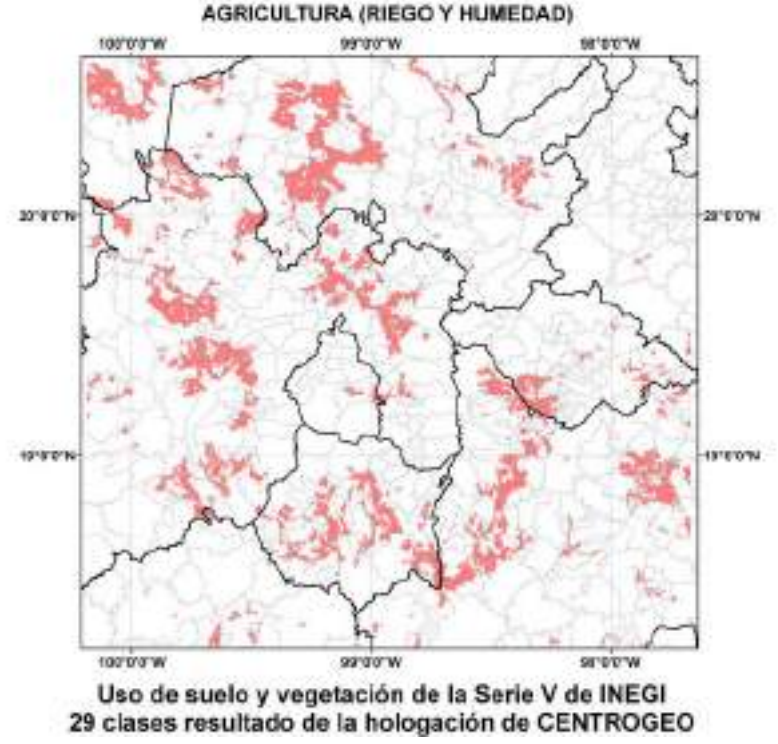
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 22: *Área sin vegetación aparente (2)*



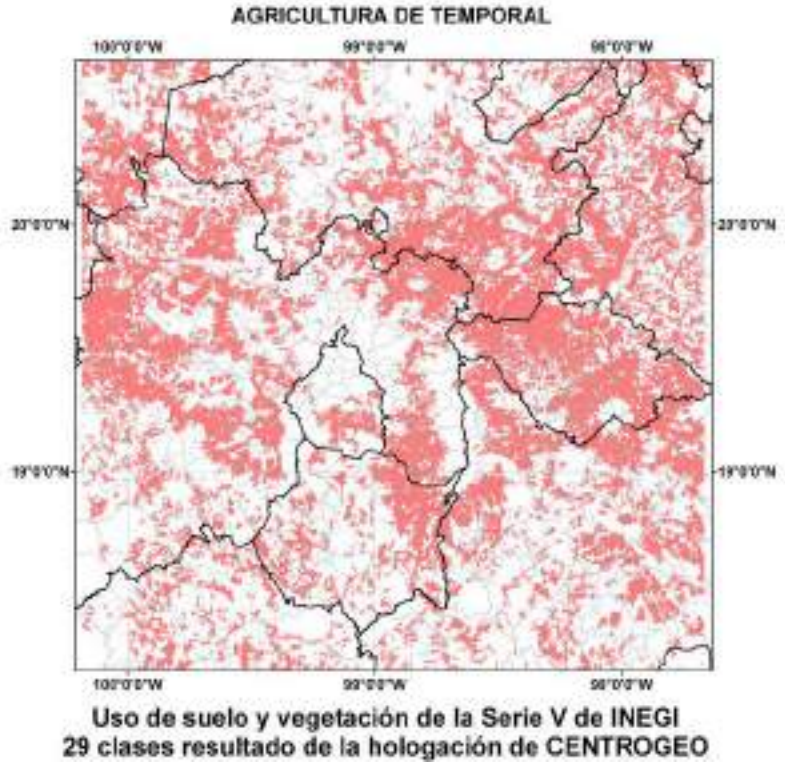
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 22: *Pastizal inducido o cultivado (1)*



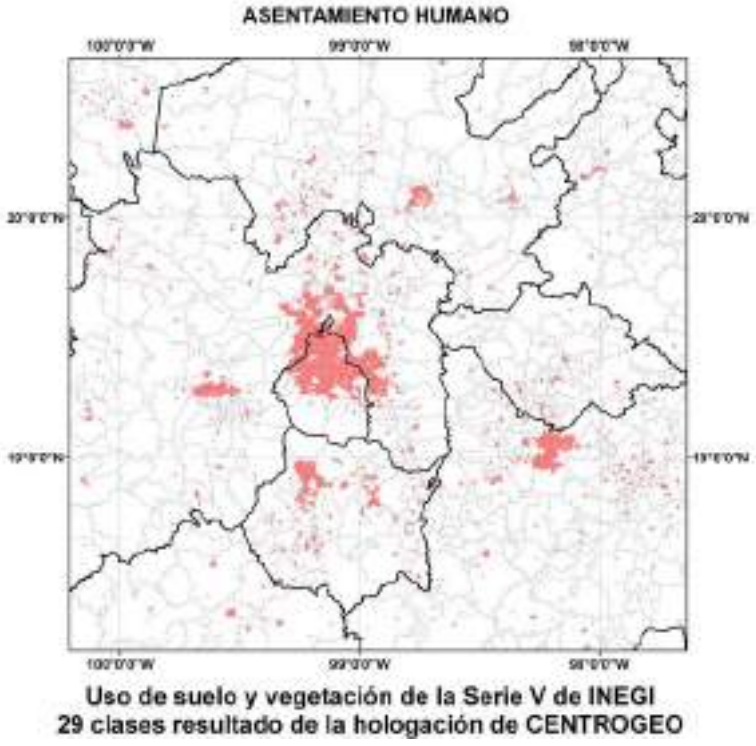
Anexo 04, apéndice 1 Mapa 24: *Plantación forestal (2)*



Anexo 04, apéndice 1 Mapa 25: *Agricultura (riego y humedad) (3)*



Anexo 04, apéndice 1 Mapa 26: *Agricultura de temporal (1)*



Anexo 04, apéndice 1 Mapa 28: *Asentamiento humano (1)*

Anexo 04, apéndice 1 Mapa 29: *Cuerpo de agua (2)*

Anexo 5 ¿Qué podemos aprender de la campaña MILAGRO sobre la calidad del aire en la Corona Regional del Centro de México?

Introducción

El Molina Center for Energy and the Environment (MCE2) ha contribuido en diversas actividades como parte del proyecto Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en el Centro de México (ECAIM). En particular, se revisaron tanto los artículos derivados de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO,[12] como aquellos publicados posteriormente al artículo de reseña de la campaña MILAGRO, y se realizó un análisis de publicaciones con el objetivo de extraer información útil que puede ser relevante para una comprensión preliminar de la calidad del aire en la Corona Regional del Centro de México (CRCM). El MCE2 fue responsable de la organización de las dos reuniones de expertos del proyecto con la colaboración del CCA-UNAM y que se llevaron a cabo en la ciudad de México. Esto incluyó la selección de los expertos nacionales e internacionales que asistieron a las reuniones.

Este reporte final describe las actividades realizadas por el Molina Center:

1) RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA PARA IDENTIFICAR FUENTES DE INFORMACIÓN ÚTIL

Se preparó una lista con las publicaciones y documentos que pueden resultar de mayor relevancia para el proyecto ECAIM. Se revisaron bases de datos de publicaciones científicas y se seleccionaron aquellas que contienen información en los siguientes temas: meteorología, emisiones, compuestos orgánicos volátiles, fotoquímica, aerosoles, propiedades ópticas de aerosoles, salud, política pública, mediciones satelitales, campañas internacionales y modelación regional. Los artículos científicos se derivan principalmente de la campaña MILAGRO y de la campaña MCMA-2003. Asimismo se incluyeron artículos recientes que pueden contribuir al proyecto ECAIM, publicados posterior al artículo de revisión de la campaña MILAGRO en la revista *Atmospheric Chemistry and Physics (ACP)* en 2010.

2) REVISIÓN DE DATOS UTILIZADOS EN PUBLICACIONES DE INTERÉS PARA EL PROYECTO

Se presentó una selección de las bases de datos de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO que pueden resultar de utilidad para el diagnóstico preliminar de la calidad del aire en la CRCM basados en las publicaciones relacionadas con las mediciones obtenidas en las campañas de mediciones. Particularmente, se consideró el número de publicaciones que utilizaron los datos obtenidos en las campañas de monitoreo como parte de la investigación, así como también aquellas que pueden proporcionar mayor información para la calidad del aire regional. Además, se mencionaron brevemente los datos satelitales que pueden resultar de utilidad para el proyecto. Se incluyó una lista de 304 publicaciones relacionadas con la química atmosférica y la calidad del aire en la región central de México. En su mayoría son publicaciones arbitradas, y varias de ellas son parte de las ediciones especiales de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO de la revista *Atmospheric Chemistry and Physics*. Para cada publicación se obtuvieron palabras clave de mediciones experimentales, ubicación, uso de datos satelitales como parte del análisis

[12] Por su siglas en inglés: Megacity Initiative:Local and Global Research Observations.

y modelos numéricos utilizados. Los tipos de mediciones experimentales se clasificaron en categorías representativas: gases criterio, aerosoles, compuestos orgánicos volátiles (COV), meteorología, fase gas, radiación, propiedades ópticas de aerosoles, otros y sin clasificar. Aun cuando el conteo de referencias puede estar sujeto a una posible subestimación, los resultados que se presentan pueden considerarse como un estimado del mínimo de publicaciones que usaron una medición en particular y como tal se recomienda tomarlos como preliminares. No obstante, se considera que la tendencia general que resultó de esta selección puede ser indicativa de la manera en que los datos experimentales se utilizaron en la literatura científica.

3) SELECCIÓN DE EXPERTOS

Como parte del proyecto el Molina Center invitó a expertos nacionales e internacionales con experiencia en las campañas de medición y áreas afines al proyecto a participar en las reuniones que se llevaron a cabo el 10 y 11 de noviembre de 2014 y el 23 y 24 de abril de 2015 en la ciudad de México. Entre los ponentes se contó con la participación de investigadores nacionales (UNAM, INECC, IMTA, IMP, LT Consulting, ITESM campus Toluca y campus Monterrey, INER, CMICA, Colmex y Cinpro), internacionales (MCE2, Saint Louis University, Washington State University, University of Alberta, University of Nevada (Reno) y Singapore-MIT Alliance) y de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (Sedema). Se revisaron y discutieron los hallazgos de proyectos recientes, incluyendo campañas intensivas, el monitoreo de calidad del aire y estudios de modelación que pudieran contribuir al proyecto ECAIM; discutir los avances del proyecto ECAIM y actividades de investigación y opciones de políticas públicas para mejorar la calidad del aire en la CRCM.

4) LECCIONES APRENDIDAS EN LAS CAMPAÑAS DE MEDICIONES

Los principales hallazgos y las lecciones aprendidas de las campañas de medición MCMA-2003 y MILAGRO que pueden ser relevantes para la región de la CRCM se sintetizaron y se presentaron en la segunda reunión de expertos, que se llevó a cabo en la ciudad de México el 23 y 24 de abril del 2015. Se mostraron las recomendaciones basadas en la experiencia del estudio de caso de la ciudad de México que pueden ser de utilidad para la región de la Corona en cuanto a monitoreo, inventarios de emisiones, modelación numérica, estudios de campo y coordinación regional.

El documento se organiza con base en los puntos anteriores. En las secciones 5.1 y 5.2 se presentan los puntos principales que derivaron de la revisión bibliográfica y el análisis de publicaciones antes mencionados. En la sección 5.3 se incluye el resumen de la primera reunión de expertos. En la sección 5.4 se mencionan las lecciones importantes de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO incluyendo las conclusiones y recomendaciones derivadas de las principales lecciones que pueden ser de interés tanto para el proyecto ECAIM como para la calidad del aire en la CRCM. Para fines de claridad, cada Sección incluye las conclusiones y las referencias utilizadas en cada una de ellas. Al final, se incluye el apéndice a la sección 5.2 que lista los acrónimos y categorías utilizados en el análisis de publicaciones respectivo.

5.1 Bibliografía para el proyecto ECAIM

5.1.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se describe temáticamente el estado actual de la investigación utilizando las categorías empleadas en el artículo de revisión de MILAGRO [Molina *et al.,* 2010]: meteorología; emisiones; compuestos orgánicos volátiles (COV); fotoquímica; aerosoles, y propiedades ópticas de aerosoles.

Se enumeran también algunos artículos relacionados con la salud y economía que se centran específicamente en la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM). Al final se incluirán algunas campañas internacionales cuyos resultados podrían ser instructivos para la planificación del ECAIM, y se tomarán en cuenta los artículos que analizaron la contaminación del aire en la escala regional que rodea la ZMVM.

5.1.2 PRINCIPALES CAMPAÑAS DE CAMPO EN LA ZMVM

Debido en gran parte a sus características orográficas, poblacionales y meteorológicas entre otras, la ZMVM ha motivado la realización de diversas campañas de monitoreo. Estos estudios han proporcionado abundante información sobre la calidad del aire en la ZMVM y han dado lugar a cientos de publicaciones arbitradas. Entre ellas, la campaña de medición MILAGRO en marzo de 2006 fue la última gran campaña de campo importante en la ZMVM. La edición especial para esta campaña de campo fue publicada en la revista *Atmospheric Chemistry and Physics* y contiene 130 artículos, y existen además trabajos publicados en otras revistas. El artículo de revisión de MILAGRO [Molina *et al.,* 2010] describe el estado de las publicaciones realizadas hasta el 2010, cuando el número especial contenía 107 artículos; así como de los artículos más relevantes de la campaña precedente, MCMA-2003 [Molina *et al.,* 2007], la cual generó 55 artículos, incluyendo también una edición especial en la revista *Atmospheric Chemistry and Physics*. Desde entonces han habido otros 22 trabajos en la edición especial junto con más artículos en la otra edición especial de megaciudades (también en *Atmospheric Chemistry and Physics*) y en otras revistas. La **Tabla A05-1** resume las principales campañas de campo que han tenido lugar en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Tabla A05-1 Principales campañas de campo en la ciudad de México

Fecha	Campaña de campo	Artículo de revisión
Marzo 2006	MILAGRO *	Molina *et al.*, 2010
	INTEX-B	Singh *et al.*, 2009
	MAX-MEX	
	MIRAGE	
	MCMA-2006	
Abril 2003	MCMA-2003	Molina *et al.*, 2007
feb.-mar. 1997	IMADA-AVER	Edgerton *et al.*, 1999
1990-1994	MARI	Streit y Guzmán, 1996

* La campaña MILAGRO consistió de 4 componentes: INTEXB, MAX-MEX, MIRAGE y MCMA-2006. La campaña INTEX-B fue realizada en dos partes: la primera sobre México y la segunda sobre el Océano Pacífico

5.1.3 METEOROLOGÍA Y DINÁMICA EN LA ZMVM

Debido a que la meteorología es un factor fundamental en la calidad del aire, las campañas de monitoreo necesitan de la interrelación entre mediciones y modelación para comprender de manera más precisa la dinámica atmosférica en la zona de estudio que se considere.

Se han realizado investigaciones extensivas sobre la Isla de Calor Urbano en la ZMVM [Jáuregui, 1997], incluyendo los efectos sobre la humedad y las lluvias [Jáuregui y Romales, 1996; Jáuregui y Tejeda, 1997], así como en la radiación [Jáuregui y Luyando, 1999]. Este trabajo se amplió para incluir simulaciones de efectos urbanos sobre los patrones de viento [A Jazcilevich *et al.,* 2000] y los impactos de los patrones de flujo atmosférico en la calidad del aire dentro de la cuenca [AD Jazcilevich *et al.,* 2003.; Whiteman *et al.,* 2000].

Tras la campaña IMADA-AVER hubo estudios que analizaron la convergencia de los vientos en la cuenca de la ZMVM [JD Fast y Zhong, 1998] y en el flujo canalizado procedente del paso de montaña en el sureste de la cuenca [Doran y Zhong, 2000].

Los episodios de contaminación del aire durante la campaña MCMA-2003 se clasificaron en tres tipos: O3-Norte, O3-Sur y Frente Frio [De Foy *et al.,* 2005]. Los estudios basados en la campaña de campo analizan aún más la convergencia de viento en la cuenca [De Foy *et al.,* 2006a.; AD Jazcilevich *et al.,* 2005] y los patrones de ventilación de la ZMVM [De Foy *et al.,* 2006b].

La campaña MILAGRO tuvo las más extensas mediciones de la meteorología en la ZMVM hasta la fecha [JD Fast *et al.,* 2007]. Perfiladores de viento permitieron la caracterización del transporte de viento entre los supersitios de la campaña [Doran *et al.,* 2007b]. La circulación local en la ZMVM se analizó de acuerdo a los tipos de episodios y se comparó con los patrones de vientos climatológicos [De Foy *et al.,* 2008]. Los diferentes tipos de mediciones contribuyeron a la comprensión del transporte de la contaminación en la cuenca [Greenberg *et al.,* 2009; Melamed *et al.,* 2009; Rogers *et al.,* 2009].

Varios estudios de simulación han investigado el transporte regional de la pluma urbana. Una comparación de las simulaciones con las mediciones y con el transporte de partículas encontró que el modelo WRF caracterizó adecuadamente la pluma urbana [De Foy *et al.,* 2009b]. Este modelo se ha utilizado ampliamente para el análisis de la campaña de campo [Mena-Carrasco *et al.,* 2009; Tie *et al.,* 2009]. También se han utilizado otros modelos en la escala regional, por ejemplo [Emmons *et al.,* 2010].

[Iniestra, 2008] modeló las diferentes cuencas de aire alrededor de la ZMVM como una herramienta para mejorar la gestión de la calidad del aire. Esto es de particular interés para el proyecto ECAIM y se describirá adicionalmente en la sección de estudios regionales.

5.1.4 EMISIONES

Uno de los principales objetivos de la mayoría de las campañas de campo fue el de asistir en la elaboración de inventarios de emisiones, tanto en la evaluación de su exactitud como en la exploración de nuevas formas de mejora. Éstos han sido ampliamente documentados en los artículos de revisión de la campaña de campo MCMA-2003 [Molina *et al.,* 2007] y MILAGRO [Molina *et al.,* 2010].

La Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal de México (Sedema-GDF), actualiza su inventario de emisiones de cada 2 años. Los últimos informes están disponibles para el año 2010 para los contaminantes criterio [Sedema-GDF, 2012a], contaminantes tóxicos en el aire [Sedema-GDF, 2012b] y de gases de efecto invernadero y carbono negro [Sedema-GDF, 2012c]. A nivel nacional, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) publicó un inventario nacional de emisiones para el año 1999 [Semarnat, 2006]. El inventario de emisiones ya se ha actualizado para 2005 y 2008. [CEC, 2009] proporciona una evaluación integral de los inventarios de emisiones en América del Norte, e incluye una descripción más detallada de los inventarios de emisiones que se desarrollaron para México.

Un número de estudios han abordado las emisiones después de los revisados en [Molina *et al.,* 2010]. [Zavala *et al.,* 2013] analizó a las emisiones de PM2.5 de fuentes vehiculares que circulan por carretera. [Zalakeviciute *et al.,* 2012] utilizó mediciones de covarianza turbulenta para estimar las emisiones de aerosoles. [Yokelson *et al.,* 2011] estimó las emisiones de gases traza y partículas a partir de mediciones en el aire. [Stremme *et al.,* 2013] utilizó mediciones de FTIR para restringir aún más el inventario de emisiones de monóxido de carbono. [De Foy *et al.,* 2011] utilizaron mediciones de la LIDAR de alta resolución espectral (HSRL) para identificar los diferentes tipos de aerosoles en los alrededores de la cuenca de la ZMVM.

Los estudios de modelación proporcionan una valiosa manera de evaluar las emisiones de diferentes tipos de fuentes, comparando resultados de la simulación con mediciones específicas. [Hodzic *et al.,* 2012] evaluaron el impacto de la quema de basura y [Lei *et al.,* 2013] el impacto de la quema de biomasa. [Tsimpidi *et al.,* 2011] evaluaron tanto las fuentes como la producción de aerosoles orgánicos mediante el uso de MP-CAM$_x$. [Almanza *et al.,* 2012] utilizaron un modelo para simular las emisiones en quemadores elevados industriales y su impacto en la ZMVM.

5.1.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Un amplio conjunto de mediciones de compuestos orgánicos volátiles (COV) se han obtenido para la ZMVM y han contribuido a la comprensión de sus niveles de concentración, distribución espacial, patrones diurnos, reactividad, así como su participación en la formación de ozono y de aerosoles orgánicos secundarios [Velasco *et al.,* 2007]. [Fortner *et al.,* 2009] resumen

los principales resultados de la utilización de PTR-MS para la medición de los COV en la ZMVM.

Por ejemplo, el metanol presentó la mayor concentración promedio y las emisiones nocturnas de tolueno fueron importantes alrededor del supersitio T0. [Velasco *et al.,* 2005] utilizó mediciones de COV seleccionados empleando la técnica de covarianza turbulenta para evaluar los inventarios de emisiones de estas especies, resultando en una similitud razonable de olefinas y CO_2, y una sobreestimación de C2 y de emisiones de tolueno. Los perfiles verticales de compuestos orgánicos volátiles también se han obtenido con un globo cautivo, mostrando que dentro de la capa de 200 m la variabilidad en la concentración es similar a la variabilidad observada a partir de mediciones a nivel de superficie [Velasco *et al.,* 2008]. [Apel *et al.,* 2010] calcularon la reactividad del OH durante el día y estudiaron su distribución diurna utilizando mediciones de COV. [De Gouw *et al.,* 2009] y [Bon *et al.,* 2011] midieron COV en un supersitio suburbano. En el primero se estudia la influencia de la quema de biomasa y en el segundo las emisiones utilizando el método de PMF. [Karl *et al.,* 2009] utiliza las mediciones de flujo de COV obtenidas en aeronaves para compararlas con los inventarios de emisiones actuales.

5.1.6 FOTOQUÍMICA

Aparte de los COV, las mediciones de precursores importantes se obtuvieron para la ZMVM: formaldehído (HCHO), hidroxilo (OH), hidroperoxilo, glioxal y reactividad del OH [Dusanter *et al.,* 2009; Shirley *et al.,* 2006; Volkamer *et al.,* 2007; Volkamer *et al.,* 2005; Volkamer *et al.,* 2010]. Estos estudios han encontrado: diferencias en las concentraciones de HOx entre las campañas MCMA-2003 y MILAGRO, diferencias en la tasa de producción de ozono, y han utilizado las observaciones para restringir modelos de caja que analizan el balance de radicales y poder inferir sobre la fotólisis del HCHO y ácido nitroso (HONO). [Li *et al.,* 2010] encontró que el HONO aumenta las concentraciones de ozono y de aerosoles orgánicos secundarios en la ZMVM.

[Wood *et al.,* 2009] reportaron que la tasa de producción de ozono en una masa de aire estancada fue uno de las más altas en el mundo, siendo principalmente limitado por COV. [Song *et al.,* 2010] sugieren que las regiones montañosas de la cuenca son limitadas por NO_x, lo que también puede ser el resultado del envejecimiento de la pluma [Lei *et al.,* 2008]. Así, además de considerar la meteorología, las estrategias de control de emisiones se beneficiarían al incluir la ubicación dentro de la ZMVM donde se aplicarían. [Zavala *et al.,* 2009] realizaron un análisis de sensibilidad basado en el trabajo de [Lei *et al.,* 2007] de todas las fuentes móviles y antropogénicas de COV y óxidos de nitrógeno (NO_x), y sus resultados sugieren que la producción de ozono ha cambiado de régimen de un mínimo a un máximo de sensibilidad por COV en un período de 20 años. [Zhang *et al.,* 2009] informaron de una similitud razonable entre las concentraciones de COV modeladas y las observadas en la ZMVM.

Las simulaciones de ozono pueden beneficiarse con la inclusión de la asimilación variacional de datos y técnicas por "ensambles" para mejorar el tiempo cuando ocurre el pico de alta concentración durante episodios de ozono en la cuenca [Bei *et al.,* 2008.; Bei *et al.,* 2010]. Enfoques estadísticos también pueden contribuir con ideas en el comportamiento de las excedencias de ozono [Achcar *et al.,* 2011].

5.1.7 AEROSOLES

Al igual que con los COV, también se obtuvieron mediciones para estudiar las partículas en la ZMVM: aerosoles orgánicos, incluyendo levoglucosan [Aiken *et al.,* 2007; de Gouw *et al.,* 2009]; quema de biomasa y carbono orgánico [Moffet *et al.,* 2008]; aerosoles inorgánicos [Rutter *et al.,* 2009]; Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en fase partícula [Marr *et al.,* 2006; Thornhill *et al.,* 2008]; y aerosoles no refractarios [DeCarlo *et al.,* 2008] por ejemplo.

Respecto a estudios de modelación que consideran formación de aerosoles se encuentran los trabajos de [Tsimpidi *et al.,* 2011; Tsimpidi *et al.,* 2010] que aplicaron el método basado en volatilidad para estudiar la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA). [Karydis *et al.,* 2011] estudiaron los principales componentes de aerosoles inorgánicos incluyendo la contribución de plantas cementeras y la refinería de Tula. [Li *et al.,* 2012] encontraron que al incluir emisiones por quema de basura, las simulaciones de cloro en fase partícula mejoraron significativamente. Continuando su trabajo previo, [Bei *et al.,* 2012] demostraron que al incluir asimilación variacional de datos y técnicas por "ensambles", la concentración de SOA mejoró de manera importante. [J Fast *et al.,* 2009] estudiaron la incertidumbre en aerosoles primarios orgánicos modelados para una posterior evaluación de SOA considerando aerosoles antropogénicos y por quema de biomasa. [Stone *et al.,* 2008] aplicaron el análisis de balance químico de masa (CMB por sus siglas en Inglés) por marcador molecular, para determinar la contribución relativa de las principales fuentes de emisión en los aerosoles orgánicos en modo fino, encontrando que los vehículos automotores representaron una de las mayores contribuciones en el ambiente urbano. [San Martini *et al.,* 2006a; San Martini *et al.,* 2006b] utilizaron el algoritmo de Cadenas de Markov por Método Montecarlo para analizar las concentraciones de aerosoles inorgánicos y precursores en fase gas.

5.1.8 PROPIEDADES ÓPTICAS DE AEROSOLES

Los aerosoles ejercen una influencia importante en la salud humana y en el balance radiativo del planeta. [Adachi y Buseck, 2008] usaron muestras aéreas recolectadas por la aeronave C-130 para estudiar el recubrimiento de partículas de hollín y sus resultados sugirieron que efectos tanto positivos como negativos en el forzamiento radiativo son factibles. [Marley *et al.,* 2009] midieron la absorción y dispersión de aerosoles finos y encontraron

que, en la ciudad, altos niveles de dispersión se relacionan con una rápida formación de SOA, mientras que en la periferia la relación es más con cambios en la capa límite. Asimismo, obtuvieron estimados del albedo por dispersión simple (SSA por sus siglas en Inglés), que presentaron una magnitud reducida indicando que la presencia de aerosoles con gran capacidad de absorción en la capa límite puede estar contribuyendo al efecto de isla calor. La quema de biomasa también presentó una contribución importante. Las mediciones de [Baumgardner *et al.,* 2009] en un sitio de monitoreo ubicado en una zona de montaña mostraron una correlación entre la dispersión y la materia orgánica en fase partícula. [De Almeida Castanho *et al.,* 2007] aplicaron un modelo óptico de aerosoles específico para México y datos satelitales para obtener el espesor óptico de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés). [Doran *et al.,* 2007a] encontraron que la absorción específica de carbono elemental fue más elevada fuera de la ciudad, sugiriendo la presencia de partículas envejecidas como producto del transporte de la pluma de la ciudad de México. [Paredes-Miranda *et al.,* 2009] aplicaron la factorización por matriz positiva (PMF por sus siglas en inglés) para cuantificar aerosoles orgánicos oxigenados. Además estudiaron el comportamiento diurno del SSA el cual indicó que desde el amanecer, la formación de SOA comienza a afectar el forzamiento radiativo. Recientemente, [Paredes-Miranda *et al.,* 2013] compararon la variación diaria de los coeficientes de absorción y dispersión de carbono negro en cinco principales ciudades en el mundo y encontraron que la ciudad de México presentó los valores más elevados.

5.1.9 SALUD

El efecto nocivo de los efectos de la contaminación atmosférica ha sido bien documentado [Pope *et al.,* 2009] y estudios más recientes se han enfocado en los impactos de componentes individuales de aerosoles, por ejemplo [Janssen *et al.,* 2011]. El artículo de revisión de la campaña MILAGRO [Molina *et al.,* 2010] contiene una sección que describe el estado de la ciencia sobre investigación en salud concerniente a la ZMVM hasta el año 2010.

En una escala regional, han habido esfuerzos para usar datos satelitales para conjuntar la parte de contaminación atmosférica con la distribución geográfica de efectos en salud, lo cual puede ser relevante para el proyecto ECAIM [Anderson *et al.,* 2012; Gutiérrez, 2010].

Hay una serie de estudios de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud y ecosistemas en la región que rodea a la ZMVM. [Hudson, 2006] analizaron el efecto de la contaminación en la función olfativa de un grupo de personas de la ciudad de México y Tlaxcala. [De Bauer y Hernández-Tejeda, 2007] revisaron los efectos de la contaminación de ozono en los bosques ubicados en la región central de México. [Bell *et al.,* 2011] hicieron una revisión sobre el uso de indicadores ambientales en salud usando dieciséis ciudades de Latinoamérica como caso de estudio. [Jiménez-Garza *et al.,* 2012] estudiaron la salud ocupacional de trabajadores expuestos a bajos

niveles de tolueno. [Rosas Pérez *et al.,* 2007] realizaron un estudio para analizar la toxicidad de la composición de las partículas en la ciudad de México. [Melgar-Paniagua *et al.,* 2013; Melgar-Paniagua *et al.,* 2010] consideraron los impactos en salud de la región industrial de Tula. [Tovalin-Ahumada y Whitehead, 2007; Tovalin-Ahumada *et al.,* 2007] reportaron estimados de exposición personal a COV y $PM_{2.5}$ tanto en Puebla como en la ciudad de México. Finalmente, [Crawford-Brown *et al.,* 2012] estimaron los co beneficios por cambios en ozono y aerosoles que pudieran ser resultado de acciones en material de cambio climático.

5.1.10 POLÍTICAS PÚBLICAS

Proaire 2011-2020, [Cofepris, 2011], es el documento de planificación utilizado para administrar la calidad del aire en la ZMVM. En un volumen editado, [Eibenschutz, 2010] explora diferentes aspectos de los retos que enfrenta la ZMCM así como su desarrollo a futuro.

Varios estudios consideran el impacto en la calidad el aire como resultado de políticas públicas en materia de transporte. [Davis, 2008] evaluó el efecto de las restricciones en conducción, [A D Jazcilevich *et al.,* 2011] analizaron el impacto de una posible adopción de vehículos híbridos en la ZMVM y [Gallego *et al.,* 2013] evaluaron el impacto de diferentes políticas públicas en Latinoamérica. [Parry y Timilsina, 2010] consideraron estrategias tarifarias para transporte de pasajeros que pudieran reducir tanto la contaminación del aire como la congestión vehicular.

El desarrollo del Sistema de Transporte Rápido de Autobuses fue uno de los aspectos principales del Proaire. Este ha sido aplicado exitosamente a lo largo de Latinoamérica [Mejía-Dugand *et al.,* 2013] y el mundo [Deng y Nelson, 2011]. [Wohrnschimmel *et al.,* 2008; Wohrnschimmel *et al.,* 2006] estudiaron el impacto de éste Sistema de Transporte en la exposición de pasajeros a contaminantes.

En términos de estudios de política pública, [Barker *et al.,* 2010] consideraron la integración de acciones en materia de cambio climático y estrategias en calidad del aire para México. [Butler *et al.,* 2012] evaluaron los impactos por cambios de emisiones en megaciudades en la contaminación atmosférica global y viceversa. [Carbajal-Hernández *et al.,* 2012] desarrollaron un sistema para evaluar y predecir impactos en la calidad del aire que podrían ser usados en modelos de políticas públicas.

5.1.11 MEDICIONES REMOTAS CON SATÉLITES

Los sensores satelitales proveen una manera viable de analizar la contaminación atmosférica regional mediante el monitoreo de grandes dominios regionales en periodos cortos. [Streets *et al.,* 2013] realizaron una reseña sobre el uso de satélites para estimar emisiones. Como ejemplo, [Boersma *et al.,* 2008] describe el uso de columnas de dióxido de nitrógeno (NO_2) obtenidas con el satélite OMI para estimar emisiones en México. Estas columnas

también se utilizaron en conjunto con mediciones in-situ para estimar emisiones del Complejo Industrial de Tula [Rivera *et al.,* 2013], y para comparar con simulaciones de dióxido de azufre (SO_2) [De Foy *et al.,* 2009a]. También se observaron aerosoles y monóxido de carbono sobre la ciudad de México [Massie *et al.,* 2006].

5.1.12 CAMPAÑAS INTERNACIONALES DE MEDICIÓN

Fuera de la ciudad de México, se han realizado también campañas importantes de medición en megaciudades alrededor del mundo. Algunas de ellas se listan en la **Tabla A05-2** junto con el nombre de la revista que contiene la edición especial de las publicaciones derivadas de las mismas.

5.1.13 ESTUDIOS REGIONALES ALREDEDOR DE LA ZMVM

[García Reynoso, 2009] brinda información detallada sobre el uso del modelo MCCM para identificar cuencas atmosféricas alrededor de la ZMVM y estimar su capacidad de transporte de diferentes contaminantes. El modelo también es utilizado para caracterizar el transporte y la interacción de diferentes cuencas atmosféricas que están en cercanía una con la otra. Resultados adicionales pueden encontrarse en diversas presentaciones: [Caetano, 2009; Pérez Sesma, 2012; UNAM, 2009].

Como parte de la campaña MILAGRO, algunos artículos tuvieron un mayor enfoque en el transporte de la contaminación en la región central de México. [Doran *et al.,* 2007b] caracterizaron el transporte de la pluma de la ZMVM hacia el norte pasando los supersitios de la campaña con el uso de perfiladores de viento. [Rutter *et al.,* 2009] estudiaron el transporte de mercurio reactivo por fuentes puntuales en y alrededor de la ciudad de México. En una escala más grande, [Voss *et al.,* 2010] utilizaron globos a control remoto para seguir plumas de la ZMVM en un periodo de 48 horas.

Algunos estudios se enfocaron en la quema de biomasa a escala regional. [Crounse *et al.,* 2009] identificaron plumas de quema de biomasa en la región central de México a partir de mediciones obtenidas con la aeronave C-130. [Barrera *et al.,* 2012] analizaron las emisiones de quema de biomasa así como de otros compuestos de PM_{10} en la región que rodea a la ZMVM. [Christian *et al.,* 2010] examinaron las emisiones de gases traza y partículas de quemas antropogénicas, tanto de fuentes industriales como domésticas. Dos investigaciones se enfocaron en el envejecimiento de los aerosoles en la pluma urbana. [Jolleys *et al.,* 2012] estudiaron el envejecimiento de plumas de quema de biomasa, mientras que [Moffet *et al.,* 2010] se enfocaron en el envejecimiento de la pluma urbana. Asimismo, algunas investigaciones realizaron estudios de modelación a escala regional [Emmons *et al.,* 2010; Lei *et al.,* 2013; Mena-Carrasco *et al.,* 2009].

Tabla A05-2 Campañas internacionales de medición y ediciones especiales sobre megaciudades

Campañas de Monitoreo Internacionales que pueden ser de interés:			
Fecha	**Ubicación**	**Campaña de medición**	**Edición especial**
2013	USA (West)	SEAC4RS	
2013	Alabama, USA	SOAS	
2010, 2011	Colorado, USA	BEACHON ROCS, RoMBAS	ACP *
2010	California, USA	CalNex	
2010	Baja California, México	Cal-Mex 2010	AE *
2009, 2010	Paris	Megapoli	ACP
2006, 2007 200 8	Beijing	CAREBeijing	ACP
2006, 2007	London	REPARTEE I, II	ACP
2006	Texas, USA	TexAQS	
2006	Pearl River Delta	PRIDE-PRD	ACP
Ediciones especiales con énfasis en megaciudades:			
2011-2013	ACP	Megacities: air quality and climate impacts from local to global scales	
	ACP	Atmospheric Impacts of Eastern Asia Megacities	

**ACP: Atmospheric Chemistry and Physics; AE: Atmospheric Environment.*

El volcán Popocatépetl es una fuente importante de SO_2 y aerosoles que conllevan un impacto regional. [De Foy *et al.,* 2009a] estudiaron los impactos del volcán en la ZMVM. [Grutter *et al.,* 2008] emplearon técnicas de medición remota para estimar emisiones y considerar los impactos tanto en la ZMVM como en regiones circunvecinas: Puebla al este y Cuautla al sur. Previo a estas investigaciones, [Juárez *et al.,* 2005] estimaron la contribución del volcán en la contaminación del aire en Puebla.

Al norte de la ZMVM se ubica el Complejo Industrial de Tula, el cual es una fuente significativa de contaminantes atmosféricos. Las emisiones en esa zona se estimaron utilizando un sistema móvil mini-DOAS. [Rivera *et al.,* 2009] y también los impactos en la ZMVM para episodios específicos durante MILAGRO [De Foy *et al.,* 2009a]. Un estudio más detallado se enfocó en las emisiones de quemadores elevados y su contribución en los niveles de contaminación en los supersitios de MILAGRO [Almanza *et al.,* 2012; Almanza *et al.,* 2014]. Una mayor caracterización de las emisiones y del transporte de la pluma se presentó en dos diferentes publicaciones: [García-Escalante, 2014; Sosa *et al.,* 2013]. [Rivera *et al.,* 2013] evaluaron las emisiones con datos de NO_2 obtenidos con columnas satelitales y modelaron el transporte de la pluma hacia la ZMVM en un área que abarcó hasta Cuernavaca. También se utilizaron biomonitores para identificar los impactos por las plumas provenientes de Tula [Garcia *et al.,* 2009; Martinez-Carrillo *et al.,* 2011; Martinez-Carrillo *et al.,* 2010a; Martinez-Carrillo *et al.,* 2010b; Martinez-Carrillo *et al.,* 2010c; Zambrano García *et al.,* 2009].

La ZMVM está rodeada por Toluca, Méx., al oeste; Puebla al este, y Cuernavaca, Mor., al sur. [Romero Guzman *et al.,* 2007] estudiaron la contaminación atmosférica en Toluca y [García-Reynoso *et al.,* 2009] consideraron

un caso cuando se supuso que las emisiones de Toluca influenciaron la calidad del aire en la ZMVM. [Ruiz Suarez, 2012] presentó resultados de mediciones de la calidad del aire en Puebla y [Ramos-Aguilar, 2013] analizó observaciones meteorológicas. [Osorio, 2011] realizó un estudio preliminar para el desarrollo de un sistema de apoyo para toma de decisiones en calidad del aire. [Salcedo *et al.,* 2012] estudiaron la calidad del aire en el estado de Morelos. En un área de estudio más distante, [Marquez *et al.,* 2005] estudiaron el transporte de la pluma de la ZMVM hacia el Pico de Orizaba, un volcán extinto, alrededor de 250 km al este.

5.1.14 LISTA DE EXPERTOS

Con base en su participación y experiencia en las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO-2006, así como en áreas afines al proyecto, los investigadores que fueron invitados por la Dra. Luisa Molina y que asistieron a las reuniones de expertos se listan en la **Tabla A05-3**.

Tabla A05-3 Lista de expertos

Expertos	Afiliación
Angélica Velázquez	Cinpro
Luis Jaime Sobrino	Colegio de México
Désirée Larenas Linnemann	Colegio Mexicano de Inmunología Clínica y Alergia
Anne Hansen	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Gustavo Sosa	Instituto Mexicano del Petróleo
Luis Terán Juárez	Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias
Gerardo Mejía	ITESM Monterrey
José Huertas	ITESM Toluca
Dzoara Tejeda	LT Consulting
Victor Almanza	Molina Center for Energy and the Environment / MIT
Luisa Molina	Molina Center for Energy and the Environment
Miguel Zavala	Molina Center for Energy and the Environment
Benjamin de Foy	Saint Louis University
Antonio Mediavilla	Sedema
Armando Retama	Sedema
Erik Velasco	Singapore-MIT Alliance for Research and Technology
Dara Salcedo	UNAM Querétaro
Álvaro Osornio	University of Alberta
Patrick Arnott	University of Nevada, Reno
Guadalupe Paredes	University of Nevada, Reno
Brian Lamb	Washington State University

5.1.15 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se incluye una lista de 145 publicaciones que pueden contribuir al proyecto ECAIM. De manera general, se incluyen estudios que abarcan en la manera de lo posible investigaciones en los Estados de la República Mexicana que conforman la CRCM y que pueden proporcionar información importante relacionada con el proyecto: estudios que consideraron mediciones experimentales, salud y modelación regional tanto del aspecto meteorológico como del aspecto químico en la región Central de México. Debido a que una continua revisión bibliográfica en todas las etapas del proyecto es fundamental, se considera que los trabajos aquí presentados pueden servir para ahondar y complementar en aspectos específicos que se requieran conforme se desarrolle el proyecto.

Lista de artículos

1. Achcar, J. A., D. E. F. Sousa, E. R. Rodrigues, and G. Tzintzun (2011), Comparing the Number of Ozone Exceedances in Different Seasons of the Year in Mexico City, *Environmental Modeling & Assessment,* 16(3), 251-264, doi:10.1007/s10666-010-9245-z.
2. Adachi, K., and P. R. Buseck (2008), Internally mixed soot, sulfates, and organic matter in aerosol particles from Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(21), 6469-6481.
3. Aiken, A. C., P. F. DeCarlo, and J. L. Jimenez (2007), Elemental analysis of organic species with electron ionization high-resolution mass spectrometry, *Analytical Chemistry,* 79(21), 8350-8358, doi:10.1021/ac071150w.
4. Almanza, V. H., L. T. Molina, and G. Sosa (2012), Soot and SO2 contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(21), 10583-10599, doi:10.5194/acp-12-10583-2012.
5. Almanza, V. H., Molina, L. T., Li, G., Fast, J., and Sosa, G. (2014), Impact of external industrial sources on the regional and local SO2 and O3 levels of the Mexico megacity, *Atmos. Chem. Phys.,* 14, 8483-8499, doi:10.5194/acp-14-8483-2014.
6. Anderson, H. R., *et al.,* (2012), Satellite-based Estimates of Ambient Air Pollution and Global Variations in Childhood Asthma Prevalence, *Environmental Health Perspectives*, 120(9), 1333-1339, doi:10.1289/ehp.1104724.
7. Apel, E. C., *et al.,* (2010), Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(5), 2353-2375.
8. Barker, T., A. Anger, O. Dessens, H. Pollitt, H. Rogers, S. Scrieciu, R. Jones, and J. Pyle (2010), Integrated modelling of climate control and air pollution: Methodology and results from one-way coupling of an energy-environment-economy (E3MG) and atmospheric chemistry model (p-TOMCAT) in decarbonising scenarios for Mexico to 2050, *Environmental Science & Policy*, 13(8), 661-670, doi:10.1016/j.envsci.2010.09.008.
9. Barrera, V. A., J. Miranda, A. A. Espinosa, J. Meinguer, J. N. Martinez, E. Ceron, J. R. Morales, P. A. Miranda, and J. F. Dias (2012), Contribution of Soil, Sulfate, and Biomass Burning Sources to the Elemental Composition of PM10 from Mexico City, *International Journal of Environmental Research*, 6(3), 597-612.
10. Baumgardner, D., M. Grutter, J. Allan, C. Ochoa, B. Rappenglueck, L. M. Russell, and P. Arnott (2009), Physical and chemical properties of the regional mixed layer of Mexico's Megapolis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5711-5727.
11. Bei, N., B. de Foy, W. Lei, M. Zavala, and L. T. Molina (2008), Using 3DVAR data assimilation system to improve ozone simulations in the Mexico City basin, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(24), 7353-7366.
12. Bei, N., W. Lei, M. Zavala, and L. T. Molina (2010), Ozone predictabilities due to meteorological uncertainties in the Mexico City basin using ensemble forecasts, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(13), 6295-6309, doi:10.5194/acp-10-6295-2010.
13. Bei, N., G. Li, and L. T. Molina (2012), Uncertainties in SOA simulations due to meteorological uncertainties in Mexico City during MILAGRO-2006 field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(23), 11295-11308, doi:10.5194/acp-12-11295-2012.

14. Bell, M. L., L. A. Cifuentes, D. L. Davis, E. Cushing, A. G. Telles, and N. Gouveia (2011), Environmental health indicators and a case study of air pollution in Latin American cities, *Environmental Research,* 111(1), 57-66, doi:10.1016/j.envres.2010.10.005.
15. Boersma, K. F., *et al.,* (2008), Validation of OMI tropospheric NO2 observations during INTEX-B and application to constrain NOx emissions over the eastern United States and Mexico, *Atmospheric Environment,* 42(19), 4480-4497, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.02.004.
16. Bon, D. M., *et al.,* (2011), Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(6), 2399-2421, doi:10.5194/acp-11-2399-2011.
17. Butler, T. M., Z. S. Stock, M. R. Russo, H. van der Gon, and M. G. Lawrence (2012), Megacity ozone air quality under four alternative future scenarios, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(10), 4413-4428, doi:10.5194/acp-12-4413-2012.
18. Caetano, E. (2009), *Identificación de cuencas atmosféricas en México,* edited by R. Iniestra, Mexico.
19. Carbajal-Hernandez, J. J., L. P. Sanchez-Fernandez, J. A. Carrasco-Ochoa, and J. F. Martinez-Trinidad (2012), Assessment and prediction of air quality using fuzzy logic and autoregressive models, *Atmospheric Environment,* 60, 37-50, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.004.
20. CEC (2009), Comprehensive Assessment of North American Air Emissions Inventories and Ambient Air Monitoring NetworksRep., Commission for Environmental Cooperation of North America.
21. Christian, T. J., R. J. Yokelson, B. Cardenas, L. T. Molina, G. Engling, and S. C. Hsu (2010), Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2), 565-584.
22. Cofepris;, S. S. S. (2011), Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico 2011-2020Rep.
23. Crawford-Brown, D., T. Barker, A. Anger, and O. Dessens (2012), Ozone and PM related health co-benefits of climate change policies in Mexico, *Environmental Science & Policy*, 17, 33-40, doi:10.1016/j.envsci.2011.12.006.
24. Crounse, J. D., *et al.,* (2009), Biomass burning and urban air pollution over the Central Mexican Plateau, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4929-4944.
25. Davis, L. W. (2008), The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City, *Journal of Political Economy*, 116(1), 38-81, doi:10.1086/529398.
26. De Almeida Castanho, A. D., R. Prinn, V. Martins, M. Herold, C. Ichoku, and L. T. Molina (2007), Analysis of Visible/SWIR surface reflectance ratios for aerosol retrievals from satellite in Mexico City urban area, *Atmos. Chem. Phys.*, 7(20), 5467-5477, doi:10.5194/acp-7-5467-2007.
27. De Bauer, M. D., and T. Hernandez-Tejeda (2007), A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico, *Environmental Pollution*, 147(3), 446-453, doi:10.1016/j.envpol.2006.12.020.
28. De Foy, B., S. P. Burton, R. A. Ferrare, C. A. Hostetler, J. W. Hair, C. Wiedinmyer, and L. T. Molina (2011), Aerosol plume transport and transformation in high spectral resolution LIDAR measurements and WRF-Flexpart simulations during the MILAGRO Field Campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(7), 3543-3563, doi:10.5194/acp-11-3543-2011.
29. De Foy, B., E. Caetano, V. Magaña, A. Zitácuaro, B. Cárdenas, A. Retama, R. Ramos, L. T. Molina, and M. J. Molina (2005), Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 5(8), 2267-2288, doi:10.5194/acp-5-2267-2005.
30. De Foy, B., A. Clappier, L. T. Molina, and M. J. Molina (2006a), Distinct wind convergence patterns in the Mexico City basin due to the interaction of the gap winds with the synoptic flow, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1249-1265.
31. De Foy, B., *et al.,* (2008), Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(5), 1209-1224.
32. De Foy, B., N. A. Krotkov, N. Bei, S. C. Herndon, L. G. Huey, A. P. Martinez, L. G. Ruiz-Suarez, E. C. Wood, M. Zavala, and L. T. Molina (2009a), Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO2 retrievals during the MILAGRO field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(24), 9599-9617.
33. De Foy, B., J. R. Varela, L. T. Molina, and M. J. Molina (2006b), Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 2321-2335.
34. De Foy, B., M. Zavala, N. Bei, and L. T. Molina (2009b), Evaluation of WRF mesoscale simulations and particle trajectory analysis for the MILAGRO field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(13), 4419-4438.
35. De Gouw, J. A., *et al.,* (2009), Emission and chemistry of organic carbon in the gas and aerosol phase at a sub-urban site near Mexico City in March 2006 during the MILAGRO study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(10), 3425-3442.

36. DeCarlo, P. F., *et al.,* (2008), Fast airborne aerosol size and chemistry measurements above Mexico City and Central Mexico during the MILAGRO campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(14), 4027-4048.
37. Deng, T., and J. D. Nelson (2011), Recent Developments in Bus Rapid Transit: A Review of the Literature, Transport Reviews, 31(1), 69-96, doi:10.1080/01441647.2010.492455.
38. Doran, J. C., *et al.,* (2007a), The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1585-1598.
39. Doran, J. C., *et al.,* (2007b), The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(6), 1585-1598.
40. Doran, J. C., and S. Zhong (2000), Thermally driven gap winds into the Mexico City basin, *Journal of Applied Meteorology*, 39(8), 1330-1340, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<1330:tdgwit>2.0.co;2.
41. Dusanter, S., D. Vimal, P. S. Stevens, R. Volkamer, and L. T. Molina (2009), Measurements of OH and HO2 concentrations during the MCMA-2006 field campaign-Part 1: Deployment of the Indiana University laser-induced fluorescence instrument, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(5), 1665-1685.
42. Eibenschutz, R. (2010), La Zona Metropolitana del Valle de México: Los retos de la Megalópolis, in Pensar el futuro de México. Colección conmemorativa de las revoluciones centenarias, edited, p. 259.
43. Emmons, L. K., *et al.,* (2010), Impact of Mexico City emissions on regional air quality from MOZART-4 simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(13), 6195-6212, doi:10.5194/acp-10-6195-2010.
44. Fast, J., *et al.,* (2009), Evaluating simulated primary anthropogenic and biomass burning organic aerosols during MILAGRO: implications for assessing treatments of secondary organic aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(16), 6191-6215.
45. Fast, J. D., *et al.,* (2007), A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(9), 2233-2257.
46. Fast, J. D., and S. Y. Zhong (1998), Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin, *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres, 103(D15), 18927-18946.
47. Fortner, E. C., J. Zheng, R. Zhang, W. B. Knighton, R. M. Volkamer, P. Sheehy, L. Molina, and M. Andre (2009), Measurements of Volatile Organic Compounds Using Proton Transfer Reaction-Mass Spectrometry during the MILAGRO 2006 Campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(2), 467-481.
48. Gallego, F., J. P. Montero, and C. Salas (2013), The effect of transport policies on car use: Evidence from Latin American cities, *Journal of Public Economics*, 107, 47-62, doi:10.1016/j.jpubeco.2013.08.007.
49. García-Escalante, J. S., García-Reynoso J. A., Jazcilevich-Diamant A., and Ruiz-Suárez L. G. (2014), The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the Mexico City Metropolitan Area, Atmósfera, 27(2), 215-225.
50. Garcia-Reynoso, A., A. Jazcilevich, L. G. Ruiz-Suarez, R. Torres-Jardon, M. S. Lastra, and N. A. R. Juarez (2009), Ozone weekend effect analysis in Mexico City, *Atmósfera,* 22(3), 281-297.
51. Garcia, A. Z., C. M. Coyotzin, A. R. Amaro, D. L. Veneroni, L. C. Martinez, and G. S. Iglesias (2009), Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant Tillandsia recurvata L, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), 6479-6494.
52. García Reynoso, J. A., Ruiz Suárez, L.G., García Escalante, S., Reséndiz Juárez, N.A. (2009), Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de casoRep. INE/A1-004/2009, Instituto Nacional de Ecología, Mexico.
53. Greenberg, J. R., A. B. Guenther, and A. Turnipseed (2009), Tethered balloon-based soundings of ozone, aerosols, and solar radiation near Mexico City during MIRAGE-MEX, *Atmospheric Environment,* 43(16), 2672-2677, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.02.019.
54. Grutter, M., R. Basaldud, C. Rivera, R. Harig, W. Junkerman, E. Caetano, and H. Delgado-Granados (2008), SO2 emissions from Popocatepetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(22), 6655-6663.
55. Gutierrez, E. (2010), Using satellite imagery to measure the relationship between air quality and infant mortality: an empirical study for Mexico, *Population and Environment*, 31(4), 203-222, doi:10.1007/s11111-009-0096-y.
56. Hodzic, A., C. Wiedinmyer, D. Salcedo, and J. L. Jimenez (2012), Impact of Trash Burning on Air Quality in Mexico City, *Environmental Science & Technology*, 46(9), 4950-4957, doi:10.1021/es203954r.
57. Hudson, R., Arriola, A., Martínez-Gómez, M., and Distel, H. (2006), Effect of air pollution on olfactory function in residents of Mexico city, Chem. Senses, 31, 79-85.

58. Iniestra, R. (2008), Modelación de cuencas atmosféricas como herramienta para la gestión de la calidad del aire, edited, Instituto Nacional de Ecología, Mexico.
59. Janssen, N. A. H., *et al.,* (2011), Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM10 and PM2.5, *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1691-1699, doi:10.1289/ehp.1003369.
60. Jauregui, E. (1997), Heat island development in Mexico City, *Atmospheric Environment,* 31(22), 3821-3831.
61. Jauregui, E., and E. Luyando (1999), Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City, *International Journal of Climatology*, 19(6), 683-694.
62. Jauregui, E., and E. Romales (1996), Urban effects on convective precipitation in Mexico city, *Atmospheric Environment,* 30(20), 3383-3389.
63. Jauregui, E., and A. Tejeda (1997), Urban-rural humidity contrasts in Mexico City, *International Journal of Climatology*, 17(2), 187-196.
64. Jazcilevich, A., V. Fuentes, E. Jauregui, and E. Luna (2000), Simulated urban climate response to historical land use modification in the Basin of Mexico, *Climatic Change*, 44(4), 515-536.
65. Jazcilevich, A. D., A. R. Garcia, and E. Caetano (2005), Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico, *Atmospheric Environment,* 39(30), 5481-5489, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.05.046.
66. Jazcilevich, A. D., A. R. Garcia, and L. G. Ruiz-Suarez (2003), A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico, *Atmospheric Environment,* 37(2), 183-193.
67. Jazcilevich, A. D., A. G. Reynoso, M. Grutter, J. Delgado, U. D. Ayala, M. S. Lastra, M. Zuk, R. G. Oropeza, J. Lents, and N. Davis (2011), An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City, *Journal of Power Sources*, 196(13), 5704-5718, doi:10.1016/j.jpowsour.2011.01.076.
68. Jimenez-Garza, O., S. Marquez-Gamino, A. Albores, C. Caudillo-Cisneros, M. Carrieri, G. B. Bartolucci, and M. Manno (2012), CYP2E1 phenotype in Mexican workers occupationally exposed to low levels of toluene, *Toxicology Letters*, 210(2), 254-263, doi:10.1016/j.toxlet.2012.01.021.
69. Jolleys, M. D., *et al.,* (2012), Characterizing the Aging of Biomass Burning Organic Aerosol by Use of Mixing Ratios: A Meta-analysis of Four Regions, *Environmental Science & Technology*, 46(24), 13093-13102, doi:10.1021/es302386v.
70. Juarez, A., C. Gay, and Y. Flores (2005), Impact of the PopocatepetI's volcanic activity on the air quality of Puebla City, Mexico, *Atmósfera,* 18(1), 57-69.
71. Karl, T., E. Apel, A. Hodzic, D. D. Riemer, D. R. Blake, and C. Wiedinmyer (2009), Emissions of volatile organic compounds inferred from airborne flux measurements over a megacity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(1), 271-285.
72. Karydis, V. A., A. P. Tsimpidi, W. Lei, L. T. Molina, and S. N. Pandis (2011), Formation of semivolatile inorganic aerosols in the Mexico City Metropolitan Area during the MILAGRO campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24), 13305-13323, doi:10.5194/acp-11-13305-2011.
73. Lei, W., B. de Foy, M. Zavala, R. Volkamer, and L. T. Molina (2007), Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 1347-1366.
74. Lei, W., G. Li, and L. T. Molina (2013), Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(5), 2299-2319, doi:10.5194/acp-13-2299-2013.
75. Lei, W., M. Zavala, B. de Foy, R. Volkamer, and L. T. Molina (2008), Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(24), 7571-7581.
76. Li, G., W. Lei, N. Bei, and L. T. Molina (2012), Contribution of garbage burning to chloride and PM2.5 in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8751-8761, doi:10.5194/acp-12-8751-2012.
77. Li, G., W. Lei, M. Zavala, R. Volkamer, S. Dusanter, P. Stevens, and L. T. Molina (2010), Impacts of HONO sources on the photochemistry in Mexico City during the MCMA-2006/MILAGO Campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(14), 6551-6567, doi:10.5194/acp-10-6551-2010.
78. Marley, N. A., J. S. Gaffney, T. Castro, A. Salcido, and J. Frederick (2009), Measurements of aerosol absorption and scattering in the Mexico City Metropolitan Area during the MILAGRO field campaign: a comparison of results from the T0 and T1 sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(1), 189-206.
79. Marquez, C., T. Castro, A. Muhlia, M. Moya, A. Martinez-Arroyo, and A. Baez (2005), Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba National Park, and its relationship to air pollution transport, *Atmospheric Environment,* 39(21), 3877-3890, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.03.015.

80. Marr, L. C., K. Dzepina, J. L. Jimenez, F. Reisen, H. L. Bethel, J. Arey, J. S. Gaffney, N. A. Marley, L. T. Molina, and M. J. Molina (2006), Sources and transformations of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1733-1745.

81. Martinez-Carrillo, M. A., C. Solis, E. Andrade, R. I. Beltran-Hernandez, K. Isaac-Olive, C. A. Lucho-Constantino, M. C. L. Reyes, and L. C. Longoria (2011), Atmospheric Pollution in the Tula Industrial Corridor studied using a biomonitor and nuclear analytical techniques, *Revista Mexicana de Física*, 57(1), 75-79.

82. Martinez-Carrillo, M. A., C. Solis, E. Andrade, K. Isaac-Olive, R. I. Beltran-Hernandez, S. A. M. Moreno, G. Martinez-Resendiz, A. R. Reyes, C. A. Lucho-Constantino, and L. M. Del Razo (2010a), Aerosol composition from Tlaxcoapan, Hidalgo in central Mexico, *Revista Mexicana de Física*, 56(1), 62-66.

83. Martinez-Carrillo, M. A., C. Solis, E. Andrade, K. Isaac-Olive, M. Rocha, G. Murillo, R. I. Beltran-Hernandez, and C. A. Lucho-Constantino (2010b), PIXE analysis of Tillandsia usneoides for air pollution studies at an industrial zone in Central Mexico, *Microchemical Journal,* 96(2), 386-390, doi:10.1016/j.microc.2010.06.014.

84. Martinez-Carrillo, M. A., C. Solis, K. Isaac-Olive, E. Andrade, R. I. Beltran-Hernandez, G. Martinez-Resendiz, A. Ramirez-Reyes, C. I. C. Rivera, and C. A. Lucho-Constantino (2010c), Atmospheric elemental concentration determined by Particle-Induced X-ray Emission at Tlaxcoapan in central Mexico, and its relation to Tula industrial-corridor emissions, *Microchemical Journal,* 94(1), 48-52, doi:10.1016/j.microc.2009.08.011.

85. Massie, S. T., J. C. Gille, D. P. Edwards, and S. Nandi (2006), Satellite observations of aerosol and CO over Mexico city, *Atmospheric Environment,* 40(31), 6019-6031, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.11.065.

86. Mejia-Dugand, S., O. Hjelm, L. Baas, and R. A. Rios (2013), Lessons from the spread of Bus Rapid Transit in Latin America, *Journal of Cleaner Production,* 50, 82-90, doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.028.

87. Melamed, M. L., R. Basaldud, R. Steinbrecher, S. Emeis, L. G. Ruiz-Suarez, and M. Grutter (2009), Detection of pollution transport events southeast of Mexico City using ground-based visible spectroscopy measurements of nitrogen dioxide, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4827-4840.

88. Melgar-Paniagua, E. M., E. Vega-Rangel, L. M. Del Razo, C. A. Lucho-Constantino, S. J. Rothenberg, and A. De Vizcaya-Ruiz (2013), Distributed lag associations between respiratory illnesses and mortality with suspended particle concentration in Tula, a highly polluted industrial region in Central Mexico, International Archives of Occupational and Environmental Health, 86(3), 321-332, doi:10.1007/s00420-012-0768-2.

89. Melgar-Paniagua, E. M., E. Vega, L. M. Del Razo, C. A. Lucho-Constantino, S. L. Rothenberg, and A. De Vizcaya-Ruiz (2010), Health impacts of population exposed to atmospheric emissions in an industrial region of Mexico, *Toxicology Letters*, 196, S60-S60, doi:10.1016/j.toxlet.2010.03.233.

90. Mena-Carrasco, M., *et al.,* (2009), Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(11), 3731-3743.

91. Moffet, R. C., B. de Foy, L. T. Molina, M. J. Molina, and K. A. Prather (2008), Measurement of ambient aerosols in northern Mexico City by single particle mass spectrometry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(16), 4499-4516.

92. Moffet, R. C., *et al.,* (2010), Microscopic characterization of carbonaceous aerosol particle aging in the outflow from Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3), 961-976.

93. Molina, L. T., *et al.,* (2007), Air quality in North America's most populous city-overview of the MCMA-2003 campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(10), 2447-2473.

94. Molina, L. T., *et al.,* (2010), An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(18), 8697-8760, doi:10.5194/acp-10-8697-2010.

95. Osorio, M. A., Torrijos, T., Sánchez, A., Arroyo, O. (2011), Preliminary analysis for an air quality management DSS in the Metropolitan Valley of Puebla, Mexico, Recen Researches in Computational Techniques, Non-Linear Systems and Control, 210-215.

96. Paredes-Miranda, G., W. P. Arnott, J. L. Jimenez, A. C. Aiken, J. S. Gaffney, and N. A. Marley (2009), Primary and secondary contributions to aerosol light scattering and absorption in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(11), 3721-3730.

97. Paredes-Miranda, G., W. P. Arnott, H. Moosmuller, M. C. Green, and M. Gyawali (2013), Black Carbon aerosol concentration in five cities and its scaling with city population, *Bulletin of the American Meteorological Society,* 94(1), 41-50, doi:10.1175/bams-d-11-00225.1.

98. Parry, I. W. H., and G. R. Timilsina (2010), How should passenger travel in Mexico City be priced?, *Journal of Urban Economics*, 68(2), 167-182, doi:10.1016/j.jue.2010.03.009.

99. Pérez Sesma, A. (2012), Propuesta de delimitación de cuencas atmosféricas, edited, Semarnat, México.

100. Pope, C. A., M. Ezzati, and D. W. Dockery (2009), Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States, *New England Journal of Medicine*, 360(4), 376-386, doi:10.1056/NEJMsa0805646.

101. Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Soto-Cruz B., Alcántara-Iniesta, S., and Pérez-Luna J. (2013), Analysis of the meteorological variables for Puebla City 2011-2012 applying the modeling ion-wavelets in a hypothetical manner, Atmospheric and Climate Science, 3, 450-458.

102. Rivera, C., G. Sosa, H. Wohrnschimmel, B. de Foy, M. Johansson, and B. Galle (2009), Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO2 and NO2 during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), 6351-6361.

103. Rivera, C., W. Stremme, and M. Grutter (2013), Nitrogen dioxide DOAS measurements from ground and space: comparison of zenith scattered sunlight ground-based measurements and OMI data in Central Mexico, *Atmósfera,* 26(3), 401-414.

104. Rogers, R. R., *et al.,* (2009), NASA LaRC airborne high spectral resolution LIDAR aerosol measurements during MILAGRO: observations and validation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4811-4826.

105. Romero Guzman, E. T., L. R. Reyes Gutierrez, A. Sandoval Perez, and J. Morelos Martinez (2007), Análisis químico-morfológico y evaluación de la distribución de materia particulada en el Valle de Toluca, paper presented at XVII Congreso Tecnico Cientifico ININ-SUTIN "Dr. Carlos Velez Ocon", Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo".

106. Rosas Pérez, I., J. Serrano, E. Alfaro-Moreno, D. Baumgardner, C. García-Cuellar, J. M. Martín del Campo, G. B. Raga, M. Castillejos, R. D. Colín, and A. R. Osornio Vargas (2007), Relations between PM10 composition and cell toxicity: A multivariate and graphical approach, Chemosphere, 67(6), 1218-1228, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.078.

107. Ruiz Suarez, L. G., Torres Jardón, R., Torres Jaramillo, J.A., Barrera, H., Castro T., Mar Morales, B. E., García Reynoso and Molina, L. T. (2012), Air quality in the Puebla-Tlaxcala airshed in Mexico during April 2009, paper presented at EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria., 2012.

108. Rutter, A. P., D. C. Snyder, E. A. Stone, J. J. Schauer, R. Gonzalez-Abraham, L. T. Molina, C. Marquez, B. Cardenas, and B. de Foy (2009), In situ measurements of speciated atmospheric mercury and the identification of source regions in the Mexico City Metropolitan Area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(1), 207-220.

109. Salcedo, D., *et al.,* (2012), Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state), *Science of the Total Environment,* 414, 417-432, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.09.041.

110. San Martini, F. M., *et al.,* (2006a), Implementation of a Markov Chain Monte Carlo method to inorganic aerosol modeling of observations from the MCMA-2003 campaign-Part I: Model description and application to the La Merced site, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 4867-4888.

111. San Martini, F. M., *et al.,* (2006b), Implementation of a Markov Chain Monte Carlo method to inorganic aerosol modeling of observations from the MCMA-2003 campaign-Part II: Model application to the Cenica, Pedregal and Santa Ana sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 4889-4904.

112. Sedema-GDF (2012a), Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México Contaminantes Criterio 2010Rep., Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, Mexico.

113. Sedema-GDF (2012b), Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México Contaminantes Tóxicos 2010Rep., Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, Mexico.

114. Sedema-GDF (2012c), Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México Gases de Efecto Invernadero y Carbono Negro 2010Rep., Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, México.

115. Semarnat (2006), Inventario Nacional de Emisiones de Mexico, 1999Rep., Instituto Nacional de Ecologia y Cambio Climatico (INECC).

116. Shirley, T. R., *et al.,* (2006), Atmospheric oxidation in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) during April 2003, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 2753-2765.

117. Song, J., W. Lei, N. Bei, M. Zavala, B. de Foy, R. Volkamer, B. Cardenas, J. Zheng, R. Zhang, and L. T. Molina (2010), Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(8), 3827-3846.

118. Sosa, G., E. Vega, E. Gonzalez-Avalos, V. Mora, and D. Lopez-Veneroni (2013), Air Pollutant Characterization in Tula Industrial Corridor, Central Mexico, during the MILAGRO Study, Biomed Research International, 13, doi:10.1155/2013/521728.

119. Stone, E. A., D. C. Snyder, R. J. Sheesley, A. P. Sullivan, R. J. Weber, and J. J. Schauer (2008), Source apportionment of fine organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO experiment 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(5), 1249-1259.

120. Streets, D. G., *et al.,* (2013), Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability, *Atmospheric Environment,* 77(0), 1011-1042, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.051.

121. Stremme, W., *et al.,* (2013), Top-down estimation of carbon monoxide emissions from the Mexico Megacity based on FTIR measurements from ground and space, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1357-1376, doi:10.5194/acp-13-1357-2013.

122. Thornhill, D. A., B. de Foy, S. C. Herndon, T. B. Onasch, E. C. Wood, M. Zavala, L. T. Molina, J. S. Gaffney, N. A. Marley, and L. C. Marr (2008), Spatial and temporal variability of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(12), 3093-3105.

123. Tie, X., S. Madronich, G. Li, Z. Ying, A. Weinheimer, E. Apel, and T. Campos (2009), Simulation of Mexico City plumes during the MIRAGE-Mex field campaign using the WRF-Chem model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4621-4638.

124. Tovalin-Ahumada, H., and L. Whitehead (2007), Personal exposures to volatile organic compounds among outdoor and indoor workers in two Mexican cities, *Science of the Total Environment,* 376(1-3), 60-71, doi:10.1016/j.scitotenv.2007.01.063.

125. Tovalin-Ahumada, H., L. Whitehead, and S. Blanco (2007), Personal exposure to PM2.5 and element composition-A comparison between outdoor and indoor workers from two Mexican cities, *Atmospheric Environment,* 41(35), 7401-7413, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.05.059.

126. Tsimpidi, A. P., V. A. Karydis, M. Zavala, W. Lei, N. Bei, L. Molina, and S. N. Pandis (2011), Sources and production of organic aerosol in Mexico City: insights from the combination of a chemical transport model (PMCAMx-2008) and measurements during MILAGRO, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(11), 5153-5168, doi:10.5194/acp-11-5153-2011.

127. Tsimpidi, A. P., V. A. Karydis, M. Zavala, W. Lei, L. Molina, I. M. Ulbrich, J. L. Jimenez, and S. N. Pandis (2010), Evaluation of the volatility basis-set approach for the simulation of organic aerosol formation in the Mexico City metropolitan area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2), 525-546.

128. UNAM (2009), Estudios de la calidad del aire en la corona regional del centro de México ECACOR, edited.

129. Velasco, E., B. Lamb, S. Pressley, E. Allwine, H. Westberg, B. T. Jobson, M. Alexander, P. Prazeller, L. Molina, and M. Molina (2005), Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape, *Geophysical Research Letters,* 32(20), 4, doi:10.1029/2005gl023356.

130. Velasco, E., *et al.,* (2007), Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 329-353.

131. Velasco, E., *et al.,* (2008), Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(12), 3061-3079.

132. Volkamer, R., F. S. Martini, L. T. Molina, D. Salcedo, J. L. Jimenez, and M. J. Molina (2007), A missing sink for gas-phase glyoxal in Mexico City: Formation of secondary organic aerosol, *Geophysical Research Letters,* 34(19), 5, doi:10.1029/2007gl030752.

133. Volkamer, R., L. T. Molina, M. J. Molina, T. Shirley, and W. H. Brune (2005), DOAS measurement of glyoxal as an indicator for fast VOC chemistry in urban air, *Geophysical Research Letters,* 32(8), 4, doi:10.1029/2005gl022616.

134. Volkamer, R., P. Sheehy, L. T. Molina, and M. J. Molina (2010), Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere-Part 1: A radical source perspective, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(14), 6969-6991, doi:10.5194/acp-10-6969-2010.

135. Voss, P. B., *et al.,* (2010), Long-range pollution transport during the MILAGRO-2006 campaign: a case study of a major Mexico City outflow event using free-floating altitude-controlled balloons, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15), 7137-7159, doi:10.5194/acp-10-7137-2010.

136. Whiteman, C. D., S. Zhong, X. Bian, J. D. Fast, and J. C. Doran (2000), Boundary layer evolution and regional-scale diurnal circulations over the Mexico Basin and Mexican plateau, *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres, 105(D8), 10081-10102, doi:10.1029/2000jd900039.

137. Wohrnschimmel, H., M. Zuk, G. Martinez-Villa, J. Ceron, B. Cardenas, L. Rojas-Bracho, and A. Fernandez-Bremauntz (2008), The impact of a Bus Rapid Transit system on commuters' exposure to Benzene, CO, PM(2.5) and PM(10) in Mexico City, *Atmospheric Environment,* 42(35), 8194-8203, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.062.

138. Wohrnschimmel, H., M. Zuk, G. Martinez, J. Ceron, L. R. Bracho, and B. Cardenas (2006), The impact of a bus rapid transit system on commuters' exposure to air pollutants in Mexico city, *Epidemiology,* 17(6), S54-S54.

139. Wood, E. C., *et al.,* (2009), A case study of ozone production, nitrogen oxides, and the radical budget in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(7), 2499-2516.

140. Yokelson, R. J., I. R. Burling, S. P. Urbanski, E. L. Atlas, K. Adachi, P. R. Buseck, C. Wiedinmyer, S. K. Akagi, D. W. Toohey, and C. E. Wold (2011), Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(14), 6787-6808, doi:10.5194/acp-11-6787-2011.

141. Zalakeviciute, R., *et al.,* (2012), Chemically-resolved aerosol eddy covariance flux measurements in urban Mexico City during MILAGRO 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(16), 7809-7823, doi:10.5194/acp-12-7809-2012.

142. Zambrano García, A., C. Medina Coyotzin, A. Rojas Amaro, D. López Veneroni, L. Chang Martínez, and G. Sosa Iglesias (2009), Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant Tillandsia recurvata L, *Atmos. Chem. Phys.*, 9(17), 6479-6494, doi:10.5194/acp-9-6479-2009.

143. Zavala, M., H. Barrera, J. Morante, and L. T. Molina (2013), Analysis of model-based PM2.5 emission factors for on-road mobile sources in Mexico, *Atmósfera,* 26(1), 109-124.

144. Zavala, M., W. Lei, M. J. Molina, and L. T. Molina (2009), Modeled and observed ozone sensitivity to mobile-source emissions in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(1), 39-55.

145. Zhang, Y., M. K. Dubey, S. C. Olsen, J. Zheng, and R. Zhang (2009), Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006-MILAGRO, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(11), 3777-3798.

5.2 Publicaciones relacionadas con la calidad del aire en la región de la Corona

DATOS UTILIZADOS EN ESTUDIOS PREVIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Se compiló una lista de 304 publicaciones relacionadas con la química atmosférica y la calidad el aire en la región central de México. En su mayoría son publicaciones arbitradas, y varias de ellas son parte de las ediciones especiales de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO de la revista *Atmospheric Chemistry and Physics*. Para cada publicación se obtuvieron las palabras clave de mediciones experimentales utilizadas en cada artículo, así como su ubicación, uso de datos satelitales como parte del análisis y los modelos numéricos utilizados.

Los tipos de mediciones experimentales se clasificaron en categorías representativas: gases criterio, aerosoles, compuestos orgánicos volátiles (COV), meteorología, fase gas, radiación, propiedades ópticas de aerosoles, otros y sin clasificar. En este punto es importante mencionar que en el documento —incluyendo las tablas del **Apéndice 1**— se presentan los nombres originales en inglés de las categorías, palabras clave y nombres de los instrumentos que se utilizaron para realizar la selección y conteo de las referencias. El propósito es mantener la consistencia entre las tablas ya que entre ellas se utilizan las mismas categorías, y una traducción pudiera restar claridad a los parámetros que se usaron para realizar el análisis. Se considera que de esta forma se mantiene el objetivo del reporte sin restar continuidad al mismo. No obstante, en algunas partes del texto, en la sección que describe las categorías así como en la **Tabla A05-4,** se adjunta la traducción al español de la categoría para asistir en la presentación sin perder el contexto del reporte. Además, si un acrónimo no aparece en las tablas del Apéndice 1 **A05/Ap01-1, 2 y 3**, se define en el texto. La **Tabla A05/Ap01-3** muestra la lista de acrónimos, su significado y la categoría en la que fueron asignados.

En algunos casos se utilizó la palabra clave “Aerosol” (Aerosoles) o “VOC” (COV: compuestos orgánicos volátiles) para cubrir múltiples mediciones. Aun cuando el conteo de referencias puede estar sujeto a una posible subestimación, los resultados que se presentan pueden considerarse como un estimado del mínimo de publicaciones que usaron una medición en particular. El trabajo está en continua revisión por lo que se recomienda tomar los resultados que se presentan como preliminares. No obstante, se considera que la tendencia general que resultó de esta selección puede ser indicativa de la manera en que los datos experimentales se utilizaron en la literatura científica.

En la **Tabla A05-4** se presenta el compendio del número de publicaciones que se obtuvieron para cada categoría. Los contaminantes criterio se definen de acuerdo a los estándares de calidad del aire de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA NAAQS) y que incluyen:

monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, partículas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) y dióxido de azufre. Estos contaminantes son la base de gran parte de los análisis de calidad del aire y por consiguiente se utilizaron en 150 de las referencias. Las otras dos categorías con mayor número de publicaciones fueron "Aerosol" con 137 artículos y "VOC" con 84 referencias. Los datos meteorológicos se utilizaron en gran parte para asistir en la interpretación de los resultados; sin embargo, en algunos casos fueron el principal objetivo del análisis. Esta categoría contribuyó con 77 artículos.

Tabla A05-4 Número de publicaciones que usaron los datos de las mediciones para cada categoría

Nótese que los artículos pueden usar datos de múltiples categorías.

Palabra clave de cada categoría	Número de referencias
Criteria (Gases Criterio)	150
Aerosol (Aerosoles)	137
VOC (COV)	84
Meteorology o *Met* (Meteorología)	77
Gas Phase (Fase Gas)	50
Radiation (Radiación)	31
Other (Otros)	21
Aerosol Optical (Propiedades ópticas de aerosoles)	17
Unclassified (Sin clasificar)	17

Esta parte del reporte se organiza de la siguiente manera: en la sección 5.2.1 se presentan las categorías que se utilizaron en el análisis; las plataformas de medición que se usaron (sección 5.2.2); los datos satelitales que pueden ser de utilidad (sección 5.2.3); un breve bosquejo de los datos de monitoreo (sección 5.2.4); algunos puntos conflictivos a considerar (sección 5.2.5) y una síntesis de esta parte del reporte junto con una breve descripción de los datos de interés a escala regional (sección 5.2.6). Al final se incluye el Apéndice 2 que acompaña al documento y lista de las publicaciones que se utilizaron.

5.2.1 CATEGORÍAS

Con el propósito de describir con mayor detalle los datos experimentales que se usaron en la literatura, se incluye a continuación una breve descripción de cada una de las categorías que se definieron. En el Apéndice 1, se presenta la definición completa de los nombres correspondientes de cada instrumento así como de las palabras clave relacionadas con cada categoría. La lista de las 304 referencias que se consideraron para elaborar este reporte se presenta en el Apéndice 2. Es importante notar que la etiqueta que se utilizó para denotar a cada artículo se incluye antes de la referencia para fines de claridad, debido a que la **Tabla A05/Ap01-3** hace uso de esta etiqueta.

5.2.1.1 *CRITERIA* (GASES CRITERIO)

Las mediciones estándar de gases criterio fueron muy importantes para la mayoría de las publicaciones. El ozono y material particulado son de especial interés debido a su relevancia en estudios de contaminantes climáticos de vida corta (SLCP por sus siglas en inglés). La interpretación de mediciones más sofisticadas hizo uso extensivo de éstas mediciones estándar. En particular, cuentan con una mejor cobertura espacial y temporal que las otras mediciones. Por tanto, pueden usarse para establecer el contexto necesario para interpretar otro tipo de datos.

5.2.1.2 *AEROSOL* (AEROSOLES)

Como se mencionó anteriormente, esta categoría es la segunda en términos de número de publicaciones con 137 artículos arbitrados. Aproximadamente la mitad de ellos hicieron uso de datos de mediciones del AMS resultando en 62 artículos. Se contó con múltiples AMS durante las campañas: varios de los supersitios tuvieron uno, así como las aeronaves y el laboratorio móvil de Aerodyne. Asimismo hay varios tipos de AMS y algunos de ellos fueron usados por vez primera durante la campaña MILAGRO. Esto derivó en algunos de los artículos con mayor número de citas, con varias publicaciones teniendo más de 400 citas cada una.

Las muestras de aerosoles en aire ambiente analizadas en laboratorio con rayos X y microscopía electrónica contribuyeron con información valiosa respecto a la especiación de aerosoles. Dentro de esta categoría, mediciones de PIXE y TEM se usaron en 19 y 10 publicaciones respectivamente. La especiación de partículas (incluyendo la fracción orgánica) gruesas y finas, formación de aerosoles secundarios orgánicos e inorgánicos y quema de biomasa fueron considerados en estos estudios. En este punto, la mitad de los estudios basados en TEM se enfocaron en quema de biomasa. Asimismo, 4 publicaciones contribuyeron con información de carbono negro, el cual es un SLCP de gran importancia. En relación al carbono negro, 12 artículos se enfocaron en aerosoles carbonáceos primarios (carbono elemental) y carbono orgánico. Nueve publicaciones que usaron datos de mediciones del SMPS brindaron información adicional sobre la volatilidad y distribución de tamaño de los aerosoles.

Debe mencionarse que algunos instrumentos durante la campaña MILAGRO fueron utilizados por vez primera en México. Aun cuando el número de publicaciones relacionadas es relativamente bajo, la información científica que resultó de las mismas es importante. Por ejemplo, datos de composición de partículas obtenidas con el TDCIMS, en su mayoría en el intervalo de 10 a 33 nm fue útil para inferir acerca de formación de partículas. Asimismo, el PAS fue utilizado por vez primera para obtener datos de carbono negro en tiempo real, lo cual derivó en 5 publicaciones.

5.2.1.3 *VOC* (COV, COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES)

Los COV que se midieron incluyeron hidrocarburos no metánicos e hidrocarburos oxigenados. De los 84 artículos que estudiaron COV, al menos 27 de ellos usaron datos de mediciones obtenidas con el DOAS, 22 utilizaron datos

del PTRMS y 20 consideraron observaciones del equipo FTIR. Trece publicaciones, incluyendo aquellas que se enfocaron en quema de biomasa, usaron mediciones del GC/FID. Hubo 19 publicaciones en la lista que se compiló en las que se usaron múltiples mediciones de COV. Varias de ellas fueron artículos sobre modelación que se beneficiaron de realizar una comparación entre simulaciones del modelo con múltiples especies. Esto básicamente duplica la tasa de uso de las técnicas de medición mencionadas anteriormente.

Mediciones de emisiones de COV fueron obtenidas directamente del equipo PTRMS, con 3 artículos abarcando emisiones móviles y 3 artículos usaron mediciones de flujo basados en la técnica de covarianza turbulenta.

Uno de los principales hallazgos de la campaña MCMA-2003 fue la medición de niveles elevados de formaldehido en la atmósfera debido a emisiones directas. Algunos artículos estudiaron el impacto de ésta especie usando datos de los sitios de superficie, del laboratorio móvil, las mediciones de las aeronaves, datos satelitales así como múltiples modelos químicos. Esto contribuyó a 19 artículos.

Otro de los descubrimientos más relevantes de la campaña MCMA-2003 fue la medición espectroscópica del glioxal (CHOCHO) usando el DOAS. Esto contribuyó a 6 publicaciones. Aun cuando se tiene en cuenta el valor inherente de realizar un conteo de publicaciones, lo anterior ilustra que el nexo entre cantidad, calidad y significancia puede ser tenue. En este ejemplo, las 6 publicaciones relacionadas al glioxal fueron altamente citadas, una de ellas actualmente con 400 citas.

5.2.1.4 *METEOROLOGY* (METEOROLOGÍA)

Hubo 74 artículos que usaron mediciones meteorológicas. Gran parte de ellos usaron mediciones estándar en superficie de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento y presión. Algunos grupos de investigación trajeron sus propios instrumentos para obtener datos en sus sitios de medición. Aunado o en complemento a ello, varios grupos usaron datos disponibles del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la red de monitoreo atmosférico (RAMA) o en algunos casos de otras estaciones independientes (Cenica, UNAM).

Se instalaron radares perfiladores de viento (RWP) durante la campaña IMADA y la campaña MILAGRO. Los datos que proporcionaron fueron usados en 13 publicaciones. Mediciones de anemómetros sónicos se usaron junto con las torres de flujo instaladas durante MCMA-2003 y MILAGRO, y fueron utilizadas para estimar flujos urbanos de contaminantes mediante la técnica de covarianza turbulenta, lo que resultó en 5 publicaciones. Asimismo, se realizaron mediciones de perfiles verticales de parámetros meteorológicos con radiosondas (Raob: Rawinsonde Observation) y Sodar (Sonic Detection and Ranging) por ejemplo, y también se obtuvieron mediciones adicionales de la capa límite planetaria (PBL) con ceilómetros. Globos piloto se usaron para determinar el perfil vertical de velocidad y dirección del viento. Mediciones de radiosondeos del SMN son incorporados en modelos internacionales como

el GFS (Global Forecast System) y reanálisis tales como el NARR (North American Regional Reanalysis), lo que significa que contribuyen a un gran número de publicaciones. Se lanzaron radiosondas por separado en los supersitios y se estima que estas contribuyeron en al menos 5 publicaciones, y muy probablemente a un número mayor. Las otras mediciones contribuyeron a un par de publicaciones cada una. Es de resaltar que globos meteorológicos controlados se utilizaron para seguir el transporte de la pluma de la ZMVM en grandes distancias, las cuales se usaron en 3 publicaciones.

5.2.1.5 *Gas Phase* (Fase Gas)

Las mediciones de compuestos en fase gas se usaron en 50 artículos para estudiar la fotoquímica urbana y regional, 15 de ellos usaron datos del equipo TILDAS y 9 publicaciones usaron datos de mediciones obtenidas con el CIMS. Trece referencias usaron mediciones de CO_2 principalmente para el desarrollo de factores de emisión ya sea para quema de biomasa o bien para fuentes móviles.

Asimismo, 11 publicaciones usaron datos de NO_y. Mediciones de OH y HO_2 obtenidas en los supersitios y en las aeronaves contribuyeron con 9 publicaciones, 7 de las cuales usaron datos de los instrumentos FAGE. Cuatro artículos usaron mediciones de carbono 14 para evaluar emisiones biogénicas contra emisiones antropogénicas. Otra cantidad importante de instrumentos contribuyó con datos valiosos para un menor número de publicaciones así como para artículos de revisión y modelación que dependen de extensas bases datos.

Debido a que el ozono se considera un contaminante de vida corta (SLCP), la información de estas mediciones y de las publicaciones es importante para la continua comprensión y conocimiento de la fotoquímica en la cuenca de la ZMVM y áreas circunvecinas. Este conjunto de mediciones brindó información respecto de las fuentes de emisión más importantes y contribuyó a mejorar el inventario de emisiones.

5.2.1.6 *Radiation* (Radiación)

Las mediciones de radiación usando diferentes tipos de radiómetros y fotómetros se utilizaron en 31 artículos. Estos datos fueron esenciales para los estudios de fotoquímica, y por consiguiente fueron considerados tanto en los artículos enfocados en datos experimentales como en los que se enfocaron en simulaciones numéricas. Varios de ellos fueron usados por estudios de química en fase gas, pero también fueron usados en otros estudios de aerosoles. En términos de plataforma de medición, se usaron en una gran variedad de configuraciones en los supersitios y en las aeronaves.

5.2.1.7 *Aerosol Optical Properties* (propiedades ópticas de aerosoles)

Un total de 17 artículos utilizaron mediciones de propiedades ópticas. La mitad de ellos usaron datos de las estaciones de la red Aeronet en y alrededor de México, las cuales su usaron en combinación con otras mediciones y que sirvieron para ampliar las conclusiones que pudieron obtenerse a partir de medi-

ciones específicas en las campañas de monitoreo. Varios de los artículos restantes en esta categoría provienen de la aeronave J31 durante MILAGRO, que se enfocó en comparar mediciones de radiación con trayectorias satelitales. Estos usaron diferentes fotómetros, tal y como se lista en la **Tabla A05/Ap01-1**.

Datos adicionales

En esta parte se menciona brevemente las publicaciones más relevantes de las categorías "Other" y "Unclassified".

5.2.1.8 MEDICIONES DE PERFILES VERTICALES

Además de las categorías mencionadas anteriormente, las mediciones de los LIDAR proporcionaron datos diferentes de la estratificación vertical de la atmósfera. Esto incluye 3 artículos con el LIDAR de alta resolución espectral que se instrumentó en el avión B200. Este LIDAR permite estimar el tipo de aerosol de acuerdo a un número de criterios (antropogénicos, quema de biomasa y polvo entre otros).

Cuatro publicaciones usaron mediciones del LIDAR fijado en sitio y algunas usaron datos de los LIDAR Dial y SABL que fueron obtenidas en aire ambiente. Otra manera de obtener perfiles verticales es mediante el uso de globos. Cuatro artículos usaron datos de globos cautivos y otro usó datos de sondas de ozono.

5.2.1.9 *MISCELLANEOUS* (MISCELÁNEOS)

Dos artículos usaron datos de mercurio en fase gas y fase partícula usando un equipo Tekran. Finalmente, se obtuvieron 17 artículos con fuentes de datos sin clasificar. Esto se debe principalmente a que el objetivo central es en química atmosférica y estos artículos están en campos adyacentes, por ejemplo prueba de vehículos o estudios de exposición personal. En el caso de prueba de vehículos hay instrumentos especializados para medir mediciones en el escape o en la pluma detrás del vehículo en conducción. En el caso de estudios de salud, hubo publicaciones usando métodos diferentes para la obtención de mediciones de exposición o bien mediciones de impacto biológico.

5.2.2 PLATAFORMAS DE MEDICIÓN

La **Tabla A05-5** muestra el número de publicaciones que usaron datos de diferentes sitios en superficie y diferentes plataformas aéreas. Es importante mencionar que varias de ellas se traslapan, debido a que los vuelos de las aeronaves se coordinaron con los supersitios y entre sí. El análisis de los artículos fue por tanto altamente sinérgico: publicaciones que tuvieron un enfoque ya sea en superficie o en mediciones aéreas hicieron uso extensivo entre sí de los datos obtenidos. Por ejemplo, sitios en superficie arrojan un registro temporal más prolongado que ayuda a comprender las mediciones aéreas, y las aeronaves proveen una perspectiva tridimensional de la atmósfera que permite interpretar las mediciones en superficie. Además es de resaltar que en la **Tabla A05-5** se incluyen las mediciones de la RAMA las cuales se usaron en un gran número de publicaciones.

Tabla A05-5 Datos de diferentes sitios en superficie y plataformas aéreas usados en las publicaciones.

Plataforma	Número de referencias
Aerodyne Mobile Lab	20
Altzomoni	6
B200	3
C130	34
Cenica	44
DC8	11
FZK-Enduro	1
G1	14
J31	8
Pico Tres Padres	6
Puebla	6
RAMA	**74**

Plataforma	Número de referencias
Simat HQ	5
SMN	15
St. Ana	4
T0	**66**
T1	**59**
T2	**23**
Tenango del Aire	3
Toluca	3
Tula	9
UNAM	11
USFS	7

5.2.3 DATOS SATELITALES

En Streets *et al.,* 2013 ("Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability", *Atmospheric Environment*) se presenta una revisión de las capacidades actuales sobre la estimación de emisiones utilizando datos satelitales. La Tabla 5 de ese artículo resume los instrumentos y las plataformas satelitales disponibles para datos de calidad del aire. Una versión condensada de esta tabla se presenta en la **Tabla A05/Ap01-1** del **Apéndice 1.** Para un estudio de escala urbana a regional los datos más importantes son probablemente los que tienen una resolución espacial menor a 10 km. En la selección de los 304 artículos relacionados con la calidad del aire en la región central de México, al menos 17 de ellos usaron datos de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), 6 usaron datos de OMI, 2 del MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) y 2 de ellos datos de MOPITT.

El instrumento MODIS fue particularmente importante para identificar quema de biomasa, lo que abarca la mayor parte de las referencias. Algunos artículos se enfocaron más específicamente en la obtención de datos de aerosoles, a pesar que son limitados en utilidad debido a la presencia de polvo y superficies altamente reflectivas en la parte central México.

Uno de los instrumentos de mayor utilidad en estudios de la calidad del aire ha sido el OMI que continúa usándose para refinar estimados de emisiones y para entender el transporte de la contaminación. Hay aún bastante más análisis que podría realizarse sobre México usando estos datos.

CALIPSO (Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation) no se incluye en la tabla del artículo de Streets *et al.,* 2013. No obstante podría resultar de utilidad en dos frentes: transporte regional y estratificación vertical de la atmósfera. Liu *et al.,* 2008 (CALIPSO LIDAR observations of the optical properties of Saharan dust: A case study of long-range transport, *Journal of Geophysical Research*) hizo el seguimiento de plumas de polvo del desierto de Sahara conforme cruzaron el Atlántico hasta alcanzar el golfo de México. Por su parte, Kar *et al.,* 2013 (Observations of pollution outflow from

Mexico City using CALIPSO LIDAR measurements, American Geophysical Union Fall Meeting) están analizando el transporte de largo alcance de polvo contaminado de la ZMVM hacia la alta tropósfera.

Otro satélite no incluido en la tabla del artículo de Streets *et al.,* 2013, es el Orbiting Carbon Observatory (OCO-2), el cual se lanzó en julio del 2014. Este proporcionará datos de columna de CO_2 así como información de aerosoles que pueden ser relevantes para el proyecto.

Finalmente, es de resaltar que el satélite Tempo (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution) está planeado a lanzarse en 2017 en una órbita geoestacionaria. Por vez primera datos de química atmosférica estarán disponibles a lo largo del día con una resolución espacial de 4 km. Se espera que el satélite mida sobre la ZMVM.

5.2.4 DATOS DE MONITOREO

Uno de los factores que sobresale con claridad del análisis de publicaciones en la ZMVM es la importancia de la red de monitoreo atmosférico RAMA. Del total de las 304 referencias que se incluyeron en la base de datos, al menos un cuarto de ellas usaron datos de la RAMA. El registro temporal de largo plazo y el número de sitios incluidos significa que es un recurso invaluable para quien desee estudiar la calidad del aire en la ZMVM, ya sea que se considere un estudio de exposición durante una década, o bien episodios diarios. El reporte de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CEC por sus siglas en inglés) lista las ciudades con redes de monitoreo de calidad del aire en la Tabla 2 de su reporte del año 2009 "Comprehensive Assessment of North American Air Emissions Inventories and Ambient Air Monitoring Networks". Esto muestra que, aparte de la RAMA, hay un número de estaciones en las regiones urbanas aledañas que pudieran proveer información valiosa para la calidad del aire regional. Esto incluye a Tepeji y Tula en Hidalgo, y a varios sitios en Morelos, Puebla y Toluca.

Varias de estas agencias también hacen uso de laboratorios móviles para estudios a corto plazo. Estos podrían utilizarse en periodos de prueba de duración mensual antes de efectuar cualquier campaña de medición con el fin de realizar un estudio preliminar entre cuencas atmosféricas contiguas y para evaluar si los posibles supersitios son adecuados.

Las redes de monitoreo usualmente se diseñan teniendo en mente impactos en salud y a menudo distribuyen los sitios conforme a fronteras políticas. Esto puede ser una limitante en estudios de química atmosférica. Varios sitios urbanos cuentan con perfiles de contaminación similares y por tanto los datos adicionales son de uso limitado para entender, por ejemplo, el transporte en largas distancias o para desarrollar simulaciones numéricas. En términos científicos, es de gran utilidad el distribuir las estaciones de monitoreo en un área mayor y en locaciones más variadas, incluyendo algunos sitios que pueden tener aire relativamente limpio la mayor parte del tiempo. La información recabada puede aportar significativamente al entendimiento de la química atmosférica en toda la red, incluyendo las razones de una alta carga de contaminantes en otras estaciones. La información es además de gran valor para refinar los modelos y para acotar situaciones en donde el modelo arroja una respuesta correcta por una razón equivocada.

5.2.5 PUNTOS A CONSIDERAR

Hay varias áreas con problemas potenciales que necesitan considerarse cuando se planean mediciones de química atmosférica en la meseta del centro de México.

Una de las principales complicaciones es la presencia ubicua de polvo resuspendido a causa del viento. Estos aerosoles pueden dominar la carga de contaminantes en varias zonas y reducir la sensibilidad de mediciones a los aerosoles finos que son de interés para la contaminación del aire. Debido a que la superficie seca contiene mucho polvo y tiene un albedo elevado, esto también limita la resolución de algunos instrumentos satelitales y productos de percepción remota.

Hay una extensa quema de biomasa en la cuenca de la ciudad de México, en las cuencas aledañas y por transporte desde los bosques hasta el sur. Cuando estos eventos ocurren, pueden alterar las señales de química atmosférica que están tratando de medirse. Por un lado, es de gran utilidad caracterizar estos eventos, pero por el otro, es importante asegurarse que hay suficientes mediciones que no se impactaron por estos eventos.

Hasta ahora, la mayor parte de las campañas se han enfocado en el final de la temporada seca (febrero, marzo y abril). El preservar lo anterior, podría añadir continuidad al registro de mediciones en la ZMVM y fomentar comparaciones. En particular, comparaciones de largo plazo son útiles para documentar mejoras que se han llevado a cabo en la calidad del aire con el paso de los años y para informar sobre planes para futuros desarrollos de políticas. Al mismo tiempo, puede resultar valioso científicamente y en términos de políticas el considerar otras temporadas del año, especialmente la temporada de lluvias tal y como fue sugerido aproximadamente hace 10 años (Baumgardner, Raga and Brasseur, "Are we prepared for a wet MIRAGE?" *Atmospheric Environment,* 2005).

“Todas las políticas son locales” es un *dictum* común. De manera similar podría decirse que toda la calidad del aire es local: cada sitio de medición siempre tiene sus particularidades ya sea en forma de patrones micro-meteorológicos o por la presencia de fuentes locales que no se conocen con antelación. Esto es especialmente cierto en un área altamente poblada como México que además tiene una orografía compleja. Para un estudio regional, sería importante seleccionar algunos sitios regionales que pudieran ser capaces de medir el transporte regional y la composición de la atmósfera, así como sitios en las diferentes áreas urbanas que son parte del área de estudio.

5.2.6 CONCLUSIONES

Los resultados de las tablas sugieren que hay gran valor en el uso combinado de supersitios y aeronaves. Múltiples sitios posicionados para medir la masa de aire en diferentes etapas de envejecimiento y en diferentes etapas de transporte pueden proveer información sobre la química y dinámica de la

atmósfera. Al utilizar las aeronaves en combinación con esto, se puede proveer de un cuadro más completo de la baja tropósfera y de una apreciación de la complejidad tridimensional del problema, el cual es exacerbado en el centro de México por la topografía compleja.

Una tendencia clara en las publicaciones es la importancia de las redes de monitoreo. Las mediciones de contaminantes criterio por parte de la RAMA fueron el principal contribuyente en términos del número de publicaciones. Estas mediciones proveen de la información en el largo plazo y la cobertura espacial necesarios para profundizar en el análisis de los datos obtenidos en campañas de monitoreo.

La ubicación de los supersitios es determinada por el alcance de cada estudio. Para un estudio regional, una consideración cuidadosa del transporte regional y de largo alcance debiera ser incluida. Sitios de medición como Altzomoni, el cual se localiza a una altitud elevada pueden muestrear el aire que entra y sale de diferentes cuencas atmosféricas. Varias agencias de contaminación atmosférica cuentan con laboratorios móviles equipados con instrumentos para medir contaminantes criterio así como instrumentos más especializados. Estos pueden ser desplegados por varias semanas y pudieran brindar información importante en diferentes sitios candidato antes de la decisión sobre la selección final de los supersitios.

Hubo varios estudios de modelación usando diferentes tipos de modelos. Mientras que ellos están sujetos a una simplificación de la complejidad de la atmósfera como parte de su diseño numérico, la experiencia de campañas anteriores muestra que son capaces de capturar relativamente bien el transporte de contaminantes en la región. Su precisión es suficiente para usarlos en el proceso de análisis de datos y en evaluación de políticas. Aun cuando algunas mediciones pueden parecer poco interesantes, no obstante pueden ser extremadamente valiosas para acotar los modelos. Este es el caso de las emisiones de fondo. La expansión de redes de monitoreo de tal forma que cuenten con algunos sitios de fondo sería particularmente valioso. Asimismo, laboratorios móviles pueden usarse para muestrear aire de fondo por un par de días, tal y como lo hizo el laboratorio móvil de Aerodyne.

Mediciones detalladas de aerosoles pueden usarse para rastrear diferentes fuentes de emisión y por tanto son muy importantes para estudios regionales. También se quisiera resaltar el valor de instrumentos espectroscópicos de trayectoria larga tales como el DOAS y el FTIR, los cuales proveyeron de una gran cantidad de datos importantes durante campañas previas.

Campañas de monitoreo anteriores han durado al menos un mes. Esto es necesario para capturar diferentes tipos de eventos climáticos y episodios de contaminación. La experiencia sugiere que la longitud de las series de tiempo de mediciones aporta considerablemente al valor para su análisis.

LISTA DE ARTÍCULOS

La Lista completa de artículos se incluye en el **Apéndice 2.**

5.3 Primera reunión de expertos[13]

INTRODUCCIÓN

Después de la bienvenida por la Dra. Telma Castro, directora del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, y de los discursos de apertura de la Dra. Amparo Martínez, directora general del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, y del Dr. Andrés Flores, representante de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAM), la Dra. Luisa Molina, presidenta del MCE2, explicó los objetivos de la reunión y los resultados esperados:

1. Revisar y discutir los hallazgos de proyectos recientes, incluyendo campañas intensivas, el monitoreo de calidad del aire y estudios de modelación que pueden contribuir al proyecto ECAIM;
2. presentar y discutir los avances del proyecto ECAIM, y
3. explorar actividades de investigación y opciones de políticas públicas para mejorar la calidad del aire en la CRCM.

Durante la reunión se revisaron y discutieron los hallazgos de proyectos recientes, incluyendo campañas intensivas, el monitoreo de calidad del aire y estudios de modelación que pueden contribuir al proyecto ECAIM; se presentaron y discutieron los avances del proyecto ECAIM y se exploraron actividades de investigación y opciones de política pública para mejorar la calidad del aire en la CRCM. En particular, se discutieron los temas de expansión urbana, meteorología y climatología en la Corona Regional, evaluación de inventarios de emisiones, partículas, compuestos orgánicos volátiles, modelación de la calidad del aire, monitoreo de calidad biológica del aire, impactos de la contaminación atmosférica. Al final, los organizadores y moderadores realizaron un panel de discusión de las perspectivas sobre investigación y política pública para mejorar la calidad del aire en la CRCM basado en una síntesis de los temas que se trataron en la reunión.

A continuación se presenta un resumen de la información presentada en cada sesión de la reunión.

5.3.1 EXPANSIÓN URBANA

La sesión sobre expansión urbana comenzó con una reseña histórica sobre la región de la Corona por el Dr. Javier Delgado. Hay una conexión bidireccional entre la estructura urbana y el transporte, con modelos competitivos de ciudades compactas y en expansión. La presentación estuvo concentrada en la cuestión de periurbanización, que es un proceso de crecimiento urbano dispersivo que conduce a paisajes híbridos con características urbanas y rurales fragmentadas. Un área activa de investigación que ha ido evolucionando desde el uso de métodos cartográficos tradicionales a nuevos méto-

[13] Primera Reunión de Expertos sobre la Calidad del Aire e Impactos en la Región de la Corona del Centro de México, 10 y 11 de noviembre de 2014.

dos que utilizan Sistemas de Información Geográfica, es la de medir la magnitud de la extensión periurbana. El Dr. Delgado nos recordó que la megalópolis original es ahora un poblado pequeño en Grecia. En el otro extremo está la visión de ciencia ficción de una sola ciudad a nivel mundial, la Ekumenópolis. Actualmente, el litoral de la región noreste de los EUA funciona como una megalópolis abarcando desde Washington DC pasando por Nueva York a Boston. En Europa está el Randstad, un área urbana con la forma de una dona gigante. En una escala mucho más amplia (cercana a la de Ekumenópolis) se encuentra el corredor transfronterizo BeSeTo: Beijing, Seúl y Tokio. Beijing y Tianjin, una pequeña parte de BeSeTo, por sí misma contiene una población de 100 millones de personas. Con respecto a otras megaciudades, la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) está justo en el medio ya que no está del todo expandida ni muy concentrada, y con una población de 30 millones es más grande que algunas de las megaciudades asiáticas emergentes.

En México, la investigación sobre la región de la Corona comenzó en 1964 con el trabajo "El crecimiento de la ciudad de México" por Edgar Flores. Este trabajo se ha ido extendiendo ampliamente en el transcurso de los años, por ejemplo con el Índice de Urbanización de Espacios Periurbanos (Suarez *et al.,* 2014), y con "Megalópolis" por Garza *et al.,* 1987, quienes observaron la fortaleza entre las conexiones de las ciudades en la región.

El Dr. Delgado recomendó desarrollar estudios de origen-destino en los principales aglomerados periurbanos de la región de la Corona. Además, existe la necesidad de incrementar la concientización con los responsables de las políticas sobre la necesidad de políticas públicas informadas y estudiar los efectos del desarrollo regional económico y ambiental de la extensión periurbana que conduce a ciudades ineficientes.

En la segunda presentación de la sesión, el Dr. Couturier utilizó imágenes provenientes de Landsat para desarrollar mapas urbanos y tasas de urbanización. Él describió el desarrollo de un algoritmo de clasificación de árboles de decisiones y lo evaluó utilizando la cuenca del Alto Lerma. Landsat es capaz de determinar áreas de urbanización con una resolución de 0.25 hectáreas utilizando un algoritmo semi-automatizado de clasificación regional. Posteriormente, el Dr. Couturier contrastó estos datos de "media resolución" con datos de alta resolución disponibles de fotografía aérea, como imágenes QuickBird de Google Earth por ejemplo. A partir de éstas, es posible identificar visualmente polígonos de áreas urbanizadas que pueden ser utilizadas para evaluar la exactitud de productos de resolución más gruesa. De cualquier manera, sigue siendo importante realizar visitas al sitio para verificar los métodos.

Este trabajo ha producido mapas de alta resolución del crecimiento de áreas urbanas en la región de la Corona del 2000 al 2010, y por tanto la determinación de tasas de urbanización. Aun cuando existe un progreso continuo en los algoritmos de clasificación, estos aún requieren correcciones basadas en métodos visuales para mejorar la calidad de los datos así como de expertos en sitio para tener un mejor entendimiento de los procesos de urbanización en curso.

El Lic. Reyes García describió escenarios de expansión en la región de la Corona considerando hasta el 2020 usando el Índice de Urbanización de Espacios Periurbanos (IURP). Se utilizó el análisis de Componentes Principales e indicadores estándar con bases de datos del año 2000 al 2010 para clasificar diferentes áreas de la región respecto a su nivel urbano/rural, densidad de población, distancia terrestre a otras áreas metropolitanas, distancia a trabajos industriales e índices de migración.

Se desarrolló un modelo estadístico para estimar la probable expansión urbana con base en proyecciones de población para el año 2020. Esto ayudó a identificar áreas con el mayor potencial de crecimiento, por ejemplo Toluca con un incremento proyectado del 30%; y áreas con un menor crecimiento, por ejemplo la ciudad de México con un 10% de crecimiento proyectado. En una escala más fina, el modelo predice que dentro de áreas periurbanas habrá un surgimiento de nuevos centros urbanos con un tamaño pequeño a mediano. Estos podrán estar alejados de centros urbanos existentes y formar aglomeraciones, pero no está del todo claro si en este punto funcionarán como centros interrelacionados o no. Debido a la topografía en la región central de México, factores orográficos continúan siendo una barrera para el crecimiento urbano.

La presentación del Dr. Suárez, expuesta por el Dr. Delgado, se enfocó en el flujo de trabajadores entre municipios. Entre el 2000 y el 2010 hubo un incremento del 23 % en viajes de trabajo interregionales, mayor que el incremento poblacional del 13 %. En total se registraron 11.34 millones de traslados en 2010. Se mostró un mapa del índice de atracción por municipio para la región de la Corona, el cual mostró que pocos municipios son centros de atracción de trabajadores mientras las regiones circunvecinas son fuentes de trabajadores. Un mapa del porcentaje de la población que se traslada al trabajo reveló que en los municipios más urbanizados se puede alcanzar un 61.5 % mientras que tasas menores (por debajo del 15 %) tienden a presentarse en áreas rurales de la periferia. No obstante, ha habido una reducción en los traslados en la ZMVM y al mismo tiempo un aumento en los traslados en las regiones periféricas, con trabajadores trasladándose de 7 a 9 km en promedio. Un factor que contribuye a esta tendencia es la venta de automóviles viejos a residentes de la periferia, que conlleva a una tasa elevada de propiedad de automóviles en las afueras de la región.

La conclusión de la presentación de Dr. Suárez fue que los centros de las ciudades todavía atraen trabajadores. En particular, en el centro de la ciudad de México, el corredor Reforma-Polanco-Santa Fe es cada vez más importante mostrando que existe una tendencia a la reconcentración en ciudades globales. La región central de México difiere de economías avanzadas en que existe una menor inercia en el crecimiento de ciudades circunvecinas. De manera global, puede esperarse un aumento en la distancia al lugar de trabajo en áreas periurbanas y un decremento en la distancia promedio de los traslados a escala regional debido a la influencia de la ciudad de México. Excepto por Cuautla, este incremento en las necesidades de transporte

es preocupante. En particular, el mayor incremento se presenta en la región suburbana alrededor de Toluca. Hay una necesidad de planeación de crecimiento a nivel regional para delimitar el incremento en las necesidades de transporte y en las emisiones de contaminantes atmosféricos.

La última presentación para esta sesión fue por el Dr. Sobrino, quien discutió la dinámica económica en la región de la Corona. Esta es una de las 5 regiones en el país. A diferencia de Guadalajara por ejemplo, el uso de energía per cápita es 4 veces mayor en la ZMVM, pero el uso de energía por cada dólar del PIB es menor. El Dr. Sobrino discutió los posibles impactos de la revolución terciaria (desplazamiento de empleos al sector servicios) y de la revolución demográfica.

5.3.2 METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA EN LA REGIÓN DE LA CORONA

La sesión de meteorología y climatología en la región de la Corona se enfocó en las conclusiones que pueden obtenerse de estudios científicos previos así como de nuevas líneas de investigación utilizando mediciones y simulaciones computacionales.

El Dr. De Foy presentó una reseña del modelo conceptual de patrones de circulación de vientos en la ZMVM observados durante las campañas de medición MCMA-2003 y MILAGRO (MCMA-2006). De particular importancia para la calidad del aire fue la presencia de una zona de convergencia que conduce a concentraciones elevadas de contaminantes. La forma de esta zona depende de los patrones de vientos sinópticos y determina en dónde es más probable que se presenten las máximas concentraciones de ozono. En el pasado se han utilizado diferentes sitios frontera alrededor de la ZMVM. Los sitios de monitoreo al sur han tendido a medir aire limpio en la noche y parte de la madrugada, y posteriormente experimentan transporte del aire contaminado de la ZMVM por la tarde. Los sitios de monitoreo al oeste han estado cerca de fuentes locales (la carretera entre la ZMVM y Toluca) y por tanto han tenido problemas en identificar transporte regional. El sitio de monitoreo Altzomoni al este toma muestras de aire limpio con aire urbano vespertino mezclado, cuando la capa de mezcla es lo suficientemente alta. Al norte, las mediciones en Pachuca resultaron muy limpias con mayor influencia de fuentes locales. De manera general, esfuerzos anteriores en sitios frontera han encontrado que existen gradientes horizontales muy elevados en la región de la Corona, y que el núcleo urbano continúa estando más contaminado que la periferia. Dentro de la ciudad, se encontró que en Pico de Tres Padres se midió la capa residual en la noche y aire urbano mezclado durante el día, incluyendo el flujo de salida de la ZMVM en las horas finales de la tarde.

Al realizar un análisis de aglomerados *(cluster analysis)* de patrones de viento superficial se observó la importancia de flujos de drenado por la noche en la ZMVM, en particular un flujo débil y estable antes del amanecer. El modelo WRF representó este fenómeno adecuadamente, pero no tuvo un buen desempeño con los flujos de pendiente al suroeste de la cuenca. Debido a que estos flujos de drenado contribuyen a los picos de concentración de contaminantes, es importante evaluarlos y simularlos con la mayor precisión posible.

Un estudio sobre la isla de calor urbana en la ZMVM demostró que durante el día no se presenta una temperatura elevada de la isla de calor. Existe una temperatura relacionada con la isla de calor cerca de la superficie que tiene un máximo al final del verano y que se reduce al incrementar la vegetación. En la noche hay una isla de calor tanto para la temperatura del aire como para la temperatura cerca de la superficie. Esta isla nocturna de calor es mayor durante el invierno.

En términos de transporte de contaminación, la presentación resaltó la necesidad de considerar la dispersión en la vertical y de comparar resultados de modelación con mediciones de la columna total de contaminantes. Esto es particularmente importante para evaluar inventarios de emisiones o cuando se busca estimar factores de corrección de esos inventarios.

Finalmente, el Dr. De Foy presentó algunos datos satelitales que podrían ser utilizados para tener un mejor entendimiento de la contaminación atmosférica en la región de la Corona. Jayanta Kar de la NASA ha estado estudiando el venteo vertical de la pluma de la ZMVM utilizando el instrumento CALIPSO. Un análisis de datos de SO_2 del OMI es capaz de revelar detalles en alta resolución (~ 4 km) del transporte y emisión de SO_2, incluyendo la importancia del transporte de la pluma de Tula hacia la ZMVM, y del venteo de la pluma del Popocatépetl a la tropósfera libre. Rivera *et al.,* y el Dr. De Foy mostraron gráficas de NO_2 con el OMI, revelando que la ZMVM y Tula son las principales fuentes de emisión en la región. El análisis con exclusión de datos a escala más gruesa de NO_2 en el producto OMI reveló emisiones en Toluca, Cuernavaca y Puebla, no obstante son mucho menores que las de la ZMVM.

El Dr. J. Zavala presentó el sistema de pronóstico meteorológico que se maneja a nivel operacional en el CCA-UNAM usando el modelo WRF. Este cubre la parte central de México desde el borde del Océano Pacífico hasta el Golfo de México en una resolución de 6.6 km. Además del pronóstico, el propósito del sistema es el de construir una base de datos histórica de patrones de viento en la región de la Corona. Esto puede usarse por ejemplo para:

1. Relacionar el mezclado vertical y patrones de viento locales con patrones climáticos a escala sinóptica;
2. determinar el mezclado entre cuencas atmosféricas circunvecinas y por tanto definir las cuencas atmosféricas en la región de la Corona;
3. evaluar el modelo WRF e identificar la configuración óptima para la región, y
4. evaluar eventos de convección y su relación con la ventilación.

La segunda parte de la presentación se enfocó en el impacto del uso de suelo y la fracción de vegetación en las simulaciones meteorológicas. Las simulaciones con el modelo WRF utilizaron 5 diferentes bases de datos de uso de suelo y utilizaron 4 productos de satélite. La comparación con los productos de uso de suelo por fecha mostraron un gran incremento en la

urbanización de la región. El análisis está en progreso, pero resultados preliminares mostraron que al cambiar el uso de suelo en el modelo altera la temperatura en superficie. Actualmente el trabajo incluye la evaluación de flujos de calor en el modelo, la estratificación vertical de la meteorología y los balances de radiación en columnas de aire.

El Dr. Adams presentó un método nuevo para medir la actividad convectiva en México utilizando sensores GPS. La convección profunda tiene un impacto dominante en la meteorología y climatología de México durante la temporada de lluvias. Debido al intenso movimiento de la atmósfera en la vertical, la convección profunda conduce a una elevada transferencia de momento, masa, calor y especies químicas en la vertical. Debido a breves escalas temporales y pequeñas escalas espaciales, la convección profunda es particularmente difícil tanto de medir como de simular. Áreas de interés incluyen la transición de convección moderada a profunda, la organización de la convección en la mesoescala, las diferentes escalas involucradas en el desarrollo de la convección y las diferencias en regímenes entre diferentes regiones. Fuentes tradicionales de datos incluyen radiosondeos, observaciones en superficie e imágenes de satélite. Asimismo, es posible obtener datos de transectos utilizando sensores GPS. Estaciones meteorológicas con GPS pueden proporcionar el contenido de vapor de agua en la columna vertical (contenido de agua precipitable) a una resolución de 5 minutos. Después de una exitosa implementación en el Amazonas, la técnica fue utilizada para estudiar el monzón en Norte América con un transecto de estaciones en el noroeste de México. La red está siendo expandida en México e incluye 7 sitios GPS-Met y 6 sitios GPS en la región central de México. Esto contribuirá al entendimiento de los patrones diurnos de contenido de agua, formación regional de la convección y desempeño del modelo a resoluciones altas. En el contexto de la calidad del aire, estos estudios proporcionarán información valiosa del transporte de vientos en la región durante eventos de convección y sobre la interacción entre la calidad del aire y la precipitación, que es un área de creciente interés.

El Dr. Ruiz Angulo presentó un análisis de la simulación de la capa límite en la región de la Corona utilizando el modelo WRF. Hizo notar que hay un buen ajuste entre las simulaciones y las mediciones de la capa límite durante la campaña MILAGRO. Sin embargo aún existen preguntas respecto a la exactitud de la capa residual. El modelo WRF tiene diferentes esquemas de capa límite. Aun cuando el esquema YSU es el más utilizado para México, el Dr. Ruiz hizo notar que puede subestimar la capa límite debido a parámetros relacionados con la tasa de crecimiento convectivo. Al simular la capa límite, es importante considerar los impactos de la superficie del suelo y de la isla de calor urbana.

El Dr. Quintanar presentó resultados del análisis sobre la climatología de eventos de convección intensa en la cuenca de México. Una de las preguntas de investigación atribuye los impactos en la precipitación por la isla de calor urbana y por la contaminación de aerosoles. Esto es particularmente difícil en la ZMVM en donde existen grandes efectos por la orografía. Por ejemplo, un sitio

de monitoreo al noreste de la ciudad no ha experimentado cambios en la cantidad de precipitación entre 1941 y 1985, pero un sitio de monitoreo al este de la ZMVM ha experimentado un incremento en la precipitación en el mismo periodo. En particular, la frecuencia de eventos de precipitación intensos en este sitio aumentó en un factor de 5 durante el periodo de 40 años. Nuevos análisis sugieren que este incremento continuó hasta el año 2000, pero la cantidad de lluvia se ha estabilizado desde entonces. Esto podría relacionarse a un inicio retrasado de la convección debido al impacto de la contaminación. Las concentraciones de monóxido de carbono han disminuido recientemente, pero las de $PM_{2.5}$ han permanecido relativamente constantes. En el modelo WRF, un incremento en la concentración del número de gotas de nube suprime la precipitación. Además, un aumento en el tamaño del área urbana cambia los patrones de lluvia, y los efectos de isla de calor urbana alteran el tiempo en que se producirá la lluvia. Mientras en la década de 1940 el 70% de los eventos intensos ocurrieron entre las 7 pm y la medianoche, esto disminuyó a un 10% por la década de 1960. La tendencia desde 1960 ha sido de más lluvia vespertina que puede ser consistente con el inicio retrasado debido a la contaminación atmosférica. Una recomendación importante derivada de este trabajo es que se necesita más investigación sobre contaminación atmosférica en temporada de lluvias. En el pasado, la temporada de secas fue el foco de interés, pero es claro que existen procesos diferentes durante la temporada húmeda que necesitan ser explorados.

5.3.3 EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES

Esta sesión tuvo cinco presentaciones que abordaron varios temas, incluyendo:

1. Entender los nuevos requerimientos de datos de emisiones para correr el modelo de emisiones móviles (Moves);
2. esfuerzos actuales de INECC y Semarnat para la creación de una plataforma unificada de inventario de emisiones, y
3. ejemplos de diversas técnicas arriba-hacia-abajo (*top-down*) aplicados en México para evaluar la exactitud de los inventarios de emisiones.

Los ponentes y panelistas concluyeron que existe una necesidad importante en México para mejorar los procesos de recolección y calidad de los datos de actividad que se reúnen para generar inventarios de emisiones. Además, se recomendó que un grupo de expertos debiera de participar en el diseño, quizás como parte de este proyecto, de un conjunto de mediciones necesarias, experimentos, análisis de datos satelitales y técnicas analíticas y de modelación para una evaluación integral de los inventarios de emisiones en la región de la Corona.

El Dr. Velasco presentó un resumen de los resultados de mediciones de flujo de contaminantes obtenidas durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO mediante la técnica de torre de medición flujos en dos sitios en la ZMVM.

Describió la técnica de muestreo de flujo y las condiciones que deben cumplirse para poder tener medidas válidas diurnas y nocturnas. Se enfocó en la comparación de estos resultados con las estimaciones de emisiones correspondientes al inventario de la ZMVM y demostró que, dependiendo de la especie, puede obtenerse una sub- o sobre-estimación de las emisiones en comparación con los inventarios de 2003 y 2006. Sin embargo, indicó que uno de los puntos a tener en cuenta al interpretar los resultados de las mediciones de torre de flujo es una "huella" limitada o bien la atribución de flujos a regiones cercanas a la torre. Durante el día —cuando las emisiones son a menudo altas— el área de la huella puede ser de unos 300 m mientras que durante la noche el área de la huella es normalmente de unos 2 km. Por lo tanto, una adecuada desagregación espacial del inventario es esencial para evaluar la exactitud de las emisiones. Mencionó que hay nuevos esfuerzos en la ZMVM para actualizar las mediciones de flujo con torres adicionales. Estas pueden ser herramientas valiosas para evaluar la exactitud de futuros inventarios de emisiones y para ayudar a los esfuerzos de mejorar la caracterización de la distribución temporal de fuentes clave de emisión.

El biólogo Rodolfo Iniestra describió las actividades actuales del INECC y Semarnat para crear una nueva plataforma unificada de inventario de emisiones para México. La nueva plataforma integrará toda la información de pre-procesamiento de emisiones y productos de datos listos para modelación, de todas las fuentes disponibles para el país. Mencionó que el proyecto es una gran oportunidad para crear una estructura institucional fuerte y eficiente para mejorar el proceso actual de compilación de inventarios de emisiones. La nueva plataforma tendrá la capacidad de producir inventarios de emisiones a escala local, regional y nacional. Una idea principal del proyecto es centralizar tanto la infraestructura como el personal experimentado necesarios para crear y evaluar los inventarios de emisiones. Este enfoque incluye también la fusión de equipos de trabajo de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero en un grupo de trabajo integrado en una sola institución gubernamental. Un resultado esperado de este proyecto es la capacidad de producir inventarios de emisiones con mayor frecuencia. Mencionó que el INECC también está evaluando la posibilidad de incluir contaminantes adicionales (por ejemplo metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y forzantes climáticos de vida corta) a las estimaciones de emisiones de referencia en la plataforma unificada. Sin embargo, el inventario de emisiones será organizado por tipo de sector de emisión, no por contaminante. Así, una nueva característica de la plataforma unificada es que además de las estimaciones puntuales de emisiones por sector, serán también incluidas las incertidumbres relacionadas a las estimaciones.

El Dr. Torres presentó las actividades de investigación de comparaciones “arriba-hacia-abajo” (*top-down*) entre estimados de cocientes de contaminantes en los inventarios de emisiones y observaciones en superficie correspondientes en la región de la Corona o en el área periférica de la ZMVM. Las com-

paraciones entre las concentraciones ambientales y los cocientes de los contaminantes en el inventario de emisiones son útiles para examinar la composición relativa de los inventarios de emisiones. Sin embargo, son menos útiles para verificar cantidades de emisiones absolutas, a menos que se combinen con las evaluaciones del tipo abajo-hacia-arriba (*bottom-up*). Describió los datos de emisiones y las condiciones meteorológicas necesarias para aplicar esta técnica, así como sus limitaciones e incertidumbres. Presentó resultados de correlaciones entre mediciones ambientales de CO y NO_X (desagregadas por día de la semana) obtenidas por el CCA-UNAM en varios lugares de la Corona que están dominados por fuentes urbanas frescas. Curiosamente, las correlaciones mostraron magnitudes similares independientemente de la ubicación, lo que sugiere una composición similar de las fuentes de emisión que pueden impactar esos sitios. Sin embargo, la comparación con las estimaciones de inventarios de emisiones disponibles para los mismos lugares fue problemática debido a la baja calidad de los datos de emisión disponibles. Esto es una indicación de la gran necesidad de mejorar los inventarios de emisiones en el área periférica de la ZMVM. Destacó que la gran incertidumbre en los inventarios de emisiones en el área de la Corona debe reducirse antes de intentar modelar la calidad del aire en la región.

El Dr. Grutter presentó un resumen de las herramientas satelitales y productos de medición remota disponibles para evaluar la calidad del aire en una región. En su presentación incluyó una breve historia del uso de datos satelitales para la evaluación de la calidad del aire así como una descripción de sus limitaciones para usarse como herramientas en la evaluación de la exactitud de los inventarios de emisiones. Además de variar la distribución temporal y la cobertura espacial, los datos satelitales todavía enfrentan limitaciones en la precisión de los estimados de concentración para evaluar la magnitud de varios contaminantes importantes. Sin embargo, nuevos avances tecnológicos son muy prometedores, especialmente para las partículas finas, y las técnicas satelitales pueden desempeñar un papel importante en el futuro para evaluar la calidad del aire y la precisión de los estimados de inventarios de emisiones. Presentó ejemplos de estimaciones de columna de NO_2 usando datos de los satélites Sciamachy con una resolución de 40 x 40 km que mostraron una clara desagregación de las fuentes de NO_x en la región central de México. Describió los algoritmos utilizados para realizar el análisis de datos de los satélites Sciamachy y OMI (con resolución de 13 x 24 km). Mencionó que en muchas partes del mundo, estas herramientas ya se han aplicado para entender mejor los problemas de calidad de aire en las megaciudades. El grupo de CCA-UNAM también ya ha comenzado a aplicar estas técnicas en México.

La Mtra. Angélica Velázquez presentó los resultados de un estudio reciente que pretende utilizar el modelo Moves 2014 para estimar datos de emisiones de gases para fuentes móviles en México. Mencionó la importancia del uso de modelos nuevos y mejorados que incorporen los resultados de los últimos estudios de emisiones para fuentes móviles. Sin embargo, describió que una de

las principales limitaciones para la aplicación del modelo Moves en México es la falta de los datos de actividad necesarios para representar correctamente las condiciones locales. Presentó este problema mostrando los datos de entrada requeridos para el modelo y los comparó con los datos de entrada que normalmente se han utilizado en otros modelos. Mencionó que Moves presenta varias ventajas importantes en comparación con el anterior modelo Mobile de EPA, incluyendo una mayor desagregación de los factores de emisión por categoría de vehículo y por día de la semana, así como las diferencias en la incorporación de los requisitos estándar del vehículo y combustible para la flota vehicular. Presentó una comparación de las emisiones de factores de COV y CO para México obtenidos con los modelos Moves y Mobile. Los factores de emisión de compuestos orgánicos obtenidos con Moves fueron menores a los correspondientes factores de emisión obtenidos con el modelo Mobile, particularmente para los vehículos más recientes, mientras que Moves estimó factores de emisión de CO menores a los estimados con Mobile para modelos vehiculares de todos los años.

5.3.4 MATERIAL PARTICULADO

La Dra. Salcedo empezó la nueva sesión sobre aerosoles en la ZMVM. Entre 1990 y 2005 hubo una reducción importante en material particulado (MP). Sin embargo, datos más recientes muestran que los niveles de concentración de partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$) continúan relativamente estables, teniendo concentraciones bajas en la temporada de lluvias y concentraciones más altas en la temporada de secas. De manera general, aún existen muchos días poco saludables principalmente por ozono. No obstante, se registran 146 días con una concentración de $PM_{2.5}$, promedio de 24 horas, arriba de 40.5 ug/m^3; y 94 días con una concentración de PM_{10}, promedio de 24 horas, por arriba de 121 ug/m^3. Las concentraciones más elevadas se presentan al noreste de la ZMVM.

Posteriormente, la Dra. Salcedo presentó resultados de la campaña MILAGRO, mostrando que en la ciudad (el supersitio T0 ubicado en el Instituto Mexicano del Petróleo) el 50 % de las $PM_{2.5}$ fue de origen orgánico, 25 % inorgánicas secundarias y 25 % de carbón elemental y partículas minerales. De manera global, las $PM_{2.5}$ representaron el 50 % de la masa de PM_{10}. Gran parte de las partículas gruesas fue material mineral (60 %). En el sitio rural T1 (Universidad Tecnológica de Tecámac), en el extremo norte de la ZMVM, la fracción orgánica se redujo en un 25 % y el contenido mineral se incrementó en un 36 % (80 % de las partículas gruesas). Esto mostró que el polvo tuvo un gran impacto en el sitio T1, en comparación con T0. Durante la campaña, se encontró que el carbono negro tuvo un componente significativo de partículas menores a un micrómetro (PM_1) y también un patrón diurno muy marcado con altas concentraciones en la hora pico matutina debido a emisiones vehiculares primarias seguido de concentraciones más bajas en la tarde debido a dilución en la capa límite. En comparación, la componente orgánica de PM_1 tuvo un incremento retardado sugiriendo la importancia de aerosoles orgánicos secundarios. Las fracciones de nitrato y amonio son fenómenos

diurnos controlados por la fotoquímica. Esto contrasta con los sulfatos, los cuales tienen menor variabilidad durante el día debido a que provienen de fuentes más grandes y estables con un patrón de distribución regional. Se detectó cloro debido a quema de basura y quemas de residuos de cultivos.

Viendo con más detalle los aerosoles orgánicos de las PM_1, alrededor de la mitad son aerosoles orgánicos oxigenados de origen secundario y se presentan principalmente durante el día. Se componen de aerosoles orgánicos de tipo hidrocarburo provenientes de emisiones urbanas primarias, aerosoles orgánicos por quema de biomasa y aerosoles orgánicos primarios locales que contienen nitrógeno.

El análisis de la campaña MILAGRO sugiere que el inventario de emisiones de partículas de 2006 subestima las emisiones primarias al menos por un factor de 4. El uso de biocombustibles para cocción e industria así como la quema de basura pudieran ser fuentes importantes de aerosoles orgánicos primarios mismas que no se incluyen en el inventario. Los incendios forestales están subestimados, en parte porque ocurren fuera de la frontera de la ciudad. Finalmente, erosión de suelos y emisiones biogénicas son regionales de origen y necesitan ser considerados en el inventario.

La Dra. Salcedo también presentó resultados de mediciones de la calidad del aire regional en el estado de Morelos. Esto mostró que los niveles son mucho menores a los de la ZMVM, pero están aumentando y comienzan a ser un problema de salud.

La Dra. Paredes-Miranda discutió resultados sobre dispersión y absorción de luz por aerosoles en la campaña MILAGRO y los comparó con resultados de Reno y las Vegas, en Nevada EUA, con el fin de investigar la relación entre óptica y química de aerosoles. De particular interés es la fracción de aerosoles orgánicos secundarios en la ZMVM. Se utilizó un espectrómetro fotoacústico (PAS) para medir los coeficientes de dispersión y absorción en una longitud de onda de 532 nm. Durante MILAGRO, se presentó un coeficiente diurno muy marcado en el sitio T0 (IMP), con coeficientes de absorción elevados durante horas pico. En contraste, el coeficiente de dispersión es menor cerca del amanecer y aumenta hasta el mediodía. El albedo de dispersión simple tiene un máximo en las primeras horas de la tarde. Los perfiles diurnos son más acentuados en la ZMVM en comparación con Las Vegas y Reno, en parte porque hay una variación diurna más pronunciada de la velocidad de viento. Estas mediciones pueden utilizarse para obtener un estimado alternativo de la fracción de la masa de aerosoles debido a aerosoles secundarios. Tanto el estimado por mediciones de masa como el obtenido por mediciones fotoacústicas encontraron que esta fracción fue como mínimo del 35 % en el amanecer y disminuyó un 75 % a la mitad de la tarde.

Un objetivo secundario del estudio fue el de probar suposición de que la concentración de contaminantes escala con la raíz cuadrada del tamaño de la ciudad, mediante la comparación de mediciones en 5 ciudades: Reno,

Las Vegas, Delhi, Beijing y ciudad de México. Aun cuando esta muestra es pequeña, hubo una correlación aceptable con base en las mediciones.

El Dr. Jazcilevich presentó resultados del análisis de emisiones de diésel y de la construcción de escenarios de flota vehicular a diésel. Los autores describen el desarrollo de un modelo computacional similar al LEAPS (Long-range Energy Alternatives Planning System) pero basado en Matlab (Matrix Laboratory), más amigable al usuario y capaz de realizar un análisis de emisión y uso energético. El modelo toma como entradas el tamaño inicial de la flota vehicular y la distribución tecnológica; el crecimiento de la flota vehicular como función de la demanda, PIB o crecimiento poblacional, diferentes opciones de políticas con respecto a la sustitución tecnológica; y finalmente precios de la tecnología, consumo de combustible y factores de emisión. Con estas entradas, el modelo genera estimados anuales del tamaño y distribución de la flota vehicular, número de nuevos vehículos, costos de adquisición, cambios en factores de emisión y cambios en costos de combustible. Como ejemplo, se presentaron resultados del modelo para la flota de vehículos de recolección de residuos sólidos en la ZMVM bajo escenarios de bajo y alto crecimiento. Los estimados de la flota y contaminación se utilizaron en un análisis de costo beneficio. La investigación se encuentra actualmente en busca del impacto de barreras legales y tecnológicas usando análisis de costo-beneficio.

La segunda parte de la presentación se enfocó en polvo por erosión de suelos. Como se mencionó anteriormente, el polvo es un componente importante en las partículas de la región de la Corona, y una gran parte proviene de la erosión de suelos descubiertos por la acción del viento. Se utilizó el modelo WEPS para estimar las emisiones de polvo con base en las características del suelo y para alimentar al modelo MCCM (un precursor de WRF-Chem). Además de un estudio de modelación, políticas de mitigación están siendo exploradas, por ejemplo barreras naturales de viento y orientación de surcos.

La Dra. Hansen presentó mediciones del depósito de mercurio por vía húmeda en México. El proyecto creó una red de estaciones de muestreo alrededor de México. Esto requirió que dos operadores vivieran cerca de los sitios de monitoreo y tuvieran buen acceso a servicios de mensajería para que las muestras pudieran ser enviadas rápidamente a las instalaciones del NADP en Seattle, EUA. Los sitios tuvieron un sistema automático para recolectar muestras de precipitación. Las mediciones se reportaron del 2003 al 2005 y se encontraron patrones estacionales correspondientes a la temporada de lluvias. Asimismo, en algunas semanas el material se depositó a tasas mayores a la media anual por un factor de 5 a 10. Los resultados se compararon con otros sitios alrededor de la costa del Golfo, mostrando que las tasas en que el mercurio se depositó en la estación de México fueron significativamente menores que las tasas en que se depositó a lo largo de la costa de EUA. Debido a que el mercurio es una fuerte neurotoxina, se recomendó que se continuara con el sistema de monitoreo. Esto podría permitir la caracterización de patrones geográficos y tendencias a que se deposite

por vía húmeda para usarse en el manejo de ecosistemas y temas de salud pública. En particular, se requieren más datos para evaluar tasas de exposición, efectividad en la reducción de emisiones, identificar patrones de transporte de mercurio, cumplir con acuerdos internacionales e incrementar el conocimiento científico de contaminación por mercurio.

El Dr. Peralta describió mediciones en superficie de carbono negro (CN) y el desarrollo de una red de mediciones de flujo para estimar emisiones de CO_2 y CH_4. Para concentraciones en superficie, en su presentación describió dos maneras diferentes de medir CN: el método óptico y el método basado en masa que deriva el CN a partir de mediciones de carbono elemental. El método óptico requiere un estimado de la sección transversal de absorción de masa (MAC, medida en m^2/g). La incertidumbre en este parámetro se relaciona con la incertidumbre en las concentraciones de CN. Para los flujos de CO_2 y CH_4 se está desarrollando una red que utiliza sistemas de covarianza turbulenta ubicados en techos de edificios. Un anemómetro sónico se utiliza para registrar velocidad de viento y calcular flujos de emisiones a partir de las mediciones con alta resolución temporal de CO_2 y CH_4. Las mediciones se han realizado en tres lugares: UNAM, Altzomoni y Juriquilla, Querétaro.

5.3.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

El Dr. Velasco comenzó la sesión de compuestos orgánicos volátiles (COV) con una reseña de los resultados de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO. Existe una gran cantidad de datos de estas dos campañas que han derivado en un gran número de publicaciones en la revista *Atmospheric Chemistry and Physics* y otras revistas también.

Las bases de datos, extremadamente detalladas y diversas, de COV y especies nitrogenadas revelaron:

1. Los niveles ambientales de COV duplican los de ciudades en EUA;
2. hay abundancia de alcanos;
3. hay niveles tóxicos elevados, y
4. hay niveles elevados de metanol, aldehído y otros COV oxigenados.

Durante la campaña, las primeras mediciones de COV por flujo turbulento brindaron una evaluación más directa de inventarios especiados para olefinas, tolueno, metanol y otras especies medidas con PTR-MS. Datos de COV de alta resolución mostraron el impacto de fuentes discretas y eventos extremos. Estos datos detallados también sentaron la base para modelos de fuente-receptor. La base de datos permitió la evaluación de modelos fotoquímicos en términos de especies precursoras y productos intermedios. Finalmente, las primeras mediciones de concentración de glioxal se realizaron durante la campaña MCMA-2003. Este es un compuesto intermedio clave para la oxidación aromática y es de utilidad para calcular tasas de formación de aerosoles orgánicos secundarios.

Los retos para la región de la Corona desde la perspectiva de COV son la existencia de una megaciudad, 9 aglomeraciones urbanas y 80 poblados

pequeños con una mezcla de emisiones urbanas, rurales y biogénicas. Esto significa que dentro de la región hay áreas con diferente composición de COV y reactividad de OH, que necesita tomarse en cuenta para un mejor entendimiento de la fotoquímica en el área.

La presentación de la Mtra. Tejeda se enfocó en la caracterización fisicoquímica de $PM_{2.5}$ y COV por industrias en la ZMVM. El estudio duró tres meses en la temporada seca (feb.-mar.) y tuvo lugar en Naucalpan de Juárez, un área industrial al noroeste de la ZMVM. Se observó consistencia en los COV determinados para equipos a diésel. Entre los principales compuestos encontrados se cuentan tolueno, etano, propano y acetileno. Los resultados de las muestras de gas LP y gas natural no presentaron un perfil consistente y se llegaron a determinar compuestos de más de 5 carbonos y aromáticos en algunas muestras.

El Quim. Retama, director de la red del Simat, presentó resultados de mediciones de precursores de ozono en la ciudad de México durante una campaña en el 2012. Aun cuando existe un progreso en la reducción de la concentración de ozono desde 1994, en años recientes el ozono está alcanzando niveles estables que están por encima de los estándares de salud. El objetivo del estudio es generar datos acumulados durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO para obtener una serie de tiempo más amplia de mediciones continuas. Estas pueden usarse para diseñar estrategias efectivas en costos para reducir la contaminación atmosférica en la ZMVM y mejorar modelos fotoquímicos que se utilizan tanto para desarrollar estrategias de control y sus impactos.

Las mediciones fueron realizadas en dos sitios: en el centro de la ZMVM en La Merced y en el suroeste de la ciudad en la estación Pedregal de la RAMA. Los gases criterio fueron medidos como parte de las mediciones estándar de la RAMA (CO, NO_x, O_3, SO_2) junto con parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa, dirección del viento, velocidad del viento). Los hidrocarburos C2 a C12 fueron medidos mediante cromatografía de gases con una serie de Syntech Spectras GC955 611/811. Los resultados preliminares fueron presentados entre febrero y mayo de 2012, mostrando la composición relativa de COV junto con los patrones diurnos de las especies individuales. El rastro de gas licuado de petróleo (GLP) puede verse claramente. El isopreno tiene un componente claro en horas pico debido a las emisiones antropogénicas y un pico mucho menor en horas de la tarde que posiblemente podría estar relacionado con las emisiones biogénicas.

Planes futuros incluyen extender el monitoreo a períodos de muestreo más prolongados y a diferentes sitios. En particular, siguiendo el programa de la US-EPA, evaluación fotoquímica de estaciones de monitoreo (PAM) el estudio buscará incluir sitios con tipo 1 (concentraciones de fondo), tipo 2 (emisiones máximas de precursores), tipo 3 (concentraciones máximas de ozono). También hay un plan para incluir el monitoreo de NO_y. Trabajo actual incluye la mejora de los procedimientos QA/QC, el análisis de los datos y la publicación de un primer informe.

El Dr. Huertas dio la presentación final de la sesión en mediciones de COV en la ZMVM durante 2011 y 2012. Se escogieron cuatro sitios: La Merced, Iztapalapa, San Agustín y Pedregal. Un sistema de muestreo automático de COV fue desplegado durante los meses de marzo y noviembre. Canisters fueron usados en 2 modos diferentes: muestreo de 3 horas y 24 horas. Usando un GC-FID, podrían medirse 64 concentraciones de compuestos orgánicos volátiles. Con un GC-MS, se midieron 36 especies tóxicas. De esta manera, el estudio fue capaz de identificar COV asociados con los principales grupos de emisiones (ej. fuga de GLP, industria petroquímica, emisiones de vehículos de gasolina y diésel, solventes etc.). Las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles han disminuido sustancialmente desde la MCMA-2003 y MILAGRO, pero aún son mayores que el NAAQS. Debido a que el estudio tuvo información de especiación, fue posible estimar la evolución del potencial de formación de ozono, mostrando una disminución en los 4 sitios.

En conclusión, el Dr. Huertas informó que existen diferencias estacionales, que compuestos BTEX están muy influenciados por las emisiones móviles, que compuestos orgánicos volátiles en el grupo de GLP tienen las concentraciones más altas y que se han producido reducciones importantes en los últimos 10 años. Las reducciones son particularmente notables en la industria petroquímica y del escape de vehículos diésel. El tolueno fue el COV con la concentración más alta en este estudio y representó el 25% del total de emisiones de compuestos orgánicos volátiles tóxicos. Esto sugiere que el uso de pinturas a base de aceite debe ser limitado y que debe restringirse el uso de vehículos construidos antes de 1991.

5.3.6 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

El Dr. García-Reynoso inició la sesión con un resumen de los retos de la modelación de la calidad del aire en la región de la Corona. Estos incluyen la necesidad de determinar la distribución espacial y temporal de las emisiones; el impacto de las nuevas tecnologías sobre las emisiones; el impacto del uso de suelo; los cambios debido al desarrollo urbano y los cambios asociados en las emisiones en las zonas urbanas y rurales; la especiación de las emisiones locales; emisiones biogénicas y volcánicas; y el impacto de grandes fuentes puntuales o de área fuera de la región. En cuanto a la fotoquímica, los desafíos clave incluyen la determinación de los mecanismos químicos y reactividad atmosférica; la simulación de aerosoles; los efectos radiativos de aerosoles; y los componentes tóxicos en la atmósfera. La complejidad del problema conduce a desafíos en la evaluación de modelos especialmente porque la calidad del aire no es homogénea dentro del área urbana, y porque hay relativamente pocas mediciones en sitios remotos. En cuanto a pronósticos de calidad del aire, se señaló que estos requieren predicciones meteorológicas de alta calidad, inventarios de emisiones precisos y patrones mejorados de uso de suelo. Otras cuestiones a tener en cuenta

son la bioacumulación de componentes tóxicos y el impacto sobre el cambio climático.

El Dr. Almanza presentó los resultados de la evaluación del modelo WRF-Chem utilizando datos de redes de monitoreo del 2008. Las simulaciones de la ZMVM en junio de 2008 encontraron que las concentraciones de modelo fueron significativamente mayores que las mediciones de la RAMA. Reducciones en las emisiones del 40% fueron necesarias para coincidir las concentraciones de CO y NO, pero esto tuvo un impacto mínimo en las concentraciones de ozono. Evaluaciones meteorológicas encontraron que el modelo caracterizó correctamente la evolución diurna de la velocidad de viento, pero exhibió un fuerte sesgo frío durante todo el día. Si bien existe una densa red de medición de contaminantes criterio en la ZMVM, hay mucho menos mediciones en las ciudades vecinas. Esto plantea un problema para la evaluación del modelo. Mediciones remotas por satélite pueden utilizarse hasta cierto punto para estudiar la calidad del aire regional, pero esto proporciona información limitada en comparación con mediciones in-situ. Como un caso de prueba separado, también se presentaron resultados para Guadalajara y Monterrey, de nuevo mostrando discrepancias significativas entre las concentraciones simuladas y medidas.

La conclusión de la evaluación del modelo fue que hay una necesidad particular de monitoreo de COV especiados y también una necesidad particular de estaciones de monitoreo en áreas urbanas y rurales que rodean la ZMVM. Esto ayudaría a ajustar las conclusiones de la campaña MILAGRO a las condiciones actuales en la región de la Corona. Otra sugerencia fue utilizar los resultados del modelo en la identificación de sitios potenciales para sitios de monitoreo.

El Mtro. Barrera presentó evaluaciones del modelo WRF-Chem de 2 campañas de campo: una primera campaña en Amecameca (sureste de la ZMVM) que tuvo lugar en febrero y marzo de 2011 y una segunda campaña en Chipilo (Puebla) que tuvo lugar en marzo / abril de 2012. Las campañas de campo incluyeron 3 y 4 estaciones de superficie respectivamente, y 1 estación con un globo sonda. Se encontró una fuerte discrepancia entre WRF-Chem y los perfiles verticales de temperatura hasta 1000 m. En ciertos eventos, el perfil de la capa de ozono hasta 1000 m mostró un cambio claro en la capa límite superficial y la capa superior. Esto sugiere la necesidad de seguir trabajando en la evaluación de las simulaciones meteorológicas en áreas con terreno complejo dentro de la región de la Corona.

El Dr. Stremme comparó los resultados de las simulaciones del modelo WRF-Chem con datos de teledetección por satélite. Su usó la columna total de NO_2 de OMI a bordo el satélite Aura, junto con las columnas de CO de IASI a bordo el satélite Metop-A. Los datos de NO_2 se toman cerca de las 13:30 pm, hora local, mientras que los datos de CO se toman por la mañana. Las columnas OMI de NO_2 detectan claramente la pluma de la ZMVM y el transporte de la pluma de Tula. Hay una pequeña señal cerca de Cuernavaca, pero en los resultados presentados Toluca y Puebla no eran visibles. La comparación con las

mediciones de zenith del DOAS sugieren que la columna real es más del doble que la derivada por satélite, lo que tiene implicaciones importantes para el uso de datos satelitales en el desarrollo de inventarios de emisiones. Un extenso trabajo de validación también se realizó con los datos de CO de IASI, junto con una técnica especial de reconstrucción. Los resultados sugieren que existe un acuerdo excelente en la ZMVM para las emisiones de CO, pero que son ligeramente subestimados en las regiones circundantes.

El Mtro. Ortinez describió el trabajo de modelación que se realiza en el INECC y del desarrollo del Cema (Centro de Modelación Ambiental). Subrayó la necesidad de una línea de formación de investigadores con la posibilidad de desarrollar modelación de calidad del aire. Por el momento, hay varias instituciones dedicadas a la modelación de la calidad del aire. Hay una fuerte representación de instituciones académicas (CCA-UNAM, ITESM, UAM) y de organizaciones gubernamentales (GDF-Guanajuato, Sedema-GDF, INECC, Semarnat) junto con algunas organizaciones locales, algunas organizaciones paraestatales (IMP) y organizaciones no gubernamentales (MCE2). Algunas de las barreras para la formación de investigadores en modelación incluyen la falta de empleos en consultoría ambiental de modelos de calidad del aire y la falta de espacios para modeladores en estructuras de gobierno local y federal. Esto desafortunadamente conduce a que algunas personas altamente calificadas abandonen el sector de calidad del aire para trabajar en áreas totalmente diferentes en la que fueron entrenados. Un grupo fuerte de modelación requiere de cómputo de alto rendimiento, expertos en tecnologías de la información, sistemas de administración de bases de datos, expertos en SIG, inventarios de emisiones de alta calidad y bases de datos meteorológicas. El INECC dispone de un departamento de modelación de calidad del aire que trabaja con las universidades y los consultores pero sufre de algunas debilidades, incluyendo la falta de inversión. Por esta razón, actualmente hay un impulso para desarrollar el Cema, el Centro de Modelación Ambiental, que incluirá esfuerzos de modelación para cambio climático; gestión de riesgo y accidentes; y modelación regional y urbana.

5.3.7 MONITOREO DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE

La sesión sobre monitoreo de la calidad del aire biológica contó con tres presentaciones: una red de monitoreo Aerobiológica; sensibilización sobre alérgenos; y la relación entre polen y salud. La Dra. Calderón-Ezquerro describió la Red Mexicana de Aerobiología (Rema). Los alérgenos afectan a más del 20% de la población. En particular el polen es alergénico y su concentración depende de los tipos de vegetación, factores meteorológicos y las variaciones climáticas. El polen en el aire también puede utilizarse como un bioindicador de contaminación ambiental porque los aerosoles se adhieren al exterior del grano de polen. La Rema ha estado en funcionamiento desde el año 2008 y contiene 8 estaciones a lo largo de México. La red utiliza trampas Hirst de esporas para recoger el polen que luego es identificado y cuantificado por tipo. Por lo general, alrededor de 45 tipos de polen se identifican en los diferentes sitios, y los índices de polen pueden variar en un factor de 2 a 4 de un año a otro, dependiendo del sitio.

El proyecto fue ampliado recientemente para realizar mediciones en la región de la Corona: Toluca, Puebla y Morelos. Se presentaron resultados para el verano de 2014. Entre los logros del proyecto se incluye una mejor caracterización de la calidad del aire biológica con miras a establecer calendarios polínicos para cada parte de la región. Esto se combina con una cartografía mejorada de la vegetación e inventarios para identificar fuentes y estudios de los impactos de la variabilidad meteorológica y climática sobre las emisiones y transporte de polen. Tanto las poblaciones vulnerables como el sector salud se beneficiarán con mayor información sobre la calidad biológica del aire en el área.

La Dra. Larenas-Linnemann debatió la cuestión de sensibilización de aeroalérgenos y los impactos sobre el asma y la rinitis alérgica. Esta investigación fue parte del Estudio Internacional de Asma y Alergias en Infantes, que comparó datos de varios países. La prevalencia de asma y rinitis en México resultó cercana a la media en todo el mundo para el grupo de 6 a 7 años de edad, con alrededor del 10% de los niños afectados. En el grupo de 13-14 años de edad, la prevalencia fue ligeramente mayor en México que el promedio, alcanzando por encima del 15% de niños afectados. Se llevó a cabo investigación en todo el país para ver el impacto de diferentes zonas climáticas y vegetación. Se presentaron resultados sobre la prevalencia de la rinitis estacional, perenne o perenne con exacerbación estacional. Las tasas resultaron ser mucho más altas en las zonas tropicales de México que en las zonas áridas. De interés adicional, se observó que los ácaros del polvo domésticos eran un problema mayor para los niños que polen de árbol.

La presentación final de la sesión por el Dr. Terán estuvo enfocada en la relación entre pólenes y sus impactos en salud. Con el aumento de la edad en los niños, hay un aumento progresivo en la enfermedad alérgica, de eczema a las alergias alimentarias a rinitis y asma. Además ha habido un marcado aumento a nivel mundial en la prevalencia de asma, que en México es responsable del 18% de visitas a urgencias y 35% de los pacientes que reciben tratamiento pero que no son admitidos a hospitales. De acuerdo con la presentación anterior, se observó que polvos de ácaros (DPT) representan la mayor parte de los alérgenos seguido por animales domésticos y luego por árboles. Entre los árboles, hay una gran variación en potencial alergénico. El fresno es el peor. En Nueva Zelanda, la especie decorativa ligustro (trueno) fue erradicada debido a su potencial alergénico.

Otro factor que complica aún más en el debate es que en regiones contaminadas, las personas sufren más estrés y por lo tanto son más propensos a las alergias. Además, las plantas también están bajo más estrés, lo que tiende a hacerlas más alergénicas.

5.3.8 IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El Dr. Osornio comenzó la sesión sobre impactos de la contaminación del aire con la revisión de efectos sobre la salud, señalando que la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer ha clasificado formalmente la

contaminación atmosférica y material particulado como carcinógenos humanos. Se estima que hay 7 millones de muertes en todo el mundo debido a la contaminación del aire, la mitad de los cuales es por contaminación en exteriores, siendo principalmente por cardiopatía isquémica y por accidentes cerebrovasculares. La investigación sobre los efectos de la contaminación del aire en salud humana abarca 3 categorías: epidemiológica, tóxica y clínica. Juntas, éstas han ampliado enormemente nuestra comprensión sobre el tema, aunque todavía queda mucho por hacer. En particular, la investigación sobre los efectos en la salud puede utilizarse para informar sobre las políticas de tres maneras: evaluación de los riesgos e impactos, creación de un índice de salud de calidad del aire y en la evaluación de los impactos de las políticas previamente introducidas. También se necesita investigación para comprender mejor los procesos en el trabajo incluyendo cadenas causales, los mecanismos y el impacto de la mezcla de contaminantes.

La presentación del Dr. Arnott se centró en el uso de datos de productos satelitales de profundidad óptica de aerosoles (AOD) para estimar las concentraciones en superficie de $PM_{2.5}$ y usarlas en aplicaciones de salud. Los instrumentos MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua proporcionan estimados de AOD así como el instrumento MISR a bordo de Terra. Se han desarrollado relaciones empíricas para estimar concentraciones de $PM_{2.5}$ a partir de la AOD utilizando diversas hipótesis. Las tendencias sobre megaciudades presentan una concordancia entre los instrumentos de los tres satélites, con algunas zonas experimentando un aire más limpio, mientras que otras se están poniendo más contaminadas. Evaluar la exactitud de estas estimaciones no es una tarea trivial y fue realizado en la ZMVM durante la campaña MILAGRO. Una red de fotómetros solares fue utilizada en toda la ciudad para comparar concentraciones in-situ y cantidades de columna con estimaciones de AOD derivadas con datos de satélite. Se obtuvieron buenas estimaciones cuando la proporción de reflectancia superficial era conocida con precisión. La investigación actual sobre la relación de AOD con $PM_{2.5}$ en superficie se está llevando a cabo con un esquema que combina muchas mediciones diferentes: sensores satelitales de detección remota, sensores fotoacústicos, nefelómetros, fotómetros solares y monitoreo de $PM_{2.5}$. Para concluir: los fotómetros solares son necesarios para evaluar los resultados obtenidos por satélite; el albedo en superficie debe ser considerado cuidadosamente; las nubes impiden la determinación de la AOD; y la estratificación vertical puede crear una desconexión entre AOD y $PM_{2.5}$ en superficie.

El Dr. Mejía-Velázquez presentó los resultados de la evaluación del riesgo de exposición a $PM_{2.5}$ en la zona metropolitana de Monterrey, que tiene un problema de contaminación por $PM_{2.5}$ más grave que Toluca y la ZMVM. Se utilizó un modelo de riesgo que combina la identificación de peligros, evaluación de dosis-respuesta, evaluación de riesgos y gestión de riesgos. Una extensa cantidad de datos para la Zona Metropolitana de Monterrey se combinaron con Sistemas de Información Geoespacial para estimar el riesgo social por edad. Las investigaciones deben incluir los impactos de

$PM_{2.5}$ sobre morbilidad y mortalidad, el costo/beneficio de impactos sobre la salud y las estrategias posibles para reducir las concentraciones de $PM_{2.5}$. Estos incluyen:

1. Reducciones en azufre y en emisiones de NO_x mediante la regulación de refinación de petróleo y la industria, el contenido de azufre de los combustibles y las fuentes de energía.
2. Movilidad sustentable: el uso de sistemas integrados de transporte, la promoción del transporte público y desarrollos en curso de inspección de vehículos y programas de mantenimiento.
3. Planificación y desarrollo urbano integrado: cambios de horizontal (expansión) a vertical (densificación), revitalización del centro de la ciudad y aumento en áreas verdes.
4. Análisis costo/beneficio de las diferentes estrategias.

El Dr. Ruiz Suarez se enfocó en crear mapas de niveles críticos de contaminación atmosférica, mostrando el estado de Puebla como ejemplo. Se construyeron mapas de excedencia para mostrar la diferencia entre los niveles críticos junto con las mediciones reales y las concentraciones simuladas. Se utiliza un sistema GIS para superponer información de muchas fuentes diferentes que incluye datos de contaminación del aire, tipos de receptores por ubicación y cargas críticas que son específicos a contaminante y receptor. De esta manera, es posible calcular áreas bajo amenaza por diferentes niveles de contaminación y de allí a estimar el valor de las estrategias de control de la contaminación del aire.

La Mtra. Mar Morales presentó los resultados sobre los efectos del ozono sobre los rendimientos de cultivos en la región de la Corona utilizando el estándar AOT40 (concentración de ozono por encima de 40 ppb). Muestreo pasivo fue utilizado en sitios rurales para obtener perfiles de concentración estacional. Éstos fueron utilizados para obtener los factores de corrección en simulaciones con WRF-Chem para poder producir mapas de concentración de AOT40 en la zona. GIS entonces fue utilizado para superponer los mapas de AOT40 en los mapas de distribución de cultivos para estimar las pérdidas de cultivos. La pérdida de rendimiento relativo para maíz varió de 1 a 10% de maíz y para frijoles de 8 a 30%. Para el 2011, esto equivale a una pérdida de 6.7 millones de pesos por pérdida de maíz y 2.4 millones de pesos por pérdida de frijol.

La presentación final de la sesión por el Mtro. Castillo-Miranda se centró en los mapas de riesgos de monumentos culturales en la ZMVM. Ha habido una considerable degradación de monumentos debido a la contaminación atmosférica. Esto depende del tipo de roca; piedra caliza o rocas volcánicas son comunes en la ZMVM mismas que son sensibles a diferentes contaminantes. El modelo de riesgo combina simulaciones por computadora junto con la medición de contaminantes criterio de la RAMA, mediciones meteorológicas y mediciones de cuánto material se deposita. Aunque las concentraciones máximas tienden a estar en las zonas urbanas, la precipitación puede ser mayor fuera de la ciudad conduciendo a diferentes impactos en diferentes áreas. En la ZMVM,

tanto el SO_2 como el HNO_3 contribuyen a la pérdida de material superficial. Para concluir, se hizo hincapié en que aunque el modelo puede estimar tasas de pérdida de tesoros culturales, no se puede estimar los costos asociados.

5.3.9 CONCLUSIONES

Las siguientes observaciones finales fueron presentadas por los moderadores durante la sesión de recapitulación.

5.3.9.1 EXPANSIÓN URBANA

El Dr. Delgado destacó la necesidad de considerar la existencia de una región periurbana diferente a la distinción urbana / suburbana. Recomendó que como resultado los tomadores de decisiones consideren los factores implicados en la integración de áreas urbanas y rurales, así como la interacción entre geografía, economía y ciencia.

5.3.9.2 INVENTARIO DE EMISIONES

El Dr. M. Zavala destacó que los resultados de los estudios presentados durante la reunión muestran que todavía existen grandes retos en la creación de inventarios de emisiones precisos para la región de la Corona. Esto pone de manifiesto la necesidad de actualizar y mejorar los inventarios de emisiones en la zona de la Corona que puedan ser utilizados como:

1. Herramientas para la gestión de la calidad del aire, y
2. para la creación de datos de entrada a modelos de calidad del aire que sirvan para evaluar políticas de control de emisiones.

Un aspecto clave para mejorar los inventarios de emisiones en la zona es el modificar substancialmente los métodos de generación y recopilación de datos de actividad entre diferentes dependencias gubernamentales. Esto debería incluir el seguimiento de protocolos de control y aseguramiento de calidad de los datos de entrada para la determinación de rangos de incertidumbres en las emisiones estimadas. En este sentido, la nueva propuesta del INECC para la generación de un inventario unificado del INECC podría servir como plataforma para implementar las mejoras institucionales requeridas en los futuros inventarios de emisiones.

El Dr. Zavala describió que es necesario considerar un programa de evaluación de inventarios de emisiones. Esto es particularmente necesario dadas las rápidas modificaciones de uso de suelo y crecimiento poblacional en la Corona y, por tanto, los cambios en las emisiones en la cuenca. La evaluación continua de los inventarios puede incluir la utilización individual o conjunta de diversas técnicas de arriba–hacia-abajo y de abajo-hacia-arriba, tales como: análisis de datos satelitales, mediciones de campo de fuentes de emisión seleccionadas (e.g. móviles, quema de biomasa), análisis de balance de combustibles, técnicas de modelación (e.g. distribución de las fuentes, modelación inversa), y técnicas basadas en mediciones ambientales (e.g. covarianza turbulenta, tasas de concentraciones). Algunas de estas técnicas ya están siendo empleadas por varios grupos de investigación en México y es necesario fortalecer, integrar y coordinar estos esfuerzos.

5.3.9.3 METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

El Dr. De Foy informó que deben considerarse los siguientes puntos: la isla de calor urbana, impactos del uso de suelo, mezclado vertical, estudios con trazadores (por ejemplo usando agua precipitable medida por GPS o CO, NO_2, SO_2 medidos por satélites) y los impactos de la radiación. Se observó que aunque el desempeño del modelo puede parecer bajo usando ciertos indicadores estadísticos, estudios anteriores han encontrado que WRF hace un buen trabajo simulando el transporte de contaminantes en la cuenca. Una cuestión clave es tener en cuenta la temporada de lluvias y cómo eso requerirá un enfoque diferente de las mediciones y simulaciones para mirar la interacción entre la contaminación atmosférica y la meteorología. Una segunda cuestión clave es la ubicación de sitios de monitoreo para un proyecto centrado en la región de la Corona. Al localizar un sitio de medición, hay diferentes objetivos que deben tenerse en cuenta: los impactos locales en salud; emisiones locales; emisiones urbanas; impactos regionales; y los procesos atmosféricos. Éstos a veces estarán compitiendo entre sí y deben ser equilibrados según los objetivos de investigación. Una recomendación es considerar más mediciones en el sitio de Pico de Tres Padres, que sirve como ejemplo de un valioso sitio regional: está alejado de fuentes locales, mide diferentes masas de aire, experimenta la exportación de aire contaminado de la zona urbana. Otra recomendación sería utilizar los laboratorios móviles para implementaciones específicas con duración de 1 mes o más para estudiar diferentes sitios y analizar el tipo de masas de aire y la contaminación que está siendo medida.

5.3.9.4 MATERIAL PARTICULADO

El Dr. Arnott reiteró el objetivo de mejorar la calidad del aire con los siguientes resultados: mejora en la salud humana y el ecosistema; conservación de recursos; impactos económicos positivos a largo plazo; huella climática reducida; beneficios diplomáticos internacionales.

MILAGRO 2006 ha proporcionado una estrategia para que las observaciones de satélite y en superficie sean útiles en la determinación de MP, junto con las estaciones de monitoreo a largo plazo, que serán benéficas para la investigación de la calidad del aire en la región de la Corona. Entre los temas a considerar se incluyeron los siguientes:

1. El valor y la importancia de sitios de monitoreo a largo plazo. Los datos de alta calidad del Simat han sido inmensamente valiosos en la comprensión de la calidad del aire en la ZMVM.
2. Unidades de medición móvil podrían desplegarse en diferentes sitios y diferentes horarios para trazar la contaminación en la región de la Corona, así como puntos conflictivos. Además de los contaminantes criterio, la unidades pueden equiparse con mediciones de MP total así como mediciones especiadas de MP (por ejemplo carbono negro).

3. Investigación continua en la evaluación del modelo incluyendo comparación con perfiles verticales.
4. Investigación continua en mediciones urbanas y la combinación con modelación inversa para refinar nuestra comprensión de las fuentes de emisión de una manera rentable.
5. Desarrollo continuo de productos satelitales de aerosoles, sujeto a las limitaciones debido al alto albedo superficial del centro de México.
6. Revisión de trazadores que sean útiles en la identificación de diferentes sectores de emisión, por ejemplo la quema de basura.
7. Identificar el 10% de los vehículos que emiten el 90% del material particulado.
8. Considerar más medidas en el sitio de Pico de Tres Padres o un sitio similar que no se vea afectado por las fuentes en las inmediaciones, pero que resulte un sitio de muestreo muy útil a mediana escala temporal y espacial. Además del valor de los datos, también es muy valioso para las comparaciones con el modelo.
9. Necesidad de trabajar en el cierre de diferentes mediciones para cuantificar de mejor manera el impacto radiativo y la huella climática.

5.3.9.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

El Dr. Brian Lamb destacó que las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO proporcionaron una base de datos de clase mundial. Esto resaltó la gran contribución en masa de alcanos ligeros en la ZMVM. Se encontró que la reactividad del OH fue dominada por los hidrocarburos no metánicos en la ZMVM, sino por COV oxigenados viento abajo de la ciudad. El formaldehído resultó ser muy importante en términos de emisiones primarias y formación secundaria. En general, las campañas establecieron patrones diurnos y permitieron mejorar los inventarios de emisiones. Actualmente hay una necesidad de estudiar la evolución de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles desde MILAGRO y de ampliar los sitios de medición a la región de la Corona. En particular, la toma de muestras debe utilizarse para identificar diferencias en concentraciones y perfiles de emisiones entre la ZMVM y regiones circundantes, y de buscar la huella de masas de aire envejecidas y procesión secundaria en la región. Esta información es necesaria para mejorar los inventarios de emisiones actuales.

Como una observación general, el Dr. Lamb propuso la necesidad de un modelo conceptual de la calidad del aire en la región de la Corona. Esto sería útil tanto en la planificación científica como para la comunicación con los tomadores de decisiones. El modelo conceptual incluiría un entendimiento de los patrones locales diurnos en cada parte de la región, una evaluación de los patrones de transporte entre diferentes cuencas y los impactos debido a la mezcla de masas de aire locales con plumas de regiones vecinas viento abajo.

Dos puntos relacionados deberían considerarse. En primer lugar, la mitigación del cambio climático debe incluirse en el plan para la región de la

Corona. Esto incluye mediciones de CO_2, CH_4, CN, etc., para probar los inventarios. A partir de marzo de 2015, también habrá datos de resolución de 1 km del Observatorio de Carbono en Órbita (OCO-2). En segundo lugar, el Estudio de Oxidantes y Aerosoles del Sur (SOAS-2013) ofrece una gran cantidad de información sobre cuestiones similares y representa el estado del arte actual en cuanto a instrumentación y técnica. Esto debe revisarse para ver lo que es aplicable a la región de la Corona.

A manera de resumen de la sesión COV, las preguntas científicas clave que un estudio futuro debiera de abordar son:

1. ¿Hay retroalimentación por las interacciones de plumas envejecidas y emisiones locales?
2. ¿Cuál es la huella química de cada área de emisión dentro de la región de la Corona?

5.3.9.6 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

El Dr. Sosa enfatizó la importancia de validar el modelo de calidad del aire que se está utilizando, debido a que componentes como el uso de suelo, especiación de emisiones, cambios tecnológicos, emisiones biogénicas y fuentes puntuales de alcance regional pueden influir en los resultados que se obtienen. Contar con mediciones de COV especiados ayudaría para acotar el modelo e inventarios. En este punto, los datos de productos de satélites son útiles para comparar columnas de contaminantes obtenidas con el modelo. Mencionó que la implementación de una red regional de monitoreo, sobre todo en zonas rurales, puede ser de gran ayuda para el Proyecto. Además, la incorporación de otros gobiernos en el aspecto de modelación, de personal capacitado en el uso de herramientas de modelación (hardware/software) puede ser un factor a considerar. El Dr. Mediavilla resaltó el carácter de megalópolis, por lo que la integración de otros estados en el monitoreo y metodologías sería importante para abordar el problema como región. Asimismo, sugirió incluir estudios de cañón urbano, de salud en microambientes y estudios de evaluación de costo-beneficio.

5.3.9.7 MONITOREO DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DEL AIRE

La Dra. Calderón mencionó la necesidad de fortalecer y ampliar la Red Mexicana de Aerobiología para incluir más regiones en la cobertura temporal de medición de polen. Los objetivos de este esfuerzo incluyen el establecer calendarios polínicos, identificar las fuentes principales en las regiones centrales del país, y servir como fuente de información para realizar estudios de impactos en salud por la emisión y transporte de los diferentes tipos de polen prevalentes en cada región del país. Es además importante mantener los esfuerzos de monitoreo de polen para contar con mediciones de largo plazo que permitan establecer tendencias de la calidad biológica del aire. Los resultados de los estudios sobre la sensibilización de aereoalérgenos y sus impactos en enfermedades respiratorias en México muestran que las tasas de prevalencia de rinitis estacional, perene o perene con exacerbación

estacional, son más altas en las zonas tropicales que en zonas áridas. Los estudios sugieren también que es importante abordar los impactos de los ácaros de los polvos domésticos en la salud infantil. Existe la necesidad de estudiar la progresión de las enfermedades alérgicas en un contexto urbano donde factores como la contaminación del aire y el estrés pueden potenciar los impactos en la salud humana.

5.3.9.8 IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El Dr. Osornio mencionó la necesidad de actualizar los estudios de efectos de salud en México por la contaminación atmosférica y especialmente por el material particulado. Los estudios deben incluir los epidemiológicos, de toxicidad y clínicos. Indicó que la investigación sobre los efectos de salud debe incluir la evaluación de riesgos e impactos, la creación de un índice de salud de calidad del aire, la inclusión de un parámetro de salud en la evaluación de los impactos en políticas de control de la contaminación, cadenas causales y los impactos por la mezcla de contaminantes. Existe además la necesidad de mejorar la generación y los mecanismos de recopilación de datos clínicos para la elaboración de estudios de salud. Se destacó la posibilidad de utilizar técnicas de amplia cobertura espacial tales como mediciones satelitales de profundidad óptica de aerosoles para estimar las concentraciones de partículas finas y con ello realizar estudios de impactos en salud. Más aun, es posible combinar técnicas de medición en superficie para acotar las evaluaciones por satélite y mejorar la estimación de las concentraciones. Esto podría en principio realizarse en forma sistemática para genera información útil para la evaluación de impactos en salud a largo plazo. En la sesión se subrayó la importancia de contar con información geo-referenciada espacialmente para determinar los impactos en salud, ecosistemas y patrimonios culturales arquitectónicos.

5.4 Segunda reunión de expertos[14]

INTRODUCCIÓN

Parte de los principales hallazgos en este punto se basan en la revisión de 304 publicaciones relevantes para la región Centro de México, que fundamentalmente se enfocaron en contaminación regional incluyendo artículos publicados posterior al artículo de revisión de MILAGRO (Molina *et al.,* 2010). Para una descripción más detallada del análisis, ver la sección 5.2.

Se retomaron y discutieron los puntos principales del análisis: publicaciones arbitradas, y varias de ellas son parte de las ediciones especiales de las campañas MCMA 2003 y MILAGRO de la revista *Atmospheric Chemistry and Physics*; número de publicaciones que utilizaron los datos obtenidos en las campañas de monitoreo como parte de la investigación, así como también aquellas que pueden proporcionar mayor información para la calidad del aire regional; se obtuvieron palabras clave de mediciones experimentales, ubicación, uso de datos satelitales como parte del análisis y modelos numéricos utilizados; la descripción temática del estado actual de la investigación se basó en las categorías empleadas en el artículo de revisión de la campaña MILAGRO.

Uno de los principales mensajes derivado del análisis es el papel tan importante que tuvieron los gases criterio y la meteorología en la interpretación de las mediciones de material particulado y COV (**Tabla A05-5**, sección 5.2). Además, también se resalta el papel de las mediciones en los supersitios y sobre todo de la RAMA, ya que del total de los 304 artículos que se revisaron, al menos un cuarto de ellas usaron datos de la RAMA. Se resaltó el papel de contar con un registro temporal de largo plazo ya que es un recurso invaluable para quien desee estudiar la calidad del aire en la ZMVM, ya sea que se considere un estudio de exposición durante una década, o bien episodios diarios. Estas mediciones proveen de la información en el largo plazo y la cobertura espacial necesarios para profundizar en el análisis de los datos obtenidos en campañas de monitoreo que puedan ser relevantes para la calidad del aire regional.

5.4.1 MEDICIONES DE CAMPO DE LAS CAMPAÑAS MCMA-2002/2003 Y MILAGRO-2006

La campaña de mediciones MCMA-2002/2003 fue una misión exploratoria efectuada durante febrero de 2002 que utilizó un laboratorio móvil. De manera subsecuente, se diseñó la campaña de medición intensiva durante 5 semanas en la primavera del 2003 para abordar los siguientes puntos:

1. Mediciones en superficie de gases y aerosoles en supersitios y el uso de laboratorios móviles;
2. procesos de formación de ozono;

[14] Segunda reunión de expertos del proyecto ECAIM: Lecciones aprendidas de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006.

3. fuentes y composición de partículas finas;
4. pronóstico meteorológico, y
5. modelación de la calidad del aire.

La campaña MILAGRO fue un proyecto científico de colaboración internacional para examinar el comportamiento y la exportación de contaminantes atmosféricos generados en una megaciudad. La fase de mediciones tuvo lugar en marzo de 2006. Contó con más de 450 participantes en representación de más de 120 instituciones de Estados Unidos, México y Europa. Fue patrocinada por México (Semarnat, CAM, Conacyt, Pemex), Estados Unidos (NSF, DOE, NASA, MCE2) y agencias e instituciones europeas.

Entre las preguntas científicas de las campañas se incluyeron cuestiones sobre:

1. el alcance temporal y espacial de las plumas de contaminación de las megaciudades;
2. de qué manera y en dónde se encuentran los contaminantes urbanos removidos de la atmósfera, y
3. los impactos regionales y globales de plumas urbanos

Las dos campañas de campo generaron un conjunto de datos extremadamente rico. El uso completo de los datos tomó varios años de trabajo colaborativo. Los datos están disponibles para la comunidad científica internacional desde marzo de 2008 y en conjunto cuentan con tres ediciones especiales en la revista *Atmospheric Chemistry and Physics* (ACP):

1. MCMA-2003 Field Measurement Campaign
2. MILAGRO/INTEX-B Campaign
3. Megacities: Air quality and climate impacts from local to global scales

El total de publicaciones fue de 55 artículos arbitrados para MCMA-2003 y de 150 artículos arbitrados para MILAGRO, incluyendo dos artículos de revisión para cada campaña (Molina *et al.,* 2007; Molina *et al.,* 2010). Todas las publicaciones incluyendo las que se publicaron en otras revistas, se encuentran en el sitio web del MCE2: http://mce2.org

Con base en la sinergia de la utilización de múltiples plataformas de medición, instrumentación y técnicas de análisis de datos, los resultados de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 pueden agruparse en cuatro categorías:

1. Caracterización de la meteorología urbana y regional, emisiones, química y radiación. En este punto, el énfasis es en la ciudad de México y sus alrededores.
2. Identificación y cuantificación de procesos químicos y físicos fundamentales. La importancia de estos resultados radica en que se pueden aplicar para tener una mejor comprensión de la química atmosférica en la cuenca y la posibilidad de incluir la información en modelos numéricos. Asimismo, puede evaluarse su aplicación en otras megaciudades y complejos urbanos extensos alrededor del mundo.

3. Desarrollo y mejora de técnicas de medición. Los datos satelitales y observaciones globales a largo plazo resultaron ser importantes para algunos estudios. Asimismo, se utilizaron equipos novedosos para monitorear la calidad del aire, la medición de algunas especies importantes en la química atmosférica, se efectuaron por vez primera, reflejando la calidad de los datos colectados. Además, algunas técnicas se usaron por vez primera no solo en la ZMVM, sino en todo el mundo. Tal es el caso de las torres de flujo usando la técnica de covarianza turbulenta (**Figura A05-2**)
4. Impactos de la contaminación atmosférica en salud pública. Se demostraron técnicas para medir la exposición personal a la contaminación y se correlacionaron con mediciones atmosféricas.

Los siguientes puntos resumen algunos de los principales hallazgos de las campañas de campo en la ZMVM así como las lecciones aprendidas.

5.4.2 METEOROLOGÍA Y DINÁMICA

Al comienzo de la campaña MCMA-2003, una de las cuestiones meteorológicas era si la ciudad de México es como Los Ángeles, donde eventos de subsidencia llevan al estancamiento y acumulación por varios días; o si es como Houston, donde emisiones intensas de COV por episodios de un solo día conducen a concentraciones atmosféricas elevadas, y la contaminación del aire es efectivamente arrastrada por la brisa del mar todos los días. Debido al terreno, se pensaba que Los Ángeles serviría como un mejor paradigma que Houston. Sin embargo, se descubrió que la ciudad de México tenía alturas de mezclado muy elevadas: hasta aproximadamente 4 km sobre el nivel del suelo de la cuenca, lo que significa hasta 6 kilómetros sobre el nivel del mar. Combinado con lo anterior, existen fuertes flujos de montaña y Cuenca que ventean la cuenca muy efectivamente casi todos los días. También se constató que eventos de picos de ozono pueden ocurrir por episodios de un solo día, por ejemplo después de un día muy limpio. Se utilizaron simulaciones de trayectorias con WRF y WRF-Flexpart para mirar el tiempo de residencia de las parcelas de aire en la cuenca así como la cantidad de recirculación del aire que sale y regresa de y hacia la cuenca respectivamente. Gran parte del aire permanece menos de 12 horas en la cuenca, y la tasa de recirculación es generalmente inferior al 25%. Esto demuestra que efectivamente la ciudad de México se comporta más como Houston. La alta elevación y la circulación cuenca-montaña ocupan el lugar de la brisa marina para ventilar efectivamente la cuenca.

Se desarrolló un modelo conceptual de patrones de flujo meteorológicos para la campaña MCMA-2003 con tres grupos: O3-Sur (O3-South), O3-norte (O3-north) y Frente Frío (cold surge) (de Foy *et al.,* 2008). Esto se amplió durante la campaña MILAGRO con eventos tipo Venteo-Sur (South-venting), Convección-Sur (Convection-South) y Convección-Norte (Convection-North) (de Foy *et al.,* 2008). Estos se muestran en la **Figura A05-1.** Los eventos de frente frío se asociaron con lluvia y aire muy limpio. Eventos tipo venteo-sur

también tuvieron fuertes vientos y condiciones limpias pero estos se asociaron con cielos despejados. Eventos tipo O_3-sur presentaron tiempos de residencia más prolongados y tasas de recirculación más altas promoviendo concentraciones elevadas de ozono en el sur de la ciudad. Estos fueron los episodios clásicos de alta contaminación estudiados antes de la campaña MCMA-2003. En contraste, días con episodios tipo O_3-norte días presentan una mejor ventilación y el pico de ozono ocurre en el norte de la ciudad.

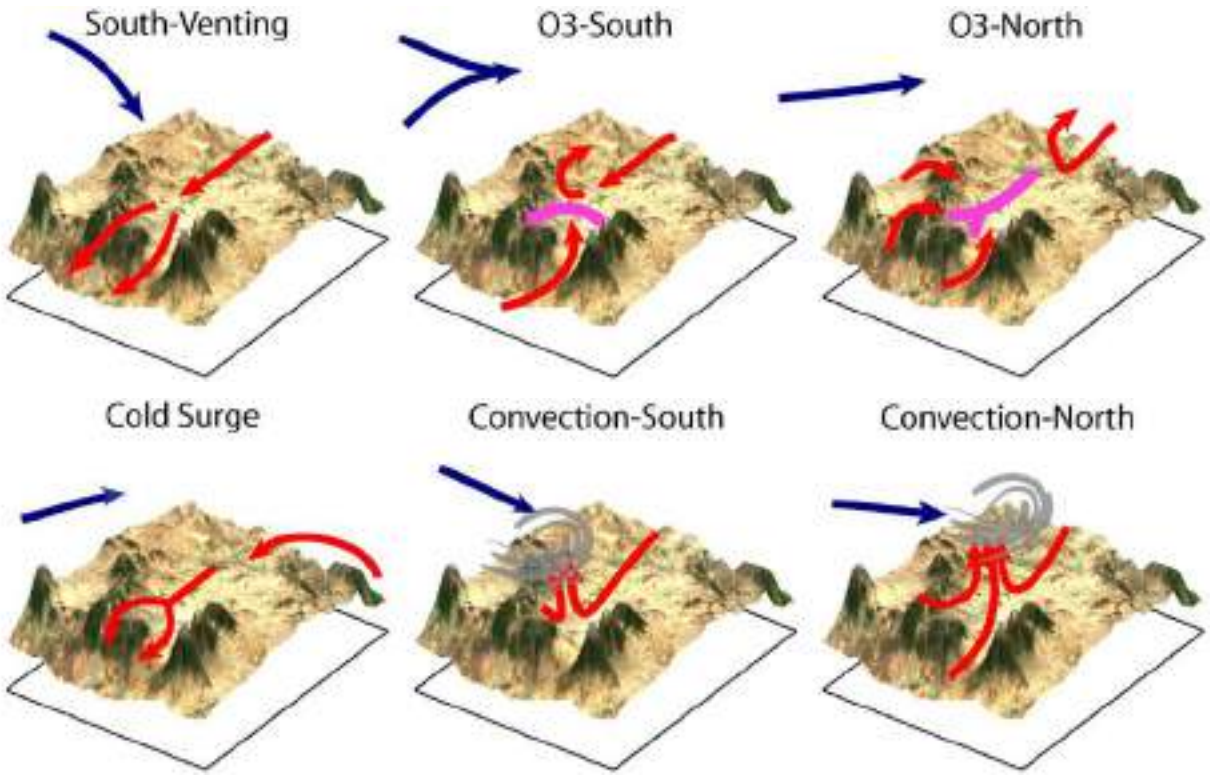


Figura A05-1 *Modelo conceptual de la circulación del viento en la cuenca de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) durante las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO (fuente: de Foy et al., 2008)*

Combinados con un crecimiento urbano hacia el norte de la ciudad, estos eventos tuvieron las mayores concentraciones de ozono durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO. De interés para los estudios de contaminación del aire durante todo el año, hubo eventos con precipitación y convección durante MILAGRO que sin embargo fueron asociados con una mala calidad del aire. Como la ubicación de los máximos de ozono dependía de la ubicación de la zona de convergencia, por lo tanto, estos eventos se dividieron en tipo convección-sur y convección-norte.

En términos de simular numéricamente el transporte del viento en la Cuenca, uno de los puntos clave a destacar es que la evaluación del modelo debe considerar el transporte de contaminantes aparte del desempeño estadístico con mediciones puntuales. Durante MCMA-2003 (Molina *et al.,* 2007)

y MILAGRO (Molina *et al.,* 2010), se encontró que las métricas estadísticas resultaron ser relativamente bajas entre los resultados del modelo WRF y las observaciones en superficie. Sin embargo, el transporte simulado fue caracterizado adecuadamente para el propósito de estudiar el transporte de los contaminantes del aire y las fuentes de emisión. Esto incluyó el alcance de la altura de mezcla y la recirculación de los contaminantes en la cuenca. Por tanto, de manera general se recomienda que simulaciones con WRF y WRF-Flexpart utilizando una resolución espacial de 3 km y una temporal de 1 hora son suficientes para el estudio de la calidad del aire en la cuenca. Para trayectorias, un modelo como WRF-Flexpart puede usarse para incluir las trayectorias tridimensionales y el mezclado vertical. En este punto, también se encontró que una liberación de 100 o incluso 1000 partículas lagrangianas por hora da un sentido de la propagación en el transporte, lo cual es esencial y que falta en estudios que consideran sólo unas pocas trayectorias en un momento determinado.

Como se ha comentado anteriormente, durante MILAGRO hubo algunos eventos de convección con precipitaciones. Sin embargo, la mayoría de las campañas de campo se ha enfocado en la estación seca, especialmente la estación cálida y seca. Se recomienda que a futuro se realicen estudios en la temporada húmeda, ya que también se experimentan problemas de calidad del aire durante la misma.

Para la evaluación de los inventarios de emisiones, durante MCMA-2003 y MILAGRO se encontró que las mediciones de columna vertical fueron un complemento muy útil a las mediciones en superficie. Al comparar los modelos solamente con las mediciones en superficie, es posible llegar a conclusiones incorrectas dependiendo de la parametrización de mezclado vertical que se haya utilizado. Sin embargo, cuando se tiene una restricción en la cantidad total de la columna de contaminante, tanto las emisiones y el esquema de mezclado vertical puede ser mejor evaluado. Esto fue encontrado para las emisiones del complejo industrial de Tula, emisiones urbanas dentro de la ZMVM y flujo de salida urbano. Por lo tanto, se recomienda el uso continuado de mediciones de columna de contaminantes. Estas también pueden combinarse con mediciones satelitales. Cuando las estimaciones por satélite pueden calibrarse de manera precisa con mediciones de la columna *"in situ",* las estimaciones en periodos prolongados pueden utilizarse con mayor confianza.

Por último, hay una necesidad de desarrollar un modelo conceptual de transporte de contaminantes en toda la región de la Corona. Basándonos en nuestra experiencia durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO, esto expandiría el modelo conceptual de la MCMA y requeriría una combinación de análisis de datos y simulación numérica para identificar las condiciones meteorológicas dominantes y eventos asociados de transporte.

5.4.3 EMISIONES

Uno de los principales objetivos de la mayoría de campañas de campo fue asistir en la elaboración de inventarios de emisiones, tanto en la evaluación de su exactitud como en la exploración de nuevas mejoras. Por ejemplo, factores de emisión de COV para vehículos de gasolina medidos en MILAGRO fueron ligeramente menores que los medidos en MCMA-2003. Éstos han sido ampliamente documentados en las revisiones de MCMA-2003 [Molina *et al.,* 2007] y MILAGRO [Molina *et al.,* 2010]. Algunos aspectos importantes para una caracterización precisa de las emisiones en fase gas y fase partícula para la región incluyen:

1. Técnico: la determinación de los perfiles químicos de las emisiones y la identificación de diferentes tipos de fuentes emisoras utilizando mediciones especiadas y de trazadores y considerando las variaciones por región, pueden contribuir en refinar el aspecto técnico de la elaboración de los inventarios
2. Investigación: promover una evaluación continua utilizando técnicas de arriba–hacia-abajo y de abajo-hacia-arriba, incluyendo la estimación directa con torres de flujo (Figura 2), mediciones en superficie, datos satelitales y el uso de modelos numéricos y técnicas de modelación inversa contribuiría para considerar un programa de evaluación de inventarios de emisiones tal como se mencionó en la Sección 3. Esto es particularmente necesario dadas las rápidas modificaciones de uso de suelo y crecimiento poblacional en la Corona y, por tanto, los cambios en las emisiones en la cuenca
3. Institucional: considerar cuál es el nivel más apropiado para el desarrollo de inventarios de emisiones, ya sea de manera local, estatal o federal; así como colaborar entre diferentes sectores, incluyendo a nivel gubernamental, académico y con el sector privado. Esto puede ser de ayuda al momento de discutir posibles implicaciones de política pública, incluyendo la identificación de emisores importantes, el diseño de escenarios ganar-ganar, la evaluación de impactos económicos y de eficiencia energética. Respecto a identificación de emisores importantes, datos de satélite indican que la quema de biomasa es una fuente importante en la región de la Corona y que a la fecha, eventos de este tipo siguen ocurriendo, a menudo cerca de áreas urbanas. De interés particular es el papel de las quemas urbanas y semi-urbanas (e.g. quema de basura) respecto a incendios forestales y quemas agrícolas, ya que implicaría estrategias de regulación muy diferentes
4. Cambio climático. Buscar una sinergia con la parte de cambio climático sería recomendable para identificar necesidades comunes. Por ejemplo, una evaluación podría utilizar los datos del Orbiting Carbon Observatory (oco-2), lanzado en julio del 2014 y con resolución de 1 km, ya que proporcionaría datos de columna de CO2 así como información de aerosoles. Además, la inclusión de forzantes climáticos de vida corta (SLCPs) podría complementar el proceso de desarrollo de inventarios de emisiones para la región.

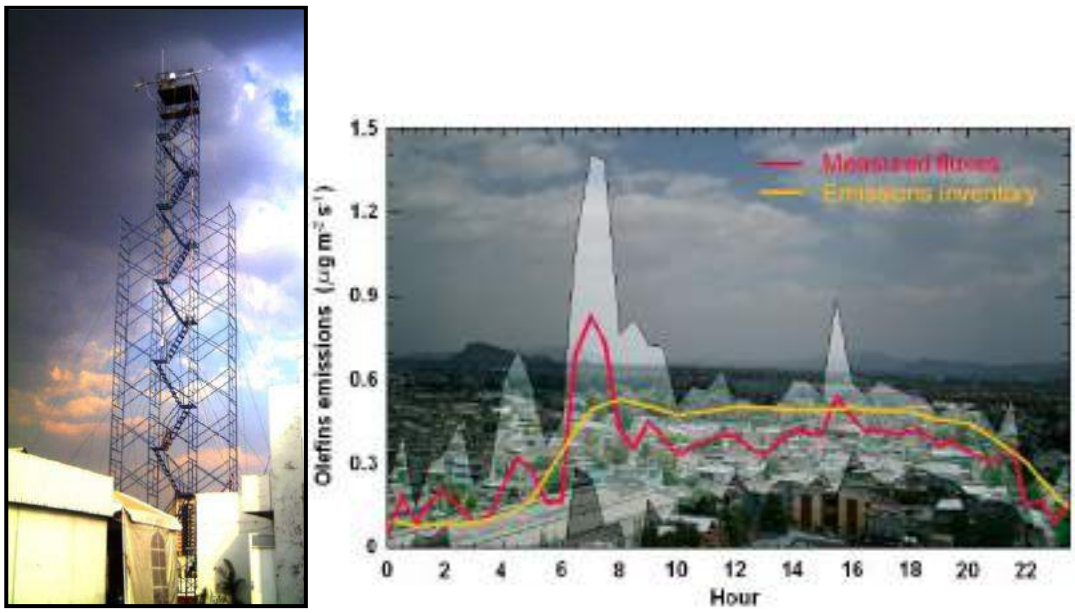


Figura A05-2 *Torre de flujo usando la técnica de covarianza turbulenta instalada en el Simat durante la campaña* MILAGRO. *Perfil diurno de olefinas estimado con mediciones de flujo y comparado con el inventario de emisiones 2006 usado en modelación.*

5.4.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Las megaciudades, como la ciudad de México, producen una variedad compleja de emisiones, incluyendo cientos de COV diferentes. Los hidrocarburos no metánicos y los COV oxigenados son de los principales compuestos que se midieron durante MILAGRO (Molina *et al.,* 2010). En este sentido, las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO proporcionaron una base de datos de clase mundial. Se midieron múltiples especies, en diferentes escalas espaciales y temporales con equipos instalados en sitios de fondo, en fuente y viento abajo, así como en sitios rurales, suburbanos e industriales. En este punto es de resaltar que los métodos independientes complementarios que se utilizaron brindaron una mayor certeza y ayudaron a identificar áreas de incertidumbre.

Uno de los principales hallazgos de la campaña MCMA-2003 fue la medición de niveles elevados de formaldehído en la atmósfera debido a emisiones directas. Otro de los descubrimientos más relevantes de la campaña MCMA-2003 fue la medición espectroscópica del glioxal (CHOCHO) usando el DOAS.

Durante MILAGRO, los resultados permitieron resaltar la gran contribución en masa de alcanos ligeros en la ZMVM. Se encontró que la reactividad del OH fue dominada por los hidrocarburos no metánicos en la ZMVM. El formaldehído resultó ser muy importante en términos de emisiones primarias y formación secundaria. En general, las campañas establecieron patrones diurnos y permitieron mejorar los inventarios de emisiones. Esta es una información muy importante para definir estrategias de monitoreo y muestreo incluyendo una posible ampliación de los sitios de medición a la región de la Corona, estudiar la evolución de la pluma urbana viento abajo, así como la formación de contaminantes secundarios, incluyendo ozono y aerosoles orgánicos secundarios (SOA).

Lo anterior puede ayudar para abordar algunas de las preguntas científicas clave formuladas en las reuniones del proyecto ECAIM (sección 5.3), en específico establecer: qué ha cambiado desde 2006, en términos de la evolución de las concentraciones de COV en la región; y qué es diferente en la región de la Corona. Lo anterior incluiría estudiar cómo las plumas primarias y secundarias interactúan en la región, cómo envejecen las masas de aire y cómo se procesan los contaminantes en la atmósfera.

5.4.5 MATERIAL PARTICULADO

Los resultados de MILAGRO ayudaron en la identificación de la rápida formación de aerosoles orgánicos secundarios. Esto motivó a que los grupos de investigación actualizaran los modelos de SOA o incluso propusieran nuevos modelos. Esto permitió disminuir la brecha con respecto a las observaciones. Asimismo, se observó una mezcla extensiva de diferentes tipos de aerosoles, incluyendo polvo, quema de biomasa y por emisiones antropogénicas, debido en gran parte a que los múltiples sitios de monitoreo y diferentes tipos de medición proporcionaron información clave en la emisión y transformación de aerosoles (**Figura A05-3**). Se encontró que, en la ciudad, la fracción fina se compuso principalmente de orgánicos (50 %), inorgánicos secundarios (25 %) y de carbono negro y material mineral. En cambio, en el supersitio periurbano T1, la fracción mineral fue muy importante (36 %) en la fracción fina y con una fracción de carbono negro ligeramente mayor que la encontrada en la ciudad.

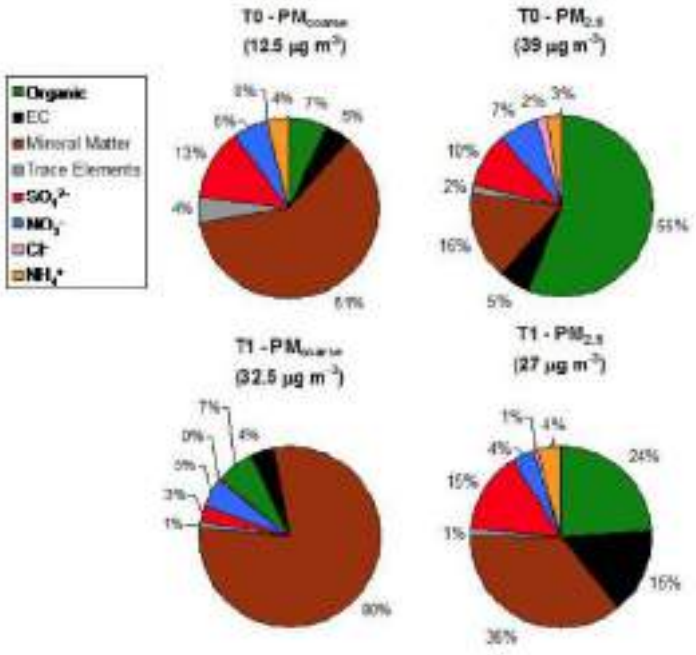


Figura A05-3 *Composición promedio de partículas gruesas y finas en los supersitios T0 y T1. La gráfica incluye compuestos orgánicos (verde), carbono negro (negro), material mineral (café), elementos traza (gris), iones sulfato (rojo), iones nitrato (azul), iones de cloro (rosa) e iones amonio (amarillo). El supersitio T1 se afectó por resuspensión local de polvo, lo que explica la contribución inusual de material mineral en el lugar de la fracción gruesa (80%). (Fuente: Molina et al., 2010.)*

La campaña MILAGRO ha proporcionado una estrategia para que las observaciones de satélite y en superficie sean útiles en la determinación de MP, junto con las estaciones de monitoreo a largo plazo, que pueden ser benéficas para la investigación de la calidad del aire en la región de la Corona. En este sentido, existe la necesidad de conjuntar las mediciones en superficie con las estimaciones de datos por satélite. En este punto, la utilización de fotómetros solares fue muy valiosa para evaluar datos derivados de satélite, el espesor óptico de aerosoles (AOD) en específico.

Además, considerar la medición de diferentes tipos de MP, por ejemplo de carbono negro y una revisión de trazadores que sean útiles en la identificación de diferentes sectores de emisión, por ejemplo la quema de basura.

5.4.6 FOTOQUÍMICA REGIONAL Y URBANA

La producción fotoquímica de ozono en la ciudad de México es alta debido en gran parte a la co emisión de NO_x y COV, lo que provee de una elevada fuente de radicales, motor principal de la fotoquímica urbana. Principalmente se observó que la producción de ozono dentro de la ZMVM es sensible a los COV más que a los NO_x, por lo que reducciones de COV podrían reducir efectivamente el ozono en la ZMVM. No obstante, las reducciones de NO_x no serían tan efectivas localmente pero podrían reducir la producción regional de ozono. Es importante resaltar que la sensibilidad a los COV en el área urbana no depende de las condiciones meteorológicas. En cambio, áreas rurales y regiones montañosas aledañas pueden ser sensibles a los COV o a los NO_x dependiendo de las condiciones meteorológicas (**Figura A05-4**).

También se observó que la producción de ozono continúa en el flujo de salida al menos por varios días, debido a la formación de nitratos de peroxiacetilo (PAN) que efectivamente incrementa el tiempo de vida de los NO_x. Asimismo, los aldehídos resultaron ser compuestos importantes en la reactividad del flujo de salida. Los aldehídos se producen por oxidación de COV y algunos se emiten de manera directa. Sin embargo, aún cuando son importantes por su reactividad, no se miden rutinariamente.

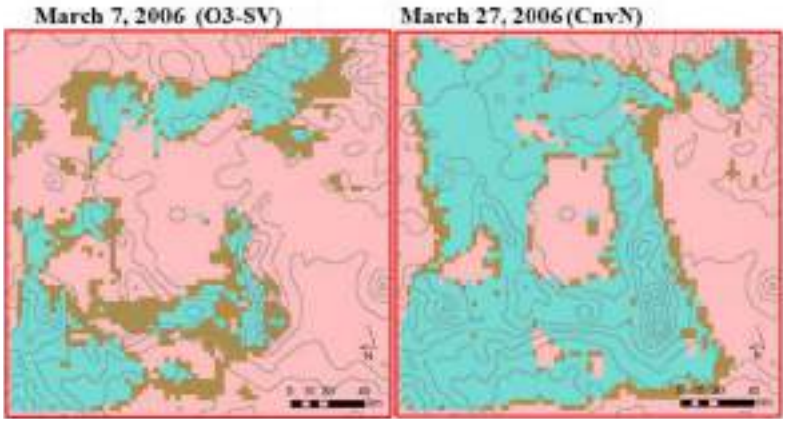


Figura A05-4 *Distribución espacial de la proporción de producción de peróxido de hidrógeno y de ácido nítrico a las 14:00 hora local del 7 (panel izquierdo) y 27 (panel derecho) de marzo de 2006 bajo diferentes condiciones meteorológicas, episodio O3-sur (izq) y Convección-Norte (der), mostrando la sensibilidad a COV (rosa); NO_x (cyan) y las zonas de transición (café). Tomado de Song* et al., *2010.*

5.4.7 SITIOS DE MONITOREO

Las redes de monitoreo usualmente se diseñan teniendo en mente impactos en salud y a menudo distribuyen los sitios conforme a fronteras políticas.

Para la región de la Corona, sería recomendable tener algunos sitios de medición en puntos de transición entre las diferentes zonas urbanas, así como fortalecer las redes de monitoreo de las ciudades circundantes. Existen objetivos muy diferentes que contribuyen a las decisiones sobre la ubicación de sitios de monitoreo:

1. Los impactos locales de salud pública;
2. las emisiones locales;
3. las emisiones urbanas;
4. los impactos regionales, y
5. los procesos atmosféricos (**Figura A05-5**).

Un análisis en curso de la red de la RAMA ha encontrado que dispersar las estaciones entre sí fue benéfico ya que muchas áreas en la ZMVM tienen una calidad del aire similar. Para la ciencia, también es útil medir en lugares que en general presentan bajos niveles de contaminación pero que al mismo tiempo pueden identificar transporte dentro o fuera de la cuenca, así como el procesamiento de la masa de aire contaminada. Por ejemplo, el laboratorio móvil Aerodyne se trasladó al Pico de Tres Padres por un par de días y que al final resultaron muy valiosos. La vista desde el sitio se muestra en la **Figura A05-5**. Se recomienda que una unidad móvil se ubique en este lugar por un periodo más prolongado para estudiar la capa residual en la noche, la masa mezclada de aire por la tarde y el transporte desde áreas vecinas. No obstante, a menudo se presentan situaciones inesperadas en la ciencia atmosférica. Por tal motivo, se recomienda identificar diferentes sitios candidato del tipo frontera, fondo y salida. Estos necesitan ser separados de fuentes locales que pudieran contaminar los resultados. Se recomienda desplegar unidades móviles existentes en estos sitios candidato por 1 o 2 meses a la vez para evaluar su utilidad y llevar a cabo estudios preliminares.

Para los propósitos de modelación inversa y de análisis de datos para el trabajo de inventario de emisiones, se recomienda el desarrollo continuo de series de tiempo de largo plazo, como las disponibles en la red de la RAMA. Múltiples mediciones co ubicadas son muy útiles para averiguar la contribución de diferentes fuentes de emisión. Idealmente los sitios seleccionados estarían expuestos a diferentes masas de aire en momentos distintos para poder identificar diferentes regiones de emisión. A la medida de lo posible, los sitios deben experimentar condiciones de viento regionales más que efectos micrometeorológicos (terreno, uso de suelo, construcciones, etc.) y los sitios deben medir las masas de aire que se mezclan en la escala espacial de una celda del modelo meteorológico, que es de unos 3 km. Las mediciones de sitios que se ven afectados por fuentes muy locales son difíciles de comparar con los resultados del modelo y difíciles de utilizar para el trabajo

regional del inventario de emisiones regionales. Mediciones simultáneas de la altura de mezclado, radiación solar y radiación ultravioleta son muy valiosas para el análisis de los procesos de transporte y de transformación de contaminantes. Se recomienda que unidades móviles se desplieguen de 1 a 2 meses para las pruebas en los sitios candidato, y que se realicen trabajos preliminares de modelación para evaluar la utilidad de las mediciones antes de comprometerse con ellos a largo plazo.

Una de las principales conclusiones del análisis bibliográfico sobre calidad del aire para la ZMVM presentado en el segundo reporte (sección 5.2), y mencionado brevemente en introducción de esta Sección, fue la importancia para la ciencia de los datos de la RAMA. Estos representaron la única categoría de mediciones contribuyeron en gran parte de los artículos con arbitraje. Por tal razón, se hace una breve nota para destacar la importancia de la RAMA para la investigación científica. Una expansión en dos direcciones diferentes sería particularmente útil:

1. La incorporación de diferentes tipos de mediciones, por ejemplo algunos COV y algunas mediciones de especiación de partículas, y
2. la expansión de la red para cubrir un área más amplia y posiblemente incluir una mayor diversidad de tipos de estaciones, incluyendo por ejemplo sitios periurbanos y sitios de frontera.

Figura A05-5 *Ubicación de sitios de monitoreo: identificar distintos objetivos de medición. El panel de la izquierda muestra una imagen de la ZMVM. El panel de la derecha ejemplifica los tipos de emisiones a nivel ultra-local (superior) de utilidad para impactos locales en salud; nivel local (intermedio) de utilidad para impactos a nivel urbano y representativos de un área en particular (inferior) de utilidad para evaluar impactos regionales y procesos atmosféricos.*

Conclusiones

La ciudad de México ha estado trabajando en la mejora de la calidad del aire por varios años. Se ha progresado considerablemente en abordar los problemas de contaminación del aire a través de programas de gestión de calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas.

El monitoreo de la calidad del aire, inventarios de emisiones y estudios de campo especiales en la ciudad de México han dado en conjunto nuevas perspectivas sobre las fuentes de emisión y en la ciencia de la contaminación de aire. La información es útil para desarrollar regulaciones y establecer prioridades de control de emisiones para proteger la salud de la población y el medio ambiente. La experiencia del estudio de caso de la ciudad de México será benéfica en la demostración de formas de trabajar hacia el conocimiento integral necesario para construir una política sólida en la región de la Corona de México Central.

Las siguientes son recomendaciones para la región de la Corona:

1. Desarrollar capacidades estratégicas de la red regional de monitoreo:
   a. Desplegar una unidad móvil para la selección de sitios en la Corona por 1 a 2 meses a la vez.
   b. Extender redes de monitoreo para incluir diferentes tipos de sitios (urbana, periurbana, de frontera, etc.) Desplegar equipos de monitoreo en sitios clave por 1 o 2 meses a la vez para medir especiación de COV y MP. Esta información puede ser de gran utilidad para acotar modelos numéricos e inventarios de emisiones.
2. Actualizar y evaluar inventarios de emisiones en la Corona:
   a. Obtener estimaciones de columna total utilizando datos de satélite.
   b. Asignar mediciones de campo dedicadas en fuentes clave (por ejemplo, fuentes móviles o quema de biomasa).
   c. Estimar restricciones en las emisiones considerando un balance de combustibles.
   d. Utilizar técnicas basadas en mediciones (covarianza turbulenta, proporciones ambiente).
3. Utilizar modelación numérica
   a. Identificar posibles sitios de despliegue y análisis de mediciones.
   b. Desarrollo de un modelo regional conceptual de transporte de contaminantes.
   c. Evaluar inventarios de emisiones (por ejemplo, modelación inversa, repartición de fuentes).
   d. Comprender la fotoquímica, formación de SOA y envejecimiento de plumas urbanas.
   e. Diseño y evaluación de políticas de control basadas en emisiones y de estrategias de mitigación.

4. Estudios de campo

   a. Mediciones especiadas de COV y MP.
   b. Mediciones de columna de contaminantes (por ejemplo, NO_x, CO, SO_2, NH_3 combinado con medidas de altura de mezclado).
   c. Mediciones de radiación y utilizar fotómetros solares.
   d. Obtener observaciones meteorológicas complementarias de superficie y en la vertical.
   e. Considerar diferentes estaciones y periodos más prolongados.
   f. Correlacionar efectos en salud pública y ecosistemas con la contaminación del aire.

5. Coordinación regional

   a. Desarrollar protocolos para el aseguramiento y control de la calidad de los datos.
   b. Evaluar los datos de actividad para los inventarios de emisiones entre diferentes dependencias.
   c. Recursos de cómputo (cubrir las necesidades de modelación y procesamiento de datos).
   d. Formación de recursos humanos (por ejemplo, para modelación, análisis de datos, operación y mantenimiento de instrumentos, diseño de políticas de control).
   e. Integrar la mitigación de cambio climático y los inventarios de emisiones con la gestión de la calidad del aire.

Referencias

De Foy, B., *et al.,*: Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 1209-1224, 2008.

Molina, L.T., *et al.,*: Air Quality in North America's Most Populous City-Overview of MCMA-2003 Campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2447–2473, 2007.

Molina, L.T., *et al.,*: An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8697-8760, 2010.

Song, J., *et al.,*: Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 3827-3846, 2010.

Apéndice 1

Tabla A05/Ap01-1. Principales instrumentos satelitales, características, y especies químicas que pueden medirse (adaptado de Streets *et al.,* 2013)

Descripción												
Plataforma satelital	ERS-2	TERRA			AQUA		ENVISAT	AURA		Metop-A		GOSAT
Instrumento	GOME	MOPITT	MISR	MODIS	MODIS	AIRS	Sciamachy	OMI	TES	GOME-2	IASI	TANSO-FTS
Periodo de operación	1995-2003	2000-	2000-	2000-	2002-	2002-	2002-2012	2004-	2004-	2006-	2006-	2009-
Parámetros de medición												
Cobertura global (días)	3	3	9	1-2	1-2	Diario	6	Diario	2	1.5	2 veces	3
Resolución especial (km)	40 x 320	22 x 22	17.6 x 17.6	~ 1 x 1	~ 1 x 1	50 x 50	30 x 60	13 x 24	5.3 x 8.5	40 x 80	50 x 50	~ 10 x 10
Especies medidas												
NO_2	x						x	x		x		
SO_2	x					x	x	x		x	x	
CO		x				x	x		x		x	
CH_4		x				x	x		x		x	x
COVNM[a]	x						x	x		x	x	
MP (AOD)[b]	x		x	x	x		x	x		x		
NH_3									x		x	
CO_2						x	x		x		x	x

[a] Compuestos orgánicos volátiles No Metánicos.

[b] Aerosol Optical Depth (Espesor óptico de aerosoles).

Tabla A05/Ap01-2. Categorías y palabras clave de las mediciones experimentales utilizadas para clasificar las publicaciones

Categoría Palabra clave	Definición
***Aerosol* (Aerosoles)**	
Aerosol	Miscellaneous Aerosol Measurements
Aerosol Speciation	Miscellaneous Aerosol Speciation Measurements
Aethalometer	Aethalometer
AMS	Aerosol Mass Spectrometer
ATOFMS	Aerosol Time-of-Flight Mass Spectrometry
BC	Black Carbon
CCN	Cloud Condensation Nuclei
CCSEM-EDX	Computer-Controlled Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersed analysis of X-rays
CN Counter	Condensation Nucleus Counter
CPC	Condensation Particle Counter
Dust	Dust
EC	Elemental Carbon
ECOC	Elemental Carbon and Organic Carbon
ETEM	Environmental Transmission Electron Microscopy
HTMDA	Hygroscopicity Tandem Differential Mobility Analyser
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry
ICPMS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry
NAA	Neutron Activation Analysis
Nephelometer	Nephelometer
NEXAFS	Near-Edge X-ray Absorption Fine Structure
OPC	Optical Particle Counter
PAS	Photoacoustic Absorption Spectrometer (Black Carbon)
PAS-2000	Photoelectric Aerosol Sensor (EcoChem) for Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
PCASP	Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe
PESA	Proton-Elastic Scattering Analysis
PILS	Particle Into Liquid Sampler
PIXE	Proton-Induced X-ray Emission
SEM	Scanning Electron Microscopy
SEM-EDS	Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersion Spectroscopy
SEM-EDX	Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersed analysis of X-rays
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer

Categoría Palabra clave	Definición
STIM	Scanning Transmission Ion Microscopy
STXM	Scanning Transmission X-ray Microscopy
SXRF	Scanning X-Ray Fluorescence
TC	Total Carbon
TDCIMS	Thermal Desorption Chemical Ionization Mass Spectrometer
TDMA	Tandem Differential Mobility Analyzer
TEM	Transmission Electron Microscopy
TRAC	Time Resolved Aerosol Collector
WSOC	Water Soluble Organic Carbon
XRF	X-Ray Fluorescence
***Aerosol optical* (Propiedades ópticas)**	
Aeronet	Aerosol Robotic Network
AOD	Aerosol Optical Depth
MAAP	Multi-Angle Absorption Photometer
PSAP	Particle Soot/Absorption Photometer
SP2	Single Particle Soot Photometer
***Criteria* (Gases criterio)**	
Gases criterio	NOx, CO, O_3, SO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}
***Gas Phase* (Fase gas)**	
C^{13}	Carbon-13
C^{14}	Carbon-14
CIMS	Chemical Ionization Mass Spectrometry
CO_2	Carbon dioxide
FAGE	Fluorescence Assay by Gas Expansion (OH, HO_2)
GCECD	Gas Chromatography - Electron Capture Detection
GCLCD	Gas Chromatography with Luminol Chemiluminescence Detection (NO_2, PAN)
HCN	Hydrogen Cyanide
ICMS	Ion Chromatograph Mass Spectrometer
ID-CIMS	Ion drift - Chemical Ionization Mass Spectrometer (HNO_3, N_2O_5)
NH_3	NH_3
NO_y	Total Reactive Nitrogen
OH	Laser Induced Fluorescence Technique
Peroxide	H_2O_2 and Hydroxymethyl Hydroperoxide

Categoría Palabra clave	Definición
Peroxy Radicals	4-Channel CIMS
QCL	Quantum Cascade Laser (NH3)
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
TDLIF	Thermal Dissociation - Laser Induced Fluorescence of nitrogen oxides (volatile nitrate)
TILDAS	Tunable Infrared Laser Differential Absorption Spectrometer (HCHO, NO_2)
Trace gases	Trace Gases
***voc* (cov)**	
DOAS	Differential Optical Absorption Spectroscopy
Ethene	Ethene
FIS	Fast Isoprene Sensor
FOS	Fast Olefin Sensor
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GCFID	Gas Chromatograph with Flame-Ionization
GCMS	Gas Chromatography - Mass Spectrometry
Glyoxal	Glyoxal
HCHO	Formaldehyde
HPAEC-PAD	High-Performance Anion-Exchange Chromatography with Pulsed Amperometric Detection (levoglucosan, mannosan, galactosan)
Levoglucosan	Levoglucosan
Olefin	Olefin
PITMS	Proton-transfer Ion Trap Mass Spectrometry
PTRMS	Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry
PUF Disks	Polyurethane Foam Samplers (Persistent Organic Pollutants)
TOGA	Trace Organic Gas Analyzer
VOC	Miscellaneous Volatile Organic Compounds
WAS	Whole Air Canister Sampling
***Meteorology* (Meteorología)**	
Ceilometer	Planetary Boundary Layer Height
Met	Standard Meteorological Parameters
Pibal	Pilot Balloon
Raob	Radiosonde Observation
RWP	Radar Wind Profiler
Sodar	Sonic Detection And Ranging
Sonic	Sonic Anemometer

Categoría Palabra clave	Definición
***Radiation* (Radiación)**	
Radiation	Radiation
AATS	Ames Airborne Tracking Sunphotometer
Albedo	Albedo
MFRSR	Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer
Photometer	Photometer
Pyranometer	Pyranometer
Radiometer	Radiometer
RSP	Research Scanning Polarimeter
SAFS	Scanning Actinic Flux Spectroradiometer
Spectroradiometer	Spectroradiometer
SSFR	Solar Spectral Flux Radiometer
***Other* (Otros)**	
CMet	Controlled Meteorological Balloons
Dial	Differential Absorption LIDAR (Ozone)
Eddy Covariance	Eddy Covariance Flux Measurements
HSRL	High Spectral Resolution LIDAR
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
Ozonesonde	Electro-chemical Concentration Cell Instrument, Radiosonde
SABL	Scanning Aerosol Backscatter LIDAR
Tekran	Tekran Speciated Mercury Instrument
Tethersonde	Tethersonde

Tabla A05/Ap01-3: Lista de referencias con las palabras clave

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
achcar_j_a_2011	-	RAMA	Criteria
adachi_k_2008	MILAGRO	C130, USFS	TEM
adachi_k_2010	MILAGRO	C130, USFS	TEM
adachi_k_2011	MILAGRO	C130, USFS	TEM
adachi_k_2011b	MILAGRO	C130, USFS	TEM
adhikary_b_2010	MILAGRO	STEM, DC8, C130	Trace gases, Aerosol
aiken_a_c_2007	MILAGRO	C130	HR-ToF-AMS
aiken_a_c_2009	MILAGRO	T0	HR-ToF-AMS, Trace gases, Aerosol
aiken_a_c_2010	MILAGRO	T0, WRF, Flexpart	HR-ToF-AMS, Trace gases, Aerosol, C_{14}
almanza_v_h_2012	MILAGRO	OpenFOAM, WRF-Chem, T0, T1, T2	Criteria, EC
almanza_v_h_2014	-	WRF-Chem	Criteria
altuzar_v_2005	-	RAMA sites	Ethene
amador-munoz_o_2011	-	RAMA sites	Aerosol Speciation
anderson_h_r_2012	-	OMI, MODIS, GEOS-Chem, TM5	Criteria
apel_e_c_2010	MILAGRO	WRF-Chem, MOZART, T0, T1, G1, C130	VOC
arellano_jr_a_f_2007	MILAGRO	MOPITT, CAM3, C130, DC8	Criteria
barker_t_2010	-	E3MG, p-Tomcat	
barnard_j_c_2007	MCMA-2003	Cenica	MFRSR
barnard_j_c_2008	-	Cenica, T2, G1	MFRSR, AMS, DOAS, Albedo
barraza-villarreal_a_2008	-	RAMA	Criteria
barrera_v_a_2012	-	RAMA, Hysplit	Criteria, PIXE, XRF
baumgardner_d_2007	-	UNAM, RAMA sites	SP2, PSAP, PAS-2000, CN Counter, Criteria
baumgardner_d_2009	MILAGRO	Altzomoni	Met, Criteria, Aerosol
baumgardner_d_2012	MILAGRO	RAMA, Altzomoni, UFORE, WRF-Chem	Criteria
bei_n_2008	MCMA-2003	RAMA, SMN, MM5, CAM_x, ININ, St Ana, Cenica, AML	Met, Criteria
bei_n_2010	MILAGRO	RAMA, WRF, CAM_x, Cmet, Met (all platforms)	Criteria, Met, RWP, Tethersonde, Cmet, Raob, (All met)
bei_n_2012	MILAGRO	T0, T1, WRF-Chem	HR-ToF-AMS
bell_m_l_2011	Review	Review	Criteria
bergstrom_r_w_2010	MILAGRO	J31	SSFR, AATS
boeke_n_l_2011	MILAGRO	OMI, GEOS-Chem, DC8	HCHO
boersma_k_f_2008	MILAGRO	OMI, GEOS-Chem, DC8	Criteria
bohlin_pernilla_2008	MILAGRO	T0, T1, T2	PUF Disks
bon_d_m_2011	MILAGRO	T1	VOC
butler_t_m_2012	Review	MATCH-MPIC	
caetano_e_2009	-	MM5	
calderon-garciduenas_l_2013	-	RAMA	Criteria
canagaratna_m_r_2007	Review	Review	AMS
cappa_c_d_2010	MILAGRO	T0	TD-AMS
carabali_g_2012	MILAGRO	T1	PSAP, Nephelometer, CPC, TEM
carbajal-hernandez_j_j_2012	-	RAMA	Criteria
cec__2009	Review	RAMA	Criteria

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
christian_t_j_2010	MILAGRO	Mobile, MODIS, RAMA	FTIR, ECOC, HPAEC-PAD, ICPMS, Nephelometer, CO_2, Criteria
coddington_o_2008	MILAGRO	J31, T2, MODIS	SSFR, AATS, MFRSR, Aeronet, PSAP
cofepris__2011	Report	-	
corr_c_a_2009	MILAGRO	T1	MFRSR, Aeronet
crawford-brown_d_2012	-	E3MG, p-TOMCAT	
cross_e_s_2009	MILAGRO	T1	LS-ToF-AMS
crounse_j_d_2009	MILAGRO	C130, MODIS	VOC, Criteria
davis_l_w_2008	-	RAMA	Criteria
de_almeida_castanho_a_d_2007	MILAGRO	MODIS	Photometer, Aeronet
de_bauer_m_d_2007	-	-	Deposition
de_foy_b_2005	MCMA-2003	SMN, Quikscat, Cenica, RAMA	Met, Criteria
de_foy_b_2006	MCMA-2003	SMN, RAMA, MM5, MODIS, Cenica	Met
de_foy_b_2006b	MCMA-2003	SMN, MM5, Flexpart, Cenica	Met, Pibal
de_foy_b_2006c	MCMA-2003	SMN, RAMA, MM5, GOES, Cenica	Met, Criteria
de_foy_b_2007	MCMA-2003	RAMA, MM5, Flexpart, CAM_X, Cenica	FTIR, mini-DOAS, DOAS, Criteria
de_foy_b_2008	MILAGRO	SMN, RAMA, T0, T1, T2	Met, Criteria, RWP
de_foy_b_2009	MILAGRO	SMN, T0, T1, T2, RAMA, MODIS, WRF, Flexpart	Met, Criteria, RWP
de_foy_b_2009b	MILAGRO	RAMA, St Ana, Tenango, AML, T0, T1, T2, OMI, WRF, CAM_X	Criteria, RWP
de_foy_b_2011	MILAGRO	B200, WRF, Flexpart	HSRL
de_gouw_j_2007	Review	-	PTRMS
de_gouw_j_2009	Review	-	Aerosol
de_gouw_j_a_2009	MILAGRO	T1	VOC, Aerosol, Met, Criteria
decarlo_p_f_2008	MILAGRO	C130, Mozart	HR-ToF-AMS, Nephelometer, OPC, SMPS, CIMS, Criteria, NOy
decarlo_p_f_2010	MILAGRO	C130, WRF, Flexpart	HR-ToF-AMS, Criteria, HCN
deng_t_2011	Review		
diaz-nigenda_e_2010	-	RAMA, MCCM-WEPS	Criteria
diaz_r_v_2014	-	RAMA, Hysplit	PIXE, XRF
doran_j_c_2000	IMADA	IMADA, RAMS	RWP, Met
doran_j_c_2007	MILAGRO	T1, T2	Met, RWP, ECOC, PAS, Nephelometer, MFRSR
doran_j_c_2008	MILAGRO	T1, T2, G1, WRF, Flexpart	Met, Criteria, ECOC, SEM
dunlea_e_j_2006	MCMA-2003	Cenica, AML	Criteria, DOAS, FTIR (O_3), VOC
dunlea_e_j_2007	MCMA2002, MCMA-2003	AML, RAMA, Cenica	TILDAS, Criteria, FTIR, DOAS
dunn_m_j_2004	MCMA-2003	St Ana, Cenica	SMPS, Met, Criteria
dusanter_s_2009	MILAGRO	T0, RAMA, MCM	FAGE, Criteria, Spectroradiometer, PTRMS, DOAS, HCHO, WAS
dusanter_s_2009b	MILAGRO	T0, RAMA	FAGE, Criteria, Spectroradiometer

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
dzepina_k_2007	MCMA-2003	Cenica	PAS-2000, Q-AMS, GCMS, Criteria
dzepina_k_2009	MILAGRO	SOA Models	VOC, Aerosol, Criteria
dzepina_k_2011	MILAGRO	SOA Models	VOC, Aerosol, Criteria
eibenschutz_r_2010	Review	-	
emmons_l_k_2010	MILAGRO	C130, DC8, Mozart	Criteria, VOC
ervens_b_2010	MILAGRO	T0	CCN
espinosa_a_a_2013		UNAM, RAMA	Criteria, PIXE, XRF
fast_j_2009	MILAGRO	T0, T1, T2, PTP, RAMA, G1, C130, DC8	Met, RWP, Criteria, LIDAR, ECOC, PAS, PSAP, AMS, GCFID, PITMS
fast_j_d_1998	IMADA	IMADA, RAMS	Met, RWP, Criteria
fast_j_d_2007	MILAGRO	SMN, T0, T1, T2, WRF-Chem	Met (all), RWP, Criteria
fortner_e_c_2009	MILAGRO	T0	PTRMS, Met, DOAS
fountoukis_c_2009	MILAGRO	T1, ISORROPIA	PILS, QCL, TDLIF, Met, Criteria
fried_a_2011	MILAGRO	DC8, MCM	HCHO (TDLAS), OH, VOC, Criteria
gallego_f_2013	-	RAMA	Criteria
garcia-escalante_j_s_2014	-	Tula, MCCM	Criteria, Met
garcia-reynoso_a_2009	-	Toluca, RAMA, MCCM	Criteria
garcia-reynoso_j_a_2007		RAMA, UNAM	Criteria, FTIR
garcia_a_r_2006	MCMA-2003	Cenica	DOAS, FTIR, TILDAS, Criteria, HCHO, Glyoxal
garcia_a_z_2009	-	Mezquital	Biomonitors
garcia_reynoso_j_a_2009	Report	RAMA, Toluca, MCCM, CAM_X	Criteria, Met
gilardoni_s_2009	MILAGRO	Simat, Altzomoni, C130, MODIS	FTIR, XRF, AMS, Met, Criteria
greenberg_j_r_2009	MILAGRO	T1	Tethersonde (O_3, aerosols, radiation), Criteria
grutter_m_2005	-	RAMA	DOAS, FTIR, HCHO (DNPH), Criteria
grutter_m_2008	MILAGRO	FZK-ENDURO	DOAS, COSPEC, SIGIS
gustafson_w_i_2011	MILAGRO	T0, T1, T2, C130, G1, SMN, RAMA, WRF-Chem, MODIS	Met, Criteria, VOC, Aerosol
gutierrez_e_2010	-	SMN, MODIS, INEGI	Met, AOD, Health
heald_c_l_2008	MILAGRO, Review	T0, T1, C130	Criteria, VOC, Aerosol
heald_c_l_2010	MILAGRO, Review	T0, T1, C130	AMS
hennigan_c_j_2008	MILAGRO	T1, C130, ISORROPIA	PILS, CIMS, Criteria, Met
herndon_s_c_2005	MCMA-2003	AML, PTP	TILDAS, PTRMS, HCHO, CO_2, AMS, Criteria, Met
herndon_s_c_2008	MILAGRO	AML, PTP	AMS, PTRMS, Criteria
hodzic_a_2009	MILAGRO	T0, T1, PTP, Chimere, ISORROPIA	Met, Criteria, RWP, LIDAR, AMS
hodzic_a_2010	MILAGRO	T0, T1, C130, G1, Chimere	AMS, Criteria
hodzic_a_2010b	MILAGRO	T0, T1, Chimere	C^{14}, ECOC, TC
hodzic_a_2011	MILAGRO	T0, T1, C130, Chimere	AMS, Criteria
hodzic_a_2012	MILAGRO	T0, T1, WRF-Chem	AMS, Criteria
hudson_r_2006		MCMA, Tlaxcala	Olfactory function
huffman_j_a_2008	MILAGRO	T0	TD-AMS, SMPS
huffman_j_a_2009	MILAGRO	T0	TD-AMS, SMPS, CN, PIXE
huffman_j_a_2009b	MILAGRO	T0	TD-AMS
iniestra_r_2008	-	MM5	
janssen_n_a_h_2011	Review		Criteria, CN

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
jauregui_e_1996	-	SMN	Met
jauregui_e_1997	-	UNAM, SMN	Met
jauregui_e_1997b	-	UNAM, SMN	Met
jauregui_e_1999	-	UNAM, SMN	Met, Pyranometer
jazcilevich_a_2000	-	UNAM, SMN, RAMA	Met
jazcilevich_a_2012	-	-	PDR (Vehicle wake)
jazcilevich_a_d_2003	-	RAMA, MCCM	Met, Criteria
jazcilevich_a_d_2005	-	RAMA, MCCM	Met, Criteria
jazcilevich_a_d_2007	-	ADVISOR	Vehicle Emissions
jazcilevich_a_d_2011	-	RAMA, ADVISOR, MCCM	Criteria
jiang_m_2005	MCMA-2003	AML	Aethalometer, PAS-2000, CO_2, TILDAS, PTRMS, Criteria
jimenez-garza_o_2012	-	Guanajuato	Health
jimenez_j_l_2009	Review	T0, T1, C130	AMS, Criteria
jobson_b_t_2010	MCMA-2003	Cenica	PTRMS, DOAS, GCFID, Met
johansson_m_2009	MILAGRO	Mobile, WRF, CAM_X	Mini-DOAS, HCHO, Criteria, Met
johnson_k_s_2005	MCMA-2003	AML, Cenica	TRAC, CCSEM-EDX, SEM, TEM
johnson_k_s_2006	MCMA-2003	Cenica, MM5, Flexpart	PIXE, PESA, STIM
johnson_k_s_2008	MCMA-2003	Cenica	PIXE, PESA, AMS
jolleys_m_d_2012	MILAGRO	T0	AMS
juarez_a_2005	-	Puebla	Criteria, Met
karl_t_2009	MILAGRO	C130, WRF-Chem	PTRMS, TOGA, WAS
karydis_v_a_2010	MCMA-2003	Cenica, PMCAMx, ISORROPIA	AMS, PIXE
karydis_v_a_2011	MILAGRO	T0, T1, PMCAMx, ISORROPIA	AMS, PILS, Dust
kleinman_l_i_2008	MILAGRO	G1, T1, T2	PTRMS, AMS, PCASP, SMPS, Gust, Criteria
kleinman_l_i_2009	MILAGRO	G1, T1, T2	PTRMS, AMS, PCASP, SMPS, Gust, Criteria
knobelspiesse_k_2011	MILAGRO	J31, MODIS	RSP, Aeronet
kolb_c_e_2004	MCMA-2003	AML	QCL, TILDAS, AMS, PTRMS, CPC, Criteria, PAS-2000, Aethalometer, HCHO
labrada-delgado_g_2012	MILAGRO	T0, T1	SEM-EDX
lance_s_2013	MILAGRO	T1	HTMDA, CCN (size resolved), AMS
lee-taylor_j_2011	MILAGRO	GECKO-A, T0, T1, RAMA	VOC (all), FAGE, AMS, Met, Criteria
lei_w_2007	MCMA-2003	Cenica, RAMA, MM5, CAM_X	Criteria, DOAS, HCHO, GCFID
lei_w_2008	MCMA-2003	Cenica, RAMA, MM5, CAM_X	Criteria, DOAS, HCHO, GCFID
lei_w_2009	MCMA-2003	Cenica, RAMA, MM5, CAM_X	Criteria, DOAS, GCFID, FIS, HCHO
lei_w_2013	MILAGRO	T0, T1, RAMA, WRF-Chem	AMS, Aethalometer, Aerosol Absorption Photometer, Criteria
lewandowski_p_a_2010	MILAGRO	Mobile, G1, RAMA	LIDAR, Photometer, Aerosol, Criteria
li_g_2010	MILAGRO	T0, WRF-Chem	DOAS, FAGE, Criteria, HR-ToF-AMS, CIMS
li_g_2011	MILAGRO	T0, G1, C130, RAMA, MODIS, WRF-Chem	AMS, Radiometer, Criteria, Aeronet
li_g_2011b	MILAGRO	T0, T1, RAMA, WRF-Chem	AMS, DOAS, Glyoxal, FAGE, Criteria
li_g_2012	MILAGRO	T0, T1, RAMA, WRF-Chem	HR-ToF-AMS, Criteria, PILS

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
liu_s_2009	MILAGRO	Simat, Altzomoni, C130, HYSPLIT	FTIR, XRF, STXM, NEXAFS
livingston_j_m_2009	MILAGRO	J31, OMI, MODIS	AATS, SSFR, Aeronet
marley_n_a_2004	MCMA-2003	Cenica	GCLCD (NO_2, PAN), DOAS (NO_2), TDLAS (NO_2)
marley_n_a_2007	IMADA, MCMA-2003	RAMA, Cenica	GCECD, Criteria, Aethalometer
marley_n_a_2009	MILAGRO	T0, T1	Nephelometer, MAAP, Aethalometer, PSAP, Radiometer, Met
marley_n_a_2009b	MCMA-2003, MILAGRO	Cenica, T0, T1	Aethalometer, C^{13}, C^{14}
marquez_c_2005	-	Orizaba, RAMA, HYSPLIT	Criteria, Met, Aerosol, Radiometer
marr_l_c_2004	MCMA2002	AML, RAMA	PAS-2000, ECOC, Met, Criteria
marr_l_c_2006	MCMA-2003	Cenica	PAS-2000, GCMS, AMS, Criteria
martinez-carrillo_m_a_2010	-	Tula	PIXE, Criteria
martinez-carrillo_m_a_2010b	-	Tula	PIXE, SEM-EDS, Criteria
martinez-carrillo_m_a_2010c	-	Tula	PIXE
martinez-carrillo_m_a_2011	-	Tula	PIXE, NAA
massie_s_t_2006	MCMA-2003	RAMA, MODIS, MOPITT	Criteria, Aeronet
mejia-dugand_s_2013			No AQ data
melamed_m_l_2009	MILAGRO	Tenango	DOAS (NO_2), Ceilometer, Criteria, Met
melgar-paniagua_e_m_2010	-	Tula	Criteria
melgar-paniagua_e_m_2013	-	Tula	Criteria, Met
mena-carrasco_m_2009	MILAGRO	STEM, C130	Criteria, NOy
moffet_r_c_2008	MILAGRO	T0	ATOFMS, CCSEM-EDX
moffet_r_c_2008b	MILAGRO	T0, WRF, Flexpart, MODIS	ATOFMS
moffet_r_c_2010	MILAGRO	T0, T1, T2	PIXE, SXRF, STXM, CCSEM-EDX
mohr_c_2009	MILAGRO	Chamber, T0	AMS
molina_l_t_2007	MCMA-2003, Review	-	-
molina_l_t_2008	MILAGRO, Review	-	-
molina_l_t_2009	Review	-	-
molina_l_t_2010	MILAGRO, Review	-	-
moreno_t_2008	MILAGRO	T0, T1, T2	ICPMS
moreno_t_2008b	MILAGRO	T0, T1, T2	SEM
moya_m_2004		RAMA	Aerosol speciation, FTIR, Met
mugica_v_2009	MILAGRO	T0	Aerosol speciation, ICP-AES, Criteria, ECOC
nunnermacker_l_j_2008	MILAGRO	G1, T1	Peroxide, CIMS, Radiometer, Criteria, Met

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
ochoa_c_2012	MILAGRO	Altzomoni, WRF-Chem	Met, Criteria, Aerosol, AMS
oneill_m_s_2008			Criteria, Met
osorio_m_a_2011	-	Puebla	Criteria
padro_l_t_2010	MILAGRO	T0, T1, T2	Aerosol speciation, CCN
palancar_g_g_2013	MILAGRO	T1	Aeronet, Criteria, TILDAS, SAFS, MFRSR
paredes-miranda_g_2009	MILAGRO	T0	PAS, Aethalometer, AMS
paredes-miranda_g_2013	MILAGRO	T0	PAS, Met
parrish_d_d_2009	Review	-	-
parrish_d_d_2011	Review	-	-
parry_i_w_h_2010			No AQ data
patadia_f_2013	MILAGRO	MISR, B200, J31	Aeronet, HSRL, AOD, AATS
perez_sesma_a_2012	Report	-	-
perring_a_e_2010	MILAGRO	DC8	TDLIF, TDLAS (HCHO), OH, PTRMS, Criteria
pope_c_a_2009	Review	-	-
querol_x_2008	MILAGRO	T0, T1, T2, Tenango, UNAM, Cenica	Aerosol speciation, Met
quintana_r_2011	MILAGRO	T0, T1	Aerosol speciation, PIXE, ECOC
ramos-aguilar_r_2013	-	Puebla	Met
redemann_j_2009	MILAGRO	J31, MODIS	AATS
reyes_f_2006		UNAM Chamber	FTIR
rivera_c_2009	MILAGRO	Tula, WRF, Flexpart	Mini-DOAS (NO_2, SO_2), Met, Pibal, Raob
rivera_c_2013	-	OMI, UNAM, RAMA	DOAS (NO_2), Criteria, Ceilometer, Met
rogers_r_r_2009	MILAGRO	B200, J31, G1, T0, T1, MODIS, MISR	HSRL, Aeronet, AATS, Nephelometer, PSAP
romero_guzman_e_t_2007	-	Toluca	Criteria, PIXE, SEM
rosas_perez_i_2007	-	RAMA	Criteria, PIXE, Aerosol Speciation, Toxicity
ruiz_suarez_lg_2012	-	Puebla	Criteria
rutter_a_p_2009	MILAGRO	T0, WRF, Flexpart	Tekran, Levoglucosan
salcedo_d_2006	MCMA-2003	Cenica	AMS, Aethalometer, PIXE, Aerosol, Criteria
salcedo_d_2007	MCMA-2003	Cenica	AMS
salcedo_d_2010	MILAGRO	T0, WRF, Flexpart	AMS, Aerosol speciation, Met, RWP
salcedo_d_2012	-	Morelos, MCCM	Criteria, Met
salcedo_d_2012b	MILAGRO	T0	AMS, ICP-AES, PIXE
san_martini_f_m_2005	IMADA	ISORROPIA	Aerosol, Met
san_martini_f_m_2006	MCMA-2003	Cenica, AML, ISORROPIA, RAMA	AMS, TILDAS, NH_3, FTIR, PIXE, Criteria
san_martini_f_m_2006b	MCMA-2003	Cenica, AML, ISORROPIA, RAMA	AMS, TILDAS, NH_3, FTIR, PIXE, Criteria
schmidt_k_s_2010	MILAGRO	J31, T0, T1, T2, AML	AATS, SSFR, Aeronet, MFRSR, PAS, Nephelometer, PSAP
sedema-gdf__2012	Report	-	-
sedema-gdf__2012b	Report	-	-
sedema-gdf__2012c	Report	-	-
semarnat__2006	Report	-	-
semeniuk_t_a_2007	-	Biomass samples	TEM, ETEM, Aerosol
shaw_w_j_2007	MILAGRO	T0, T1, T2	RWP, Raob, LIDAR, Sodar, Met
sheehy_p_m_2010	MCMA-2003	Cenica, MCM	DOAS, FTIR, PTRMS, FIS, GCFID, Radiometer
shinozuka_y_2009	MILAGRO	C130	Aerosol, CCN, Radiometer

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
shirley_t_r_2006	MCMA-2003	Cenica	FAGE, Met
shon_z_h_2008	MILAGRO	C130	NOy, Peroxy radicals, Criteria, Radiation
shrivastava_m_2011	MILAGRO	T0, C130, G1, WRF-Chem	AMS
sillman_s_2009	IMADA	IMP, CIT	Criteria, NOy
singh_h_b_2009	Review		
smith_j_n_2008	MILAGRO	T1	TDCIMS
song_j_2010	MILAGRO	Cenica, RAMA, T0, G1, WRF, CAM_X	GCFID, GCMS, PTRMS, DOAS, TILDAS, HCHO, Criteria
sosa_g_2013	MILAGRO	Tula	Met, Raob, Criteria, Nephelometer, Aethalometer, Biomonitors
spencer_k_m_2009	MILAGRO	C130	CIMS (Peroxynitric acid), Criteria, VOC
stephens_s_2008	-	RAMA	Criteria
stevens_g_2007	-	RAMA	Criteria, Met
stevens_g_a_2008	-	National	Criteria
stone_e_a_2008	MILAGRO	T0, T1	ECOC, WSOC, GCMS (Levoglucosan, Organic tracers)
stone_e_a_2010	MILAGRO	T0, T1	ECOC, WSOC, GCMS (Levoglucosan, Organic tracers)
streets_d_g_2013	Review	-	
stremme_w_2009	-	UNAM, Altzomoni, RAMA	FTIR (CO), Criteria, Met
stremme_w_2013	-	UNAM, T1, IASI	FTIR (CO)
subramanian_r_2010	MILAGRO	C130, WRF, Flexpart, Cmet	SP2 (CN), Criteria, Met, Cmet
talbot_r_2008	MILAGRO	DC8	Tekran, DIAL, Criteria, VOC
thompson_a_m_2008	MILAGRO	T1, DC8	Ozonesonde, Dial
thornhill_d_a_2008	MILAGRO	T0, T1, RAMA, AML, WRF, Flexpart	PAS-2000, Aethalometer, Criteria
thornhill_d_a_2010	MILAGRO	AML, T1	Criteria, PTRMS, GCFID, TILDAS, CN, CPC, HCHO, CO_2
tie_x_2009	MILAGRO	C130, RAMA, WRF-Chem	Criteria, NOy, VOC
tie_x_2010	MILAGRO	RAMA, WRF-Chem	Criteria
tie_x_x_2007	MILAGRO	RAMA, WRF-Chem	Criteria
torres-jardon_r_2009	-	RAMA, MCCM	Criteria, NOy
tovalin-ahumada_h_2007	-	MCMA, Puebla	Aerosol speciation, XRF
tovalin-ahumada_h_2007b	-	MCMA, Puebla	VOC exposure
tsimpidi_a_p_2010	MCMA-2003	Cenica, MM5, PMCAMx	AMS, Aerosol
tsimpidi_a_p_2011	MILAGRO	T0, T1, T2, PMCAMx	AMS, Aerosol
ulbrich_i_m_2012	MILAGRO	T0	AMS
unam__2009			Criteria, Met
vay_s_a_2009	MILAGRO	DC8, Flexpart	C14, CO2, Criteria
vega_e_2004	-	MCMA	Aerosol Speciation
vega_e_2007	-	Salamanca	Aerosol Speciation
vega_e_2009	IMADA	MCMA	Aerosol speciation
vega_e_2010	IMADA	RAMA, CALPUFF	Aerosol speciation, ECOC, Met
vega_e_2011	-	Guanajuato, CIT	Criteria, VOC, Met
velasco_e_2003	-	Biogenic emissions, landsat	
velasco_e_2005	MCMA-2003	Cenica	CO2, Eddy Covariance, Sonic, Met
velasco_e_2005b	MCMA-2003	Cenica	Olefin (FOS), PTRMS, Eddy Covariance, Sonic

Autor / año	Campaña	Plataforma/ Satélite / Modelo	Datos
velasco_e_2007	MCMA2002, MCMA-2003	Cenica, St Ana, RAMA	GCFID, PTRMS, Olefin (FOS), DOAS
velasco_e_2008	MCMA-2003	Cenica	Met, Criteria, Tethersonde
velasco_e_2009	MILAGRO	Simat	PTRMS, Eddy Covariance, Sonic, CO2, Olefin (FOS)
velasco_e_2011	MILAGRO	Simat	Met, Eddy Covariance, Sonic, Radiation
volkamer_r_2005	MCMA-2003	Cenica	DOAS, HCHO, Glyoxal, Criteria
volkamer_r_2006	MCMA-2003	Cenica	DOAS, Glyoxal, AMS, Met, CN
volkamer_r_2007	MCMA-2003	Cenica	DOAS, Glyoxal, AMS, Met
volkamer_r_2010	MCMA-2003	Cenica, MCM	DOAS, HCHO, Glyoxal, FTIR, PTRMS, FIS, GCFID, Radiometer
voss_p_b_2010	MILAGRO	Cmet, C130, WRF, Flexpart	Met, Criteria, CIMS, NOy, SABL, VOC, Cmet
wang_j_2010	MILAGRO	T0	SMPS, CCN, TDMA, AMS, Aethalometer
west_j_j_2004	IMADA	RAMA, CIT	Criteria, VOC
whiteman_c_d_2000	IMADA	RAMS	Raob, RWP, Met
wohrnschimmel_h_2006	MCMA-2003	Cenica	Tethersonde (O_3, VOC)
wohrnschimmel_h_2006b	-	MCMA, RAMA	Exposure, Criteria
wohrnschimmel_h_2008	-	MCMA, RAMA	Exposure, Criteria
wohrnschimmel_h_2010	-	Cenica	VOC
wood_e_c_2009	MILAGRO	AML, PTP	Criteria, TILDAS, HCHO, AMS, SMPS, Radiometer
wood_e_c_2010	MILAGRO	AML, PTP, C130	Criteria, TILDAS, HCHO, AMS, SMPS, Radiometer, PTRMS, NOy
yokelson_r_j_2007	MILAGRO	USFS, C130	FTIR, GCFID, Nephelometer, TEM, CO2, CIMS, Criteria
yokelson_r_j_2009	MILAGRO	USFS, Yucatan	FTIR, GCFID, Nephelometer, TEM, CO2, CIMS, Criteria
yokelson_r_j_2011	MILAGRO	USFS	FTIR, GCFID, Nephelometer, TEM, CO2, CIMS, Criteria
yu_x_y_2009	MILAGRO	T1, T2	Aerosol, ECOC, AMS, Criteria
zalakeviciute_r_2012	MILAGRO	Simat	AMS, Met, Sonic, Eddy Covariance
zavala_m_2006	MCMA-2003	AML	TILDAS, PTRMS, CO_2, NOy, Criteria
zavala_m_2009	MILAGRO	AML	TILDAS, HCHO, NH_3, PTRMS, CO_2, NOy, Criteria, AMS, CPC, Photometer
zavala_m_2009b	MCMA-2003	RAMA, MM5, CAM_X	Criteria
zavala_m_2009c	MILAGRO	AML, RAMA	PTRMS, TILDAS, HCHO, AMS, CO2, Criteria, NOy
zavala_m_2013	-	Moves, MNEI	
zhang_y_2009	MILAGRO	RAMA, WRF-Chem	PTRMS, Criteria, Met
zhang_y_x_2009	MILAGRO	RAMA, WRF-Chem	Criteria
zheng_j_2008	MILAGRO	T0	ID-CIMS, AMS, ICMS, Criteria, FAGE, Met

Apéndice 2

LISTA DE REFERENCIAS

1. achcar_j_a_2011: Achcar, J. A., Sousa, D. E. F., Rodrigues, E. R., Tzintzun, G., (2011). "Comparing the Number of Ozone Exceedances in Different Seasons of the Year in Mexico City." Environmental Modeling & Assessment.
2. adachi_k_2008: Adachi, K., Buseck, P. R., (2008). "Internally mixed soot, sulfates, and organic matter in aerosol particles from Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
3. adachi_k_2010: Adachi, K., Buseck, P. R., (2010). "Hosted and Free-Floating Metal-Bearing Atmospheric Nanoparticles in Mexico City." *Environmental Science & Technology*.
4. adachi_k_2011: Adachi, K., Buseck, P. R., (2011). "Atmospheric tar balls from biomass burning in Mexico." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.
5. adachi_k_2011b: Adachi, K., Freney, E. J., Buseck, P. R., (2011). "Shapes of internally mixed hygroscopic aerosol particles after deliquescence, and their effect on light scattering." *Geophysical Research Letters*.
6. adhikary_b_2010: Adhikary, B., Carmichael, G. R., Kulkarni, S., Wei, C., Tang, Y., DAllura, A., Mena-Carrasco, M., Streets, D. G., Zhang, Q., Pierce, R. B., Al-Saadi, J. A., Emmons, L. K., Pfister, G. G., Avery, M. A., Barrick, J. D., Blake, D. R., Brune, W. H., Cohen, R. C., Dibb, J. E., Fried, A., Heikes, B. G., Huey, L. G., OSullivan, D. W., Sachse, G. W., Shetter, R. E., Singh, H. B., Campos, T. L., Cantrell, C. A., Flocke, F. M., Dunlea, E. J., Jimenez, J. L., Weinheimer, A. J., Crounse, J. D., Wennberg, P. O., Schauer, J. J., Stone, E. A., Jaffe, D. A., Reidmiller, D. R., (2010). "A regional scale modeling analysis of aerosol and trace gas distributions over the eastern Pacific during the INTEX-B field campaign." *Atmos. Chem. Phys.*
7. aiken_a_c_2007: Aiken, A. C., DeCarlo, P. F., Jimenez, J. L., (2007). "Elemental analysis of organic species with electron ionization high-resolution mass spectrometry." Analytical Chemistry.
8. aiken_a_c_2009: Aiken, A. C., Salcedo, D., Cubison, M. J., Huffman, J. A., DeCarlo, P. F., Ulbrich, I. M., Docherty, K. S., Sueper, D., Kimmel, J. R., Worsnop, D. R., Trimborn, A., Northway, M., Stone, E. A., Schauer, J. J., Volkamer, R. M., Fortner, E., de Foy, B., Wang, J., Laskin, A., Shutthanandan, V., Zheng, J., Zhang, R., Gaffney, J., Marley, N. A., Paredes-Miranda, G., Arnott, W. P., Molina, L. T., Sosa, G., Jimenez, J. L., (2009). "Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)-Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
9. aiken_a_c_2010: Aiken, A. C., de Foy, B., Wiedinmyer, C., DeCarlo, P. F., Ulbrich, I. M., Wehrli, M. N., Szidat, S., Prevot, A. S. H., Noda, J., Wacker, L., Volkamer, R., Fortner, E., Wang, J., Laskin, A., Shutthanandan, V., Zheng, J., Zhang, R., Paredes-Miranda, G., Arnott, W. P., Molina, L. T., Sosa, G., Querol, X., Jimenez, J. L., (2010). "Mexico city aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)-Part 2: Analysis of the biomass burning contribution and the non-fossil carbon fraction." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
10. almanza_v_h_2012: Almanza, V. H., Molina, L. T., Sosa, G., (2012). "Soot and SO2 contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
11. almanza_v_h_2014: Almanza, V. H., Batyrshin, I., Sosa, G., (2014). "Multi-criteria selection of an Air Quality Model configuration based on quantitative and linguistic evaluations." Expert Systems with Applications.
12. altuzar_v_2005: Altuzar, V., Tomas, S. A., Zelaya-Angel, O., Sanchez-Sinencio, F., Arriaga, J. L., (2005). "Atmospheric ethene concentrations in Mexico City: Indications of strong diurnal and seasonal dependences." *Atmospheric Environment*.
13. amador-munoz_o_2011: Amador-Munoz, O., Villalobos-Pietrini, R., Miranda, J., Vera-Avila, L. E., (2011). "Organic compounds of PM2.5 in Mexico Valley: Spatial and temporal patterns, behavior and sources." Science of the Total Environment.
14. anderson_h_r_2012: Anderson, H. R., Butland, B. K., van Donkelaar, A., Brauer, M., Strachan, D. P., Clayton, T., van Dingenen, R., Amann, M., Brunekreef, B., Cohen, A., Dentener, F., Lai, C., Lamsal, L. N., Martin, R. V., Grp, Isaac Phase One Study, Grp, Isaac Phase Three Study, (2012). "Satellite-based Estimates of Ambient Air Pollution and Global Variations in Childhood Asthma Prevalence." *Environmental Health Perspectives*.
15. apel_e_c_2010: Apel, E. C., Emmons, L. K., Karl, T., Flocke, F., Hills, A. J., Madronich, S., Lee-Taylor, J., Fried, A., Weibring, P., Walega, J., Richter, D., Tie, X., Mauldin, L., Campos, T., Weinheimer, A., Knapp, D., Sive, B., Kleinman, L., Springston, S., Zaveri, R., Ortega, J., Voss, P., Blake, D., Baker, A., Warneke, C., Welsh-Bon, D., de Gouw, J., Zheng, J., Zhang, R., Rudolph, J., Junkermann, W., Riemer,

D. D., (2010). "Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan area." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

16. arellano_jr_a_f_2007: Arellano Jr., A. F., Raeder, K., Anderson, J. L., Hess, P. G., Emmons, L. K., Edwards, D. P., Pfister, G. G., Campos, T. L., Sachse, G. W., (2007). "Evaluating model performance of an ensemble-based chemical data assimilation system during INTEX-B field mission." *Atmos. Chem. Phys.*
17. barker_t_2010: Barker, T., Anger, A., Dessens, O., Pollitt, H., Rogers, H., Scrieciu, S., Jones, R., Pyle, J., (2010). "Integrated modelling of climate control and air pollution: Methodology and results from one-way coupling of an energy-environment-economy (E3MG) and atmospheric chemistry model (p-TOMCAT) in decarbonising scenarios for Mexico to 2050." *Environmental Science & Policy*.
18. barnard_j_c_2007: Barnard, J. C., Kassianov, E. I., Ackerman, T. P., Johnson, K., Zuberi, B., Molina, L. T., Molina, M. J., (2007). "Estimation of a radiatively correct black carbon specific absorption during the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) 2003 field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
19. barnard_j_c_2008: Barnard, J. C., Volkamer, R., Kassianov, E. I., (2008). "Estimation of the mass absorption cross section of the organic carbon component of aerosols in the Mexico City Metropolitan Area." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
20. barraza-villarreal_a_2008: Barraza-Villarreal, A., Sunyer, J., Hernandez-Cadena, L., Escamilla-Nunez, M. C., Sienra-Monge, J. J., Ramirez-Aguilar, M., Cortez-Lugo, M., Holguin, F., Diaz-Sanchez, D., Olin, A. C., Romieu, I., (2008). "Air pollution, airway inflammation, and lung function in a cohort study of Mexico City schoolchildren." *Environmental Health Perspectives*.
21. barrera_v_a_2012: Barrera, V. A., Miranda, J., Espinosa, A. A., Meinguer, J., Martinez, J. N., Ceron, E., Morales, J. R., Miranda, P. A., Dias, J. F., (2012). "Contribution of Soil, Sulfate, and Biomass Burning Sources to the Elemental Composition of PM10 from Mexico City." *International Journal of Environmental Research*.
22. baumgardner_d_2007: Baumgardner, D., Kok, G. L., Raga, G. B., (2007). "On the diurnal variability of particle properties related to light absorbing carbon in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
23. baumgardner_d_2009: Baumgardner, D., Grutter, M., Allan, J., Ochoa, C., Rappenglueck, B., Russell, L. M., Arnott, P., (2009). "Physical and chemical properties of the regional mixed layer of Mexicos Megapolis." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
24. baumgardner_d_2012: Baumgardner, D., Varela, S., Escobedo, F. J., Chacalo, A., Ochoa, C., (2012). "The role of a peri-urban forest on air quality improvement in the Mexico City megalopolis." *Environmental Pollution*.
25. bei_n_2008: Bei, N., de Foy, B., Lei, W., Zavala, M., Molina, L. T., (2008). "Using 3DVAR data assimilation system to improve ozone simulations in the Mexico City basin." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
26. bei_n_2010: Bei, N., Lei, W., Zavala, M., Molina, L. T., (2010). "Ozone predictabilities due to meteorological uncertainties in the Mexico City basin using ensemble forecasts." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
27. bei_n_2012: Bei, N., Li, G., Molina, L. T., (2012). "Uncertainties in SOA simulations due to meteorological uncertainties in Mexico City during MILAGRO-2006 field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
28. bell_m_l_2011: Bell, M. L., Cifuentes, L. A., Davis, D. L., Cushing, E., Telles, A. G., Gouveia, N., (2011). "Environmental health indicators and a case study of air pollution in Latin American cities." Environmental Research.
29. bergstrom_r_w_2010: Bergstrom, R. W., Schmidt, K. S., Coddington, O., Pilewskie, P., Guan, H., Livingston, J. M., Redemann, J., Russell, P. B., (2010). "Aerosol spectral absorption in the Mexico City area: results from airborne measurements during MILAGRO/INTEX B." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
30. boeke_n_l_2011: Boeke, N. L., Marshall, J. D., Alvarez, S., Chance, K. V., Fried, A., Kurosu, T. P., Rappengluck, B., Richter, D., Walega, J., Weibring, P., Millet, D. B., (2011). "Formaldehyde columns from the Ozone Monitoring Instrument: Urban versus background levels and evaluation using aircraft data and a global model." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.
31. boersma_k_f_2008: Boersma, K. F., Jacob, D. J., Bucsela, E. J., Perring, A. E., Dirksen, R., van der A, R. J., Yantosca, R. M., Park, R. J., Wenig, M. O., Bertram, T. H., Cohen, R. C., (2008). "Validation of OMI tropospheric NO2 observations during INTEX-B and application to constrain NOx emissions over the eastern United States and Mexico." *Atmospheric Environment*.
32. bohlin_pernilla_2008: Bohlin, Pernilla, Jones, Kevin C., Tovalin, Horacio, Strandberg, Bo, (2008). "Observations on persistent organic pollutants in indoor and outdoor air using passive polyurethane foam samplers." *Atmospheric Environment*.
33. bon_d_m_2011: Bon, D. M., Ulbrich, I. M., de Gouw, J. A., Warneke, C., Kuster, W. C., Alexander, M. L., Baker, A., Beyersdorf, A. J., Blake, D., Fall, R., Jimenez, J. L., Herndon, S. C., Huey, L. G., Knighton, W. B., Ortega, J., Springston, S., Vargas, O., (2011). "Measurements of volatile organic

compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

34. butler_t_m_2012: Butler, T. M., Stock, Z. S., Russo, M. R., van der Gon, Hacd, Lawrence, M. G., (2012). "Megacity ozone air quality under four alternative future scenarios." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
35. caetano_e_2009: Caetano, E., (2009). "Identificacion de cuencas atmosfericas en Mexico." .
36. calderon-garciduenas_l_2013: Calderon-Garciduenas, L., Franco-Lira, M., Mora-Tiscarenno, A., Medina-Cortina, H., Torres-Jardon, R., Kavanaugh, M., (2013). "Early Alzheimers and Parkinsons Disease Pathology in Urban Children: Friend versus Foe Responses-It Is Time to Face the Evidence." Biomed Research International.
37. canagaratna_m_r_2007: Canagaratna, M. R., Jayne, J. T., Jimenez, J. L., Allan, J. D., Alfarra, M. R., Zhang, Q., Onasch, T. B., Drewnick, F., Coe, H., Middlebrook, A., Delia, A., Williams, L. R., Trimborn, A. M., Northway, M. J., DeCarlo, P. F., Kolb, C. E., Davidovits, P., Worsnop, D. R., (2007). "Chemical and microphysical characterization of ambient aerosols with the aerodyne aerosol mass spectrometer." Mass Spectrometry Reviews.
38. cappa_c_d_2010: Cappa, C. D., Jimenez, J. L., (2010). "Quantitative estimates of the volatility of ambient organic aerosol." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
39. carabali_g_2012: Carabali, G., Mamani-Paco, R., Castro, T., Peralta, O., Herrera, E., Trujillo, B., (2012). "Optical properties, morphology and elemental composition of atmospheric particles at T1 supersite on MILAGRO campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
40. carbajal-hernandez_j_j_2012: Carbajal-Hernandez, J. J., Sanchez-Fernandez, L. P., Carrasco-Ochoa, J. A., Martinez-Trinidad, J. F., (2012). "Assessment and prediction of air quality using fuzzy logic and autoregressive models." *Atmospheric Environment*.
41. cec__2009: CEC, (2009). "Comprehensive Assessment of North American Air Emissions Inventories and Ambient Air Monitoring Networks." .
42. christian_t_j_2010: Christian, T. J., Yokelson, R. J., Cardenas, B., Molina, L. T., Engling, G., Hsu, S. C., (2010). "Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
43. coddington_o_2008: Coddington, O., Schmidt, K. S., Pilewskie, P., Gore, W. J., Bergstrom, R. W., Roman, M., Redemann, J., Russell, P. B., Liu, J. C., Schaaf, C. C., (2008). "Aircraft measurements of spectral surface albedo and its consistency with ground-based and space-borne observations." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.
44. cofepris__2011: Cofepris, SMAGDF, SMAGEM, Semarnat, (2011). "Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico 2011-2020." .
45. corr_c_a_2009: Corr, C. A., Krotkov, N., Madronich, S., Slusser, J. R., Holben, B., Gao, W., Flynn, J., Lefer, B., Kreidenweis, S. M., (2009). "Retrieval of aerosol single scattering albedo at ultraviolet wavelengths at the T1 site during MILAGRO." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
46. crawford-brown_d_2012: Crawford-Brown, D., Barker, T., Anger, A., Dessens, O., (2012). "Ozone and PM related health co-benefits of climate change policies in Mexico." *Environmental Science & Policy*.
47. cross_e_s_2009: Cross, E. S., Onasch, T. B., Canagaratna, M., Jayne, J. T., Kimmel, J., Yu, X. Y., Alexander, M. L., Worsnop, D. R., Davidovits, P., (2009). "Single particle characterization using a light scattering module coupled to a time-of-flight aerosol mass spectrometer." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
48. crounse_j_d_2009: Crounse, J. D., DeCarlo, P. F., Blake, D. R., Emmons, L. K., Campos, T. L., Apel, E. C., Clarke, A. D., Weinheimer, A. J., McCabe, D. C., Yokelson, R. J., Jimenez, J. L., Wennberg, P. O., (2009). "Biomass burning and urban air pollution over the Central Mexican Plateau." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
49. davis_l_w_2008: Davis, L. W., (2008). "The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City." *Journal of Political Economy*.
50. de_almeida_castanho_a_d_2007: de Almeida Castanho, A. D., Prinn, R., Martins, V., Herold, M., Ichoku, C., Molina, L. T., (2007). "Analysis of Visible/SWIR surface reflectance ratios for aerosol retrievals from satellite in Mexico City urban area." *Atmos. Chem. Phys.*
51. de_bauer_m_d_2007: de Bauer, M. D., Hernandez-Tejeda, T., (2007). "A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico." *Environmental Pollution*.
52. de_foy_b_2005: de Foy, B., Caetano, E., Magana, V., Zitacuaro, A., Cardenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, L. T., Molina, M. J., (2005). "Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign." *Atmos. Chem. Phys.*
53. de_foy_b_2006: de Foy, B., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Satellite-derived land surface parameters for mesoscale modelling of the Mexico City basin." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
54. de_foy_b_2006b: de Foy, B., Varela, J. R., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

55. de_foy_b_2006c: de Foy, B., Clappier, A., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Distinct wind convergence patterns in the Mexico City basin due to the interaction of the gap winds with the synoptic flow." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

56. de_foy_b_2007: de Foy, B., Lei, W., Zavala, M., Volkamer, R., Samuelsson, J., Mellqvist, J., Galle, B., Martinez, A. P., Grutter, M., Retama, A., Molina, L. T., (2007). "Modelling constraints on the emission inventory and on vertical dispersion for CO and SO2 in the Mexico City Metropolitan Area using Solar FTIR and zenith sky UV spectroscopy." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

57. de_foy_b_2008: de Foy, B., Fast, J. D., Paech, S. J., Phillips, D., Walters, J. T., Coulter, R. L., Martin, T. J., Pekour, M. S., Shaw, W. J., Kastendeuch, P. P., Marley, N. A., Retama, A., Molina, L. T., (2008). "Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

58. de_foy_b_2009: de Foy, B., Zavala, M., Bei, N., Molina, L. T., (2009). "Evaluation of WRF mesoscale simulations and particle trajectory analysis for the MILAGRO field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

59. de_foy_b_2009b: de Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martinez, A. P., Ruiz-Suarez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M., Molina, L. T., (2009). "Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO2 retrievals during the MILAGRO field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

60. de_foy_b_2011: de Foy, B., Burton, S. P., Ferrare, R. A., Hostetler, C. A., Hair, J. W., Wiedinmyer, C., Molina, L. T., (2011). "Aerosol plume transport and transformation in high spectral resolution lidar measurements and WRF-Flexpart simulations during the MILAGRO Field Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

61. de_gouw_j_2007: de Gouw, J., Warneke, C., (2007). "Measurements of volatile organic compounds in the earths atmosphere using proton-transfer-reaction mass spectrometry." Mass Spectrometry Reviews.

62. de_gouw_j_2009: De Gouw, J., Jimenez, J. L., (2009). "Organic Aerosols in the Earths Atmosphere." *Environmental Science & Technology*.

63. de_gouw_j_a_2009: de Gouw, J. A., Welsh-Bon, D., Warneke, C., Kuster, W. C., Alexander, L., Baker, A. K., Beyersdorf, A. J., Blake, D. R., Canagaratna, M., Celada, A. T., Huey, L. G., Junkermann, W., Onasch, T. B., Salcido, A., Sjostedt, S. J., Sullivan, A. P., Tanner, D. J., Vargas, O., Weber, R. J., Worsnop, D. R., Yu, X. Y., Zaveri, R., (2009). "Emission and chemistry of organic carbon in the gas and aerosol phase at a sub-urban site near Mexico City in March 2006 during the MILAGRO study." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

64. decarlo_p_f_2008: DeCarlo, P. F., Dunlea, E. J., Kimmel, J. R., Aiken, A. C., Sueper, D., Crounse, J., Wennberg, P. O., Emmons, L., Shinozuka, Y., Clarke, A., Zhou, J., Tomlinson, J., Collins, D. R., Knapp, D., Weinheimer, A. J., Montzka, D. D., Campos, T., Jimenez, J. L., (2008). "Fast airborne aerosol size and chemistry measurements above Mexico City and Central Mexico during the MILAGRO campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

65. decarlo_p_f_2010: DeCarlo, P. F., Ulbrich, I. M., Crounse, J., de Foy, B., Dunlea, E. J., Aiken, A. C., Knapp, D., Weinheimer, A. J., Campos, T., Wennberg, P. O., Jimenez, J. L., (2010). "Investigation of the sources and processing of organic aerosol over the Central Mexican Plateau from aircraft measurements during MILAGRO." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

66. deng_t_2011: Deng, T., Nelson, J. D., (2011). "Recent Developments in Bus Rapid Transit: A Review of the Literature." Transport Reviews.

67. diaz-nigenda_e_2010: Diaz-Nigenda, E., Tatarko, J., Jazcilevich, A. D., Garcia, A. R., Caetano, E., Ruiz-Suarez, L. G., (2010). "A modeling study of Aeolian erosion enhanced by surface wind confluences over Mexico City." Aeolian Research.

68. diaz_r_v_2014: Diaz, R. V., Lopez-Monroy, J., Miranda, J., Espinosa, A. A., (2014). "PIXE and XRF analysis of atmospheric aerosols from a site in the West area of Mexico City." Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms.

69. doran_j_c_2000: Doran, J. C., Zhong, S., (2000). "Thermally driven gap winds into the Mexico City basin." *Journal of Applied Meteorology*.

70. doran_j_c_2007: Doran, J. C., Barnard, J. C., Arnott, W. P., Cary, R., Coulter, R., Fast, J. D., Kassianov, E. I., Kleinman, L., Laulainen, N. S., Martin, T., Paredes-Miranda, G., Pekour, M. S., Shaw, W. J., Smith, D. F., Springston, S. R., Yu, X. Y., (2007). "The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

71. doran_j_c_2008: Doran, J. C., Fast, J. D., Barnard, J. C., Laskin, A., Desyaterik, Y., Gilles, M. K., (2008). "Applications of lagrangian dispersion modeling to the analysis of changes in the specific absorption of elemental carbon." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

72. dunlea_e_j_2006: Dunlea, E. J., Herndon, S. C., Nelson, D. D., Volkamer, R. M., Lamb, B. K., Allwine, E. J., Grutter, M., Ramos Villegas, C. R., Marquez, C., Blanco, S., Cardenas, B., Kolb, C. E., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Technical note: Evaluation of standard ultraviolet absorption ozone monitors in a polluted urban environment." *Atmos. Chem. Phys.*

73. dunlea_e_j_2007: Dunlea, E. J., Herndon, S. C., Nelson, D. D., Volkamer, R. M., San Martini, F., Sheehy, P. M., Zahniser, M. S., Shorter, J. H., Wormhoudt, J. C., Lamb, B. K., Allwine, E. J., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Grutter, M., Marquez, C., Blanco, S., Cardenas, B., Retama, A., Villegas, C. R. R., Kolb, C. E., Molina, L. T., Molina, M. J., (2007). "Evaluation of nitrogen dioxide chemiluminescence monitors in a polluted urban environment." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

74. dunn_m_j_2004: Dunn, M. J., Jimenez, J. L., Baumgardner, D., Castro, T., McMurry, P. H., Smith, J. N., (2004). "Measurements of Mexico City nanoparticle size distributions: Observations of new particle formation and growth." *Geophysical Research Letters*.

75. dusanter_s_2009: Dusanter, S., Vimal, D., Stevens, P. S., Volkamer, R., Molina, L. T., Baker, A., Meinardi, S., Blake, D., Sheehy, P., Merten, A., Zhang, R., Zheng, J., Fortner, E. C., Junkermann, W., Dubey, M., Rahn, T., Eichinger, B., Lewandowski, P., Prueger, J., Holder, H., (2009). "Measurements of OH and HO2 concentrations during the MCMA-2006 field campaign-Part 2: Model comparison and radical budget." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

76. dusanter_s_2009b: Dusanter, S., Vimal, D., Stevens, P. S., Volkamer, R., Molina, L. T., (2009). "Measurements of OH and HO2 concentrations during the MCMA-2006 field campaign-Part 1: Deployment of the Indiana University laser-induced fluorescence instrument." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

77. dzepina_k_2007: Dzepina, K., Arey, J., Marr, L. C., Worsnop, D. R., Salcedo, D., Zhang, Q., Onasch, T. B., Molina, L. T., Molina, M. J., Jimenez, J. L., (2007). "Detection of particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons in Mexico City using an aerosol mass spectrometer." *International Journal of Mass Spectrometry*.

78. dzepina_k_2009: Dzepina, K., Volkamer, R. M., Madronich, S., Tulet, P., Ulbrich, I. M., Zhang, Q., Cappa, C. D., Ziemann, P. J., Jimenez, J. L., (2009). "Evaluation of recently-proposed secondary organic aerosol models for a case study in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

79. dzepina_k_2011: Dzepina, K., Cappa, C. D., Volkamer, R. M., Madronich, S., DeCarlo, P. F., Zaveri, R. A., Jimenez, J. L., (2011). "Modeling the Multiday Evolution and Aging of Secondary Organic Aerosol During MILAGRO 2006." *Environmental Science & Technology*.

80. eibenschutz_r_2010: Eibenschutz, R., (2010). "La Zona Metropolitana del Valle de Mexico: Los retos de la Megalopolis." .

81. emmons_l_k_2010: Emmons, L. K., Apel, E. C., Lamarque, J. F., Hess, P. G., Avery, M., Blake, D., Brune, W., Campos, T., Crawford, J., DeCarlo, P. F., Hall, S., Heikes, B., Holloway, J., Jimenez, J. L., Knapp, D. J., Kok, G., Mena-Carrasco, M., Olson, J., OSullivan, D., Sachse, G., Walega, J., Weibring, P., Weinheimer, A., Wiedinmyer, C., (2010). "Impact of Mexico City emissions on regional air quality from MOZART-4 simulations." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

82. ervens_b_2010: Ervens, B., Cubison, M. J., Andrews, E., Feingold, G., Ogren, J. A., Jimenez, J. L., Quinn, P. K., Bates, T. S., Wang, J., Zhang, Q., Coe, H., Flynn, M., Allan, J. D., (2010). "CCN predictions using simplified assumptions of organic aerosol composition and mixing state: a synthesis from six different locations." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

83. espinosa_a_a_2013: Espinosa, A. A., Miranda, J., (2013). "Elemental Analysis of Soils as Possible Resuspended Dust Sources in Mexico City." *International Journal of Environmental Research*.

84. fast_j_2009: Fast, J., Aiken, A. C., Allan, J., Alexander, L., Campos, T., Canagaratna, M. R., Chapman, E., DeCarlo, P. F., de Foy, B., Gaffney, J., de Gouw, J., Doran, J. C., Emmons, L., Hodzic, A., Herndon, S. C., Huey, G., Jayne, J. T., Jimenez, J. L., Kleinman, L., Kuster, W., Marley, N., Russell, L., Ochoa, C., Onasch, T. B., Pekour, M., Song, C., Ulbrich, I. M., Warneke, C., Welsh-Bon, D., Wiedinmyer, C., Worsnop, D. R., Yu, X. Y., Zaveri, R., (2009). "Evaluating simulated primary anthropogenic and biomass burning organic aerosols during MILAGRO: implications for assessing treatments of secondary organic aerosols." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

85. fast_j_d_1998: Fast, J. D., Zhong, S. Y., (1998). "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.

86. fast_j_d_2007: Fast, J. D., de Foy, B., Rosas, F. A., Caetano, E., Carmichael, G., Emmons, L., McKenna, D., Mena, M., Skamarock, W., Tie, X., Coulter, R. L., Barnard, J. C., Wiedinmyer, C., Madronich, S., (2007). "A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

87. fortner_e_c_2009: Fortner, E. C., Zheng, J., Zhang, R., Knighton, W. B., Volkamer, R. M., Sheehy, P., Molina, L., Andre, M., (2009). "Measurements of Volatile Organic Compounds Using Proton Transfer Reaction-Mass Spectrometry during the MILAGRO 2006 Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

88. fountoukis_c_2009: Fountoukis, C., Nenes, A., Sullivan, A., Weber, R., Van Reken, T., Fischer, M., Matias, E., Moya, M., Farmer, D., Cohen, R. C., (2009). "Thermodynamic characterization of Mexico City aerosol during MILAGRO 2006." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

89. fried_a_2011: Fried, A., Cantrell, C., Olson, J., Crawford, J. H., Weibring, P., Walega, J., Richter, D., Junkermann, W., Volkamer, R., Sinreich, R., Heikes, B. G., OSullivan, D., Blake, D. R., Blake, N., Meinardi, S., Apel, E., Weinheimer, A., Knapp, D., Perring, A., Cohen, R. C., Fuelberg, H., Shetter, R.

E., Hall, S. R., Ullmann, K., Brune, W. H., Mao, J., Ren, X., Huey, L. G., Singh, H. B., Hair, J. W., Riemer, D., Diskin, G., Sachse, G., (2011). "Detailed comparisons of airborne formaldehyde measurements with box models during the 2006 INTEX-B and MILAGRO campaigns: potential evidence for significant impacts of unmeasured and multi-generation volatile organic carbon compounds." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

90. gallego_f_2013: Gallego, F., Montero, J. P., Salas, C., (2013). "The effect of transport policies on car use: Evidence from Latin American cities." *Journal of Public Economics*.
91. garcia-escalante_j_s_2014: Garcia-Escalante, J. S., Garcia-Reynoso J. A., Jazcilevich-Diamant A., Ruiz-Suarez L. G., (2014). "The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the Mexico City Metropolitan Area." *Atmósfera*.
92. garcia-reynoso_a_2009: Garcia-Reynoso, A., Jazcilevich, A., Ruiz-Suarez, L. G., Torres-Jardon, R., Lastra, M. S., Juarez, N. A. R., (2009). "Ozone weekend effect analysis in Mexico City." *Atmósfera*.
93. garcia-reynoso_j_a_2007: Garcia-Reynoso, J. A., Grutter, M., Cintora-Juarez, D., (2007). "Risk assessment for criteria pollutants and formaldehyde in Mexico City." *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*.
94. garcia_a_r_2006: Garcia, A. R., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., Samuelson, J., Mellqvist, J., Galle, B., Herndon, S. C., Kolb, C. E., (2006). "Separation of emitted and photochemical formaldehyde in Mexico City using a statistical analysis and a new pair of gas-phase tracers." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
95. garcia_a_z_2009: Garcia, A. Z., Coyotzin, C. M., Amaro, A. R., Veneroni, D. L., Martinez, L. C., Iglesias, G. S., (2009). "Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant Tillandsia recurvata L." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
96. garcia_reynoso_j_a_2009: Garcia Reynoso, J. A., Ruiz Suarez, L.G., Garcia Escalante, S., Resendiz Juarez, N.A., (2009). "Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosfericas: metodologia y estudio de caso."
97. gilardoni_s_2009: Gilardoni, S., Liu, S., Takahama, S., Russell, L. M., Allan, J. D., Steinbrecher, R., Jimenez, J. L., De Carlo, P. F., Dunlea, E. J., Baumgardner, D., (2009). "Characterization of organic ambient aerosol during MIRAGE 2006 on three platforms." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
98. greenberg_j_r_2009: Greenberg, J. R., Guenther, A. B., Turnipseed, A., (2009). "Tethered balloon-based soundings of ozone, aerosols, and solar radiation near Mexico City during MIRAGE-MEX." *Atmospheric Environment*.
99. grutter_m_2005: Grutter, M., Flores, E., Andraca-Ayala, G., Baez, A., (2005). "Formaldehyde levels in downtown Mexico City during 2003." *Atmospheric Environment*.
100. grutter_m_2008: Grutter, M., Basaldud, R., Rivera, C., Harig, R., Junkerman, W., Caetano, E., Delgado-Granados, H., (2008). "SO2 emissions from Popocatepetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
101. gustafson_w_i_2011: Gustafson, W. I., Qian, Y., Fast, J. D., (2011). "Downscaling aerosols and the impact of neglected subgrid processes on direct aerosol radiative forcing for a representative global climate model grid spacing." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.
102. gutierrez_e_2010: Gutierrez, E., (2010). "Using satellite imagery to measure the relationship between air quality and infant mortality: an empirical study for Mexico." *Population and Environment*.
103. heald_c_l_2008: Heald, C. L., Goldstein, A. H., Allan, J. D., Aiken, A. C., Apel, E., Atlas, E. L., Baker, A. K., Bates, T. S., Beyersdorf, A. J., Blake, D. R., Campos, T., Coe, H., Crounse, J. D., DeCarlo, P. F., de Gouw, J. A., Dunlea, E. J., Flocke, F. M., Fried, A., Goldan, P., Griffin, R. J., Herndon, S. C., Holloway, J. S., Holzinger, R., Jimenez, J. L., Junkermann, W., Kuster, W. C., Lewis, A. C., Meinardi, S., Millet, D. B., Onasch, T., Polidori, A., Quinn, P. K., Riemer, D. D., Roberts, J. M., Salcedo, D., Sive, B., Swanson, A. L., Talbot, R., Warneke, C., Weber, R. J., Weibring, P., Wennberg, P. O., Worsnop, D. R., Wittig, A. E., Zhang, R., Zheng, J., Zheng, W., (2008). "Total observed organic carbon (TOOC) in the atmosphere: a synthesis of North American observations." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
104. heald_c_l_2010: Heald, C. L., Kroll, J. H., Jimenez, J. L., Docherty, K. S., DeCarlo, P. F., Aiken, A. C., Chen, Q., Martin, S. T., Farmer, D. K., Artaxo, P., (2010). "A simplified description of the evolution of organic aerosol composition in the atmosphere." *Geophysical Research Letters*.
105. hennigan_c_j_2008: Hennigan, C. J., Sullivan, A. P., Fountoukis, C. I., Nenes, A., Hecobian, A., Vargas, O., Peltier, R. E., Hanks, A. T. C., Huey, L. G., Lefer, B. L., Russell, A. G., Weber, R. J., (2008). "On the volatility and production mechanisms of newly formed nitrate and water soluble organic aerosol in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.
106. herndon_s_c_2005: Herndon, S. C., Jayne, J. T., Zahniser, M. S., Worsnop, D. R., Knighton, B., Alwine, E., Lamb, B. K., Zavala, M., Nelson, D. D., McManus, J. B., Shorter, J. H., Canagaratna, M. R., Onasch, T. B., Kolb, C. E., (2005). "Characterization of urban pollutant emission fluxes and ambient concentration distributions using a mobile laboratory with rapid response instrumentation." Faraday Discussions.

107. herndon_s_c_2008: Herndon, S. C., Onasch, T. B., Wood, E. C., Kroll, J. H., Canagaratna, M. R., Jayne, J. T., Zavala, M. A., Knighton, W. B., Mazzoleni, C., Dubey, M. K., Ulbrich, I. M., Jimenez, J. L., Seila, R., de Gouw, J. A., de Foy, B., Fast, J., Molina, L. T., Kolb, C. E., Worsnop, D. R., (2008). "Correlation of secondary organic aerosol with odd oxygen in Mexico City." *Geophysical Research Letters*.

108. hodzic_a_2009: Hodzic, A., Jimenez, J. L., Madronich, S., Aiken, A. C., Bessagnet, B., Curci, G., Fast, J., Lamarque, J. F., Onasch, T. B., Roux, G., Schauer, J. J., Stone, E. A., Ulbrich, I. M., (2009). "Modeling organic aerosols during MILAGRO: importance of biogenic secondary organic aerosols." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

109. hodzic_a_2010: Hodzic, A., Jimenez, J. L., Madronich, S., Canagaratna, M. R., DeCarlo, P. F., Kleinman, L., Fast, J., (2010). "Modeling organic aerosols in a megacity: potential contribution of semi-volatile and intermediate volatility primary organic compounds to secondary organic aerosol formation." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

110. hodzic_a_2010b: Hodzic, A., Jimenez, J. L., Prevot, A. S. H., Szidat, S., Fast, J. D., Madronich, S., (2010). "Can 3-D models explain the observed fractions of fossil and non-fossil carbon in and near Mexico City?." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

111. hodzic_a_2011: Hodzic, A., Jimenez, J. L., (2011). "Modeling anthropogenically controlled secondary organic aerosols in a megacity: a simplified framework for global and climate models." Geoscientific Model Development.

112. hodzic_a_2012: Hodzic, A., Wiedinmyer, C., Salcedo, D., Jimenez, J. L., (2012). "Impact of Trash Burning on Air Quality in Mexico City." *Environmental Science & Technology*.

113. hudson_r_2006: Hudson, R., Arriola, A., Martinez-Gomez, M., Distel, H., (2006). "Effect of air pollution on olfactory function in residents of mexico city." Chem. Senses.

114. huffman_j_a_2008: Huffman, J. A., Ziemann, P. J., Jayne, J. T., Worsnop, D. R., Jimenez, J. L., (2008). "Development and characterization of a fast-stepping/scanning thermodenuder for chemically-resolved aerosol volatility measurements." Aerosol Science and Technology.

115. huffman_j_a_2009: Huffman, J. A., Docherty, K. S., Aiken, A. C., Cubison, M. J., Ulbrich, I. M., DeCarlo, P. F., Sueper, D., Jayne, J. T., Worsnop, D. R., Ziemann, P. J., Jimenez, J. L., (2009). "Chemically-resolved aerosol volatility measurements from two megacity field studies." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

116. huffman_j_a_2009b: Huffman, J. A., Docherty, K. S., Mohr, C., Cubison, M. J., Ulbrich, I. M., Ziemann, P. J., Onasch, T. B., Jimenez, J. L., (2009). "Chemically-Resolved Volatility Measurements of Organic Aerosol from Different Sources." *Environmental Science & Technology*.

117. iniestra_r_2008: Iniestra, R., (2008). "Modelacion de cuencas atmosfericas como herramienta para la gestion de la calidad del aire." .

118. janssen_n_a_h_2011: Janssen, N. A. H., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., van Bree, L., ten Brink, H., Keuken, M., Atkinson, R. W., Anderson, H. R., Brunekreef, B., Cassee, F. R., (2011). "Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM10 and PM2.5." *Environmental Health Perspectives*.

119. jauregui_e_1996: Jauregui, E., Romales, E., (1996). "Urban effects on convective precipitation in Mexico city." *Atmospheric Environment*.

120. jauregui_e_1997: Jauregui, E., (1997). "Heat island development in Mexico City." *Atmospheric Environment*.

121. jauregui_e_1997b: Jauregui, E., Tejeda, A., (1997). "Urban-rural humidity contrasts in Mexico City." *International Journal of Climatology*.

122. jauregui_e_1999: Jauregui, E., Luyando, E., (1999). "Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City." *International Journal of Climatology*.

123. jazcilevich_a_2000: Jazcilevich, A., Fuentes, V., Jauregui, E., Luna, E., (2000). "Simulated urban climate response to historical land use modification in the Basin of Mexico." *Climatic Change*.

124. jazcilevich_a_2012: Jazcilevich, A., Wellens, A., Siebe, C., Rosas, I., Bornstein, R. D., Riojas-Rodriguez, H., (2012). "Application of a stochastic vehicular wake erosion model to determine PM2.5 exposure." Aeolian Research.

125. jazcilevich_a_d_2003: Jazcilevich, A. D., Garcia, A. R., Ruiz-Suarez, L. G., (2003). "A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico." *Atmospheric Environment*.

126. jazcilevich_a_d_2005: Jazcilevich, A. D., Garcia, A. R., Caetano, E., (2005). "Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico." *Atmospheric Environment*.

127. jazcilevich_a_d_2007: Jazcilevich, A. D., Garcia-Fragoso, A., Reynoso, A. G., Grutter, M., Diego-Ayala, U., Lents, J., Davis, N., (2007). "A vehicle emissions system using a car simulator and a geographical information system: Part 1- System description and testing." *Journal of the Air & Waste Management Association*.

128. jazcilevich_a_d_2011: Jazcilevich, A. D., Reynoso, A. G., Grutter, M., Delgado, J., Ayala, U. D., Lastra, M. S., Zuk, M., Oropeza, R. G., Lents, J., Davis, N., (2011). "An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City." *Journal of Power Sources*.

129. jiang_m_2005: Jiang, M., Marr, L. C., Dunlea, E. J., Herndon, S. C., Jayne, J. T., Kolb, C. E., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Zavala, M., Molina, L. T., Molina, M. J., (2005). "Vehicle fleet emissions of black carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other pollutants measured by a mobile laboratory in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

130. jimenez-garza_o_2012: Jimenez-Garza, O., Marquez-Gamino, S., Albores, A., Caudillo-Cisneros, C., Carrieri, M., Bartolucci, G. B., Manno, M., (2012). "CYP2E1 phenotype in Mexican workers occupationally exposed to low levels of toluene." *Toxicology Letters*.

131. jimenez_j_l_2009: Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Donahue, N. M., Prevot, A. S. H., Zhang, Q., Kroll, J. H., DeCarlo, P. F., Allan, J. D., Coe, H., Ng, N. L., Aiken, A. C., Docherty, K. S., Ulbrich, I. M., Grieshop, A. P., Robinson, A. L., Duplissy, J., Smith, J. D., Wilson, K. R., Lanz, V. A., Hueglin, C., Sun, Y. L., Tian, J., Laaksonen, A., Raatikainen, T., Rautiainen, J., Vaattovaara, P., Ehn, M., Kulmala, M., Tomlinson, J. M., Collins, D. R., Cubison, M. J., Dunlea, E. J., Huffman, J. A., Onasch, T. B., Alfarra, M. R., Williams, P. I., Bower, K., Kondo, Y., Schneider, J., Drewnick, F., Borrmann, S., Weimer, S., Demerjian, K., Salcedo, D., Cottrell, L., Griffin, R., Takami, A., Miyoshi, T., Hatakeyama, S., Shimono, A., Sun, J. Y., Zhang, Y. M., Dzepina, K., Kimmel, J. R., Sueper, D., Jayne, J. T., Herndon, S. C., Trimborn, A. M., Williams, L. R., Wood, E. C., Middlebrook, A. M., Kolb, C. E., Baltensperger, U., Worsnop, D. R., (2009). "Evolution of Organic Aerosols in the Atmosphere." Science.

132. jobson_b_t_2010: Jobson, B. T., Volkamer, R. A., Velasco, E., Allwine, G., Westberg, H., Lamb, B. K., Alexander, M. L., Berkowitz, C. M., Molina, L. T., (2010). "Comparison of aromatic hydrocarbon measurements made by PTR-MS, DOAS and GC-FID during the MCMA 2003 Field Experiment." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

133. johansson_m_2009: Johansson, M., Rivera, C., de Foy, B., Lei, W., Song, J., Zhang, Y., Galle, B., Molina, L., (2009). "Mobile mini-DOAS measurement of the outflow of NO2 and HCHO from Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

134. johnson_k_s_2005: Johnson, K. S., Zuberi, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Iedema, M. J., Cowin, J. P., Gaspar, D. J., Wang, C., Laskin, A., (2005). "Processing of soot in an urban environment: case study from the Mexico City Metropolitan Area." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

135. johnson_k_s_2006: Johnson, K. S., de Foy, B., Zuberi, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Xie, Y., Laskin, A., Shutthanandan, V., (2006). "Aerosol composition and source apportionment in the Mexico City Metropolitan Area with PIXE/PESA/STIM and multivariate analysis." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

136. johnson_k_s_2008: Johnson, K. S., Laskin, A., Jimenez, J. L., Shutthanandan, V., Molina, L. T., Salcedo, D., Dzepina, K., Molina, M. J., (2008). "Comparative analysis of urban atmospheric aerosol by particle-induced X-ray emission (PIXE), proton elastic scattering analysis (PESA), and aerosol mass spectrometry (AMS)." *Environmental Science & Technology*.

137. jolleys_m_d_2012: Jolleys, M. D., Coe, H., McFiggans, G., Capes, G., Allan, J. D., Crosier, J., Williams, P. I., Allen, G., Bower, K. N., Jimenez, J. L., Russell, L. M., Grutter, M., Baumgardner, D., (2012). "Characterizing the Aging of Biomass Burning Organic Aerosol by Use of Mixing Ratios: A Meta-analysis of Four Regions." *Environmental Science & Technology*.

138. juarez_a_2005: Juarez, A., Gay, C., Flores, Y., (2005). "Impact of the Popocatepetls volcanic activity on the air quality of Puebla City, Mexico." *Atmósfera*.

139. karl_t_2009: Karl, T., Apel, E., Hodzic, A., Riemer, D. D., Blake, D. R., Wiedinmyer, C., (2009). "Emissions of volatile organic compounds inferred from airborne flux measurements over a megacity." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

140. karydis_v_a_2010: Karydis, V. A., Tsimpidi, A. P., Fountoukis, C., Nenes, A., Zavala, M., Lei, W. F., Molina, L. T., Pandis, S. N., (2010). "Simulating the fine and coarse inorganic particulate matter concentrations in a polluted megacity." *Atmospheric Environment*.

141. karydis_v_a_2011: Karydis, V. A., Tsimpidi, A. P., Lei, W., Molina, L. T., Pandis, S. N., (2011). "Formation of semivolatile inorganic aerosols in the Mexico City Metropolitan Area during the MILAGRO campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

142. kleinman_l_i_2008: Kleinman, L. I., Springston, S. R., Daum, P. H., Lee, Y. N., Nunnermacker, L. J., Senum, G. I., Wang, J., Weinstein-Lloyd, J., Alexander, M. L., Hubbe, J., Ortega, J., Canagaratna, M. R., Jayne, J., (2008). "The time evolution of aerosol composition over the Mexico City plateau." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

143. kleinman_l_i_2009: Kleinman, L. I., Springston, S. R., Wang, J., Daum, P. H., Lee, Y. N., Nunnermacker, L. J., Senum, G. I., Weinstein-Lloyd, J., Alexander, M. L., Hubbe, J., Ortega, J., Zaveri, R. A., Canagaratna, M. R., Jayne, J., (2009). "The time evolution of aerosol size distribution over the Mexico City plateau." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

144. knobelspiesse_k_2011: Knobelspiesse, K., Cairns, B., Redemann, J., Bergstrom, R. W., Stohl, A., (2011). "Simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties during the MILAGRO field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

145. kolb_c_e_2004: Kolb, C. E., Herndon, S. C., McManus, B., Shorter, J. H., Zahniser, M. S., Nelson, D. D., Jayne, J. T., Canagaratna, M. R., Worsnop, D. R., (2004). "Mobile laboratory with rapid response instruments for real-time measurements of urban and regional trace gas and particulate distributions and emission source characteristics." *Environmental Science & Technology*.

146. labrada-delgado_g_2012: Labrada-Delgado, G., Aragon-Pina, A., Campos-Ramos, A., Castro-Romero, T., Amador-Munoz, O., Villalobos-Pietrini, R., (2012). "Chemical and morphological characterization of PM2.5 collected during MILAGRO campaign using scanning electron microscopy." Atmospheric Pollution Research.

147. lance_s_2013: Lance, S., Raatikainen, T., Onasch, T. B., Worsnop, D. R., Yu, X. Y., Alexander, M. L., Stolzenburg, M. R., McMurry, P. H., Smith, J. N., Nenes, A., (2013). "Aerosol mixing state, hygroscopic growth and cloud activation efficiency during MIRAGE 2006." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

148. lee-taylor_j_2011: Lee-Taylor, J., Madronich, S., Aumont, B., Baker, A., Camredon, M., Hodzic, A., Tyndall, G. S., Apel, E., Zaveri, R. A., (2011). "Explicit modeling of organic chemistry and secondary organic aerosol partitioning for Mexico City and its outflow plume." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

149. lei_w_2007: Lei, W., de Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., Molina, L. T., (2007). "Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

150. lei_w_2008: Lei, W., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., (2008). "Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

151. lei_w_2009: Lei, W., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, M. J., Molina, L. T., (2009). "Impact of primary formaldehyde on air pollution in the Mexico City Metropolitan Area." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

152. lei_w_2013: Lei, W., Li, G., Molina, L. T., (2013). "Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

153. lewandowski_p_a_2010: Lewandowski, P. A., Eichinger, W. E., Holder, H., Prueger, J., Wang, J., Kleinman, L. I., (2010). "Vertical distribution of aerosols in the vicinity of Mexico City during MILAGRO-2006 Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

154. li_g_2010: Li, G., Lei, W., Zavala, M., Volkamer, R., Dusanter, S., Stevens, P., Molina, L. T., (2010). "Impacts of HONO sources on the photochemistry in Mexico City during the MCMA-2006/MILAGO Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

155. li_g_2011: Li, G., Bei, N., Tie, X., Molina, L. T., (2011). "Aerosol effects on the photochemistry in Mexico City during MCMA-2006/MILAGRO campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

156. li_g_2011b: Li, G., Zavala, M., Lei, W., Tsimpidi, A. P., Karydis, V. A., Pandis, S. N., Canagaratna, M. R., Molina, L. T., (2011). "Simulations of organic aerosol concentrations in Mexico City using the WRF-CHEM model during the MCMA-2006/MILAGRO campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

157. li_g_2012: Li, G., Lei, W., Bei, N., Molina, L. T., (2012). "Contribution of garbage burning to chloride and PM2.5 in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

158. liu_s_2009: Liu, S., Takahama, S., Russell, L. M., Gilardoni, S., Baumgardner, D., (2009). "Oxygenated organic functional groups and their sources in single and submicron organic particles in MILAGRO 2006 campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

159. livingston_j_m_2009: Livingston, J. M., Redemann, J., Russell, P. B., Torres, O., Veihelmann, B., Veefkind, P., Braak, R., Smirnov, A., Remer, L., Bergstrom, R. W., Coddington, O., Schmidt, K. S., Pilewskie, P., Johnson, R., Zhang, Q., (2009). "Comparison of aerosol optical depths from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) on Aura with results from airborne sunphotometry, other space and ground measurements during MILAGRO/INTEX-B." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

160. marley_n_a_2004: Marley, N. A., Gaffney, Jeffrey S., White, Robert V., Rodriguez-Cuadra, Luis, Herndon, Scott E., Dunlea, Ed, Volkamer, Rainer M., Molina, Luisa T., Molina, Mario J., (2004). "Fast gas chromatography with luminol chemiluminescence detection for the simultaneous determination of nitrogen dioxide and peroxyacetyl nitrate in the atmosphere." Review of Scientific Instruments.

161. marley_n_a_2007: Marley, N. A., Gaffney, J. S., Ramos-Villegas, R., Gonzalez, B. C., (2007). "Comparison of measurements of peroxyacyl nitrates and primary carbonaceous aerosol concentrations in Mexico City determined in 1997 and 2003." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

162. marley_n_a_2009: Marley, N. A., Gaffney, J. S., Castro, T., Salcido, A., Frederick, J., (2009). "Measurements of aerosol absorption and scattering in the Mexico City Metropolitan Area during the MILAGRO field campaign: a comparison of results from the T0 and T1 sites." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

163. marley_n_a_2009b: Marley, N. A., Gaffney, J. S., Tackett, M., Sturchio, N. C., Heraty, L., Martinez, N., Hardy, K. D., Marchany-Rivera, A., Guilderson, T., MacMillan, A., Steelman, K., (2009). "The impact of biogenic carbon sources on aerosol absorption in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

164. marquez_c_2005: Marquez, C., Castro, T., Muhlia, A., Moya, M., Martinez-Arroyo, A., Baez, A., (2005). "Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba National Park, and its relationship to air pollution transport." *Atmospheric Environment*.

165. marr_l_c_2004: Marr, L. C., Grogan, L. A., Wohrnschimmel, H., Molina, L. T., Molina, M. J., Smith, T. J., Garshick, E., (2004). "Vehicle traffic as a source of particulate polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in the Mexico City metropolitan area." *Environmental Science & Technology*.

166. marr_l_c_2006: Marr, L. C., Dzepina, K., Jimenez, J. L., Reisen, F., Bethel, H. L., Arey, J., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Sources and transformations of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

167. martinez-carrillo_m_a_2010: Martinez-Carrillo, M. A., Solis, C., Isaac-Olive, K., Andrade, E., Beltran-Hernandez, R. I., Martinez-Resendiz, G., Ramirez-Reyes, A., Rivera, C. I. C., Lucho-Constantino, C. A., (2010). "Atmospheric elemental concentration determined by Particle-Induced X-ray Emission at Tlaxcoapan in central Mexico, and its relation to Tula industrial-corridor emissions." *Microchemical Journal*.

168. martinez-carrillo_m_a_2010b: Martinez-Carrillo, M. A., Solis, C., Andrade, E., Isaac-Olive, K., Beltran-Hernandez, R. I., Moreno, S. A. M., Martinez-Resendiz, G., Reyes, A. R., Lucho-Constantino, C. A., Del Razo, L. M., (2010). "Aerosol composition from Tlaxcoapan, Hidalgo in central Mexico." *Revista Mexicana de Física*.

169. martinez-carrillo_m_a_2010c: Martinez-Carrillo, M. A., Solis, C., Andrade, E., Isaac-Olive, K., Rocha, M., Murillo, G., Beltran-Hernandez, R. I., Lucho-Constantino, C. A., (2010). "PIXE analysis of Tillandsia usneoides for air pollution studies at an industrial zone in Central Mexico." *Microchemical Journal*.

170. martinez-carrillo_m_a_2011: Martinez-Carrillo, M. A., Solis, C., Andrade, E., Beltran-Hernandez, R. I., Isaac-Olive, K., Lucho-Constantino, C. A., Reyes, M. C. L., Longoria, L. C., (2011). "Atmospheric Pollution in the Tula Industrial Corridor studied using a biomonitor and nuclear analytical techniques." *Revista Mexicana de Física*.

171. massie_s_t_2006: Massie, S. T., Gille, J. C., Edwards, D. P., Nandi, S., (2006). "Satellite observations of aerosol and CO over Mexico city." *Atmospheric Environment*.

172. mejia-dugand_s_2013: Mejia-Dugand, S., Hjelm, O., Baas, L., Rios, R. A., (2013). "Lessons from the spread of Bus Rapid Transit in Latin America." *Journal of Cleaner Production*.

173. melamed_m_l_2009: Melamed, M. L., Basaldud, R., Steinbrecher, R., Emeis, S., Ruiz-Suarez, L. G., Grutter, M., (2009). "Detection of pollution transport events southeast of Mexico City using ground-based visible spectroscopy measurements of nitrogen dioxide." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

174. melgar-paniagua_e_m_2010: Melgar-Paniagua, E. M., Vega, E., Del Razo, L. M., Lucho-Constantino, C. A., Rothenberg, S. L., De Vizcaya-Ruiz, A., (2010). "Health impacts of population exposed to atmospheric emissions in an industrial region of Mexico." *Toxicology Letters*.

175. melgar-paniagua_e_m_2013: Melgar-Paniagua, E. M., Vega-Rangel, E., Del Razo, L. M., Lucho-Constantino, C. A., Rothenberg, S. J., De Vizcaya-Ruiz, A., (2013). "Distributed lag associations between respiratory illnesses and mortality with suspended particle concentration in Tula, a highly polluted industrial region in Central Mexico." International Archives of Occupational and Environmental Health.

176. mena-carrasco_m_2009: Mena-Carrasco, M., Carmichael, G. R., Campbell, J. E., Zimmerman, D., Tang, Y., Adhikary, B., DAllura, A., Molina, L. T., Zavala, M., Garcia, A., Flocke, F., Campos, T., Weinheimer, A. J., Shetter, R., Apel, E., Montzka, D. D., Knapp, D. J., Zheng, W., (2009). "Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

177. moffet_r_c_2008: Moffet, R. C., Desyaterik, Y., Hopkins, R. J., Tivanski, A. V., Gilles, M. K., Wang, Y., Shutthanandan, V., Molina, L. T., Abraham, R. G., Johnson, K. S., Mugica, V., Molina, M. J., Laskin, A., Prather, K. A., (2008). "Characterization of aerosols containing Zn, Pb, and Cl from an industrial region of Mexico City." *Environmental Science & Technology*.

178. moffet_r_c_2008b: Moffet, R. C., de Foy, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Prather, K. A., (2008). "Measurement of ambient aerosols in northern Mexico City by single particle mass spectrometry." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

179. moffet_r_c_2010: Moffet, R. C., Henn, T. R., Tivanski, A. V., Hopkins, R. J., Desyaterik, Y., Kilcoyne, A. L. D., Tyliszczak, T., Fast, J., Barnard, J., Shutthanandan, V., Cliff, S. S., Perry, K. D., Laskin, A., Gilles, M. K., (2010). "Microscopic characterization of carbonaceous aerosol particle aging in the outflow from Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

180. mohr_c_2009: Mohr, C., Huffman, J. A., Cubison, M. J., Aiken, A. C., Docherty, K. S., Kimmel, J. R., Ulbrich, I. M., Hannigan, M., Jimenez, J. L., (2009). "Characterization of Primary Organic Aerosol Emissions from Meat Cooking, Trash Burning, and Motor Vehicles with High-Resolution Aerosol Mass Spectrometry and Comparison with Ambient and Chamber Observations." *Environmental Science & Technology*.

181. molina_l_t_2007: Molina, L. T., Kolb, C. E., de Foy, B., Lamb, B. K., Brune, W. H., Jimenez, J. L., Ramos-Villegas, R., Sarmiento, J., Paramo-Figueroa, V. H., Cardenas, B., Gutierrez-Avedoy, V., Molina, M. J., (2007). "Air quality in North Americas most populous city-overview of the MCMA-2003 campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

182. molina_l_t_2008: Molina, Luisa T., Madronich, Sasha, Gaffney, Jeffrey S., Singh, Hanwant B., (2008). "Overview of MILAGRO/INTEX-B Campaign." .

183. molina_l_t_2009: Molina, Luisa T., de Foy, Benjamin, Vazquez Martinez, Oscar, Paramo Figueroa, Victor Hugo, (2009). "Air quality, weather and climate in Mexico City." WMO Bulletin.

184. molina_l_t_2010: Molina, L. T., Madronich, S., Gaffney, J. S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J. L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A. R., Russell, P., Schauer, J. J., Stevens, P. S., Volkamer, R., Zavala, M., (2010). "An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

185. moreno_t_2008: Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Minguillon, M. C., Perez, N., Bernabe, R. M., Blanco, S., Cardenas, B., Gibbons, W., (2008). "Lanthanoid geochemistry of urban atmospheric particulate matter." *Environmental Science & Technology*.

186. moreno_t_2008b: Moreno, T., Querol, X., Pey, J., Minguillon, M. C., Perez, N., Alastuey, A., Bernabe, R. M., Blanco, S., Cardenas, B., Eichinger, W., Salcido, A., Gibbons, W., (2008). "Spatial and temporal variations in inhalable CuZnPb aerosols within the Mexico City pollution plume." *Journal of Environmental Monitoring*.

187. moya_m_2004: Moya, M., Grutter, M., Baez, A., (2004). "Diurnal variability of size-differentiated inorganic aerosols and their gas-phase precursors during January and February of 2003 near downtown Mexico City." *Atmospheric Environment*.

188. mugica_v_2009: Mugica, V., Ortiz, E., Molina, L., De Vizcaya-Ruiz, A., Nebot, A., Quintana, R., Aguilar, J., Alcantara, E., (2009). "PM composition and source reconciliation in Mexico City." *Atmospheric Environment*.

189. nunnermacker_l_j_2008: Nunnermacker, L. J., Weinstein-Lloyd, J. B., Hillery, B., Giebel, B., Kleinman, L. I., Springston, S. R., Daum, P. H., Gaffney, J., Marley, N., Huey, G., (2008). "Aircraft and ground-based measurements of hydroperoxides during the 2006 MILAGRO field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

190. ochoa_c_2012: Ochoa, C., Baumgardner, D., Grutter, M., Allan, J., Fast, J., Rappenglueck, B., (2012). "Physical and chemical properties of the regional mixed layer of Mexicos Megapolis Part II: evaluation of measured and modeled trace gases and particle size distributions." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

191. oneill_m_s_2008: ONeill, M. S., Bell, M. L., Ranjit, N., Cifuentes, L. A., Loomis, D., Gouveia, N., Borja-Aburto, V. H., (2008). "Air Pollution and Mortality in Latin America The Role of Education." Epidemiology.

192. osorio_m_a_2011: Osorio, M. A., Torrijos, T., Sanchez, A., Arroyo, O., (2011). "Preliminary analysis for an air quality management DSS in the Metropolitan Valley of Puebla, Mexico." Recen Researches in Computational Techniques, Non-Linear Systems and Control.

193. padro_l_t_2010: Padro, L. T., Tkacik, D., Lathem, T., Hennigan, C. J., Sullivan, A. P., Weber, R. J., Huey, L. G., Nenes, A., (2010). "Investigation of cloud condensation nuclei properties and droplet growth kinetics of the water-soluble aerosol fraction in Mexico City." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.

194. palancar_g_g_2013: Palancar, G. G., Lefer, B. L., Hall, S. R., Shaw, W. J., Corr, C. A., Herndon, S. C., Slusser, J. R., Madronich, S., (2013). "Effect of aerosols and NO2 concentration on ultraviolet actinic flux near Mexico City during MILAGRO: measurements and model calculations." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

195. paredes-miranda_g_2009: Paredes-Miranda, G., Arnott, W. P., Jimenez, J. L., Aiken, A. C., Gaffney, J. S., Marley, N. A., (2009). "Primary and secondary contributions to aerosol light scattering and absorption in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

196. paredes-miranda_g_2013: Paredes-Miranda, G., Arnott, W. P., Moosmuller, H., Green, M. C., Gyawali, M., (2013). "Black Carbon aerosol concentration in five cities and its scaling with city population." Bulletin of the American Meteorological Society.

197. parrish_d_d_2009: Parrish, D. D., Kuster, W. C., Shao, M., Yokouchi, Y., Kondo, Y., Goldan, P. D., de Gouw, J. A., Koike, M., Shirai, T., (2009). "Comparison of air pollutant emissions among mega-cities." *Atmospheric Environment*.

198. parrish_d_d_2011: Parrish, D. D., Singh, H. B., Molina, L., Madronich, S., (2011). "Air quality progress in North American megacities: A review." *Atmospheric Environment*.

199. parry_i_w_h_2010: Parry, I. W. H., Timilsina, G. R., (2010). "How should passenger travel in Mexico City be priced?." *Journal of Urban Economics*.

200. patadia_f_2013: Patadia, F., Kahn, R. A., Limbacher, J. A., Burton, S. P., Ferrare, R. A., Hostetler, C. A., Hair, J. W., (2013). "Aerosol airmass type mapping over the Urban Mexico City region from space-based multi-angle imaging." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

201. perez_sesma_a_2012: Perez Sesma, A., (2012). "Propuesta de delimitacion de cuencas atmosfericas." .

202. perring_a_e_2010: Perring, A. E., Bertram, T. H., Farmer, D. K., Wooldridge, P. J., Dibb, J., Blake, N. J., Blake, D. R., Singh, H. B., Fuelberg, H., Diskin, G., Sachse, G., Cohen, R. C., (2010). "The production and persistence of Sigma RONO2 in the Mexico City plume." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

203. pope_c_a_2009: Pope, C. A., Ezzati, M., Dockery, D. W., (2009). "Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States." *New England Journal of Medicine*.

204. querol_x_2008: Querol, X., Pey, J., Minguillon, M. C., Perez, N., Alastuey, A., Viana, M., Moreno, T., Bernabe, R. M., Blanco, S., Cardenas, B., Vega, E., Sosa, G., Escalona, S., Ruiz, H., Artinano, B., (2008). "PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

205. quintana_r_2011: Quintana, R., Serrano, J., Gomez, V., de Foy, B., Miranda, J., Garcia-Cuellar, C., Vega, E., Vazquez-Lopez, I., Molina, L. T., Manzano-Leon, N., Rosas, I., Osornio-Vargas, A. R., (2011). "The oxidative potential and biological effects induced by PM(10) obtained in Mexico City and at a receptor site during the MILAGRO Campaign." *Environmental Pollution*.

206. ramos-aguilar_r_2013: Ramos-Aguilar, R., Maximo-Romero, P., Soto-Cruz B., Alcantara-Iniesta, S., Perez-Luna J., (2013). "Analysis of the meteorological variables for Puebla City 2011-2012 applying the modeling ion-wavelets in a hypothetical manner." Atmospheric and Climate Science.

207. redemann_j_2009: Redemann, J., Zhang, Q., Livingston, J., Russell, P., Shinozuka, Y., Clarke, A., Johnson, R., Levy, R., (2009). "Testing aerosol properties in MODIS Collection 4 and 5 using airborne sunphotometer observations in INTEX-B/MILAGRO." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

208. reyes_f_2006: Reyes, F., Grutter, M., Jazcilevich, A., Gonzalez-Oropeza, R., (2006). "Tecnical Note: Analysis of non-regulated vehicular emissions by extractive FTIR spectrometry: tests on a hybrid car in Mexico City." *Atmos. Chem. Phys.*

209. rivera_c_2009: Rivera, C., Sosa, G., Wohrnschimmel, H., de Foy, B., Johansson, M., Galle, B., (2009). "Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO2 and NO2 during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

210. rivera_c_2013: Rivera, C., Stremme, W., Grutter, M., (2013). "Nitrogen dioxide DOAS measurements from ground and space: comparison of zenith scattered sunlight ground-based measurements and OMI data in Central Mexico." *Atmósfera*.

211. rogers_r_r_2009: Rogers, R. R., Hair, J. W., Hostetler, C. A., Ferrare, R. A., Obland, M. D., Cook, A. L., Harper, D. B., Burton, S. P., Shinozuka, Y., McNaughton, C. S., Clarke, A. D., Redemann, J., Russell, P. B., Livingston, J. M., Kleinman, L. I., (2009). "NASA LaRC airborne high spectral resolution lidar aerosol measurements during MILAGRO: observations and validation." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

212. romero_guzman_e_t_2007: Romero Guzman, E. T., Reyes Gutierrez, L. R., Sandoval Perez, A., Morelos Martinez, J., (2007). "Analisis quimico-morfologico y evaluacion de la distribucion de materia particulada en el Valle de Toluca." .

213. rosas_perez_i_2007: Rosas Perez, I., Serrano, Jesus, Alfaro-Moreno, Ernesto, Baumgardner, Darrel, Garcia-Cuellar, Claudia, Martin del Campo, Javier Miranda, Raga, G. B., Castillejos, Margarita, Colin, Rene Drucker, Osornio Vargas, Alvaro R., (2007). "Relations between PM10 composition and cell toxicity: A multivariate and graphical approach." Chemosphere.

214. ruiz_suarez_lg_2012: Ruiz Suarez, L.G., Torres Jardon, R., Torres Jaramillo, J.A., Barrera, H., Castro T., Mar Morales, B. E., Garcia Reynoso, Molina, L. T., (2012). "Air quality in the Puebla-Tlaxcala airshed in Mexico during April 2009." .

215. rutter_a_p_2009: Rutter, A. P., Snyder, D. C., Stone, E. A., Schauer, J. J., Gonzalez-Abraham, R., Molina, L. T., Marquez, C., Cardenas, B., de Foy, B., (2009). "In situ measurements of speciated atmospheric mercury and the identification of source regions in the Mexico City Metropolitan Area." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

216. salcedo_d_2006: Salcedo, D., Onasch, T. B., Dzepina, K., Canagaratna, M. R., Zhang, Q., Huffman, J. A., DeCarlo, P. F., Jayne, J. T., Mortimer, P., Worsnop, D. R., Kolb, C. E., Johnson, K. S., Zuberi, B., Marr, L. C., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., Cardenas, B., Bernabe, R. M., Marquez, C., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Laskin, A., Shutthanandan, V., Xie, Y., Brune, W., Lesher, R., Shirley, T., Jimenez, J. L., (2006). "Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the Cenica Supersite." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

217. salcedo_d_2007: Salcedo, D., Onasch, T. B., Canagaratna, M. R., Dzepina, K., Huffman, J. A., Jayne, J. T., Worsnop, D. R., Kolb, C. E., Weimer, S., Drewnick, F., Allan, J. D., Delia, A. E., Jimenez, J. L., (2007). "Technical Note: Use of a beam width probe in an Aerosol Mass Spectrometer to monitor particle collection efficiency in the field." *Atmos. Chem. Phys.*

218. salcedo_d_2010: Salcedo, D., Onasch, T. B., Aiken, A. C., Williams, L. R., de Foy, B., Cubison, M. J., Worsnop, D. R., Molina, L. T., Jimenez, J. L., (2010). "Determination of particulate lead using aerosol mass spectrometry: MILAGRO/MCMA-2006 observations." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

219. salcedo_d_2012: Salcedo, D., Castro, T., Ruiz-Suarez, L. G., Garcia-Reynoso, A., Torres-Jardon, R., Torres-Jaramillo, A., Mar-Morales, B. E., Salcido, A., Celada, A. T., Carreon-Sierra, S., Martinez, A. P., Fentanes-Arriaga, O. A., Deustua, E., Ramos-Villegas, R., Retama-Hernandez, A., Saavedra, M. I., Suarez-Lastra, M., (2012). "Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state)." Science of the Total Environment.

220. salcedo_d_2012b: Salcedo, D., Laskin, A., Shutthanandan, V., Jimenez, J. L., (2012). "Feasibility of the Detection of Trace Elements in Particulate Matter Using Online High-Resolution Aerosol Mass Spectrometry." Aerosol Science and Technology.

221. san_martini_f_m_2005: San Martini, F. M., West, J. J., de Foy, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Sosa, G., McRae, G. J., (2005). "Modeling inorganic aerosols and their response to changes in precursor concentration in Mexico City." *Journal of the Air & Waste Management Association*.

222. san_martini_f_m_2006: San Martini, F. M., Dunlea, E. J., Volkamer, R., Onasch, T. B., Jayne, J. T., Canagaratna, M. R., Worsnop, D. R., Kolb, C. E., Shorter, J. H., Herndon, S. C., Zahniser, M. S., Salcedo, D., Dzepina, K., Jimenez, J. L., Ortega, J. M., Johnson, K. S., McRae, G. J., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Implementation of a Markov Chain Monte Carlo method to inorganic aerosol modeling of observations from the MCMA-2003 campaign-Part II: Model application to the Cenica, Pedregal and Santa Ana sites." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

223. san_martini_f_m_2006b: San Martini, F. M., Dunlea, E. J., Grutter, M., Onasch, T. B., Jayne, J. T., Canagaratna, M. R., Worsnop, D. R., Kolb, C. E., Shorter, J. H., Herndon, S. C., Zahniser, M. S., Ortega, J. M., McRae, G. J., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Implementation of a Markov Chain Monte Carlo method to inorganic aerosol modeling of observations from the MCMA-2003 campaign-Part I: Model description and application to the La Merced site." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

224. schmidt_k_s_2010: Schmidt, K. S., Pilewskie, P., Bergstrom, R., Coddington, O., Redemann, J., Livingston, J., Russell, P., Bierwirth, E., Wendisch, M., Gore, W., Dubey, M. K., Mazzoleni, C., (2010). "A new method for deriving aerosol solar radiative forcing and its first application within MILAGRO/INTEX-B." *Atmos. Chem. Phys.*

225. sedema-gdf__2012: Sedema-GDF, (2012). "Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico Contaminantes Toxicos 2010." .

226. sedema-gdf__2012b: Sedema-GDF, (2012). "Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico Contaminantes Criterio 2010." .

227. sedema-gdf__2012c: Sedema-GDF, (2012). "Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico Gases de Efecto Invernadero y Carbono Negro 2010." .

228. semarnat__2006: Semarnat, (2006). "Inventario Nacional de Emisiones de Mexico, 1999." .

229. semeniuk_t_a_2007: Semeniuk, T. A., Wise, M. E., Martin, S. T., Russell, L. M., Buseck, P. R., (2007). "Hygroscopic behavior of aerosol particles from biomass fires using environmental transmission electron microscopy." *Journal of Atmospheric Chemistry*.

230. shaw_w_j_2007: Shaw, W. J., Pekour, M. S., Coulter, R. L., Martin, T. J., Walters, J. T., (2007). "The daytime mixing layer observed by radiosonde, profiler, and lidar during MILAGRO." *Atmospheric Chemistry and Physics* Discussions.

231. sheehy_p_m_2010: Sheehy, P. M., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., (2010). "Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere-Part 2: A ROx radical cycling perspective." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

232. shinozuka_y_2009: Shinozuka, Y., Clarke, A. D., DeCarlo, P. F., Jimenez, J. L., Dunlea, E. J., Roberts, G. C., Tomlinson, J. M., Collins, D. R., Howell, S. G., Kapustin, V. N., McNaughton, C. S., Zhou, J., (2009). "Aerosol optical properties relevant to regional remote sensing of CCN activity and links to their organic mass fraction: airborne observations over Central Mexico and the US West Coast during MILAGRO/INTEX-B." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

233. shirley_t_r_2006: Shirley, T. R., Brune, W. H., Ren, X., Mao, J., Lesher, R., Cardenas, B., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., Lamb, B., Velasco, E., Jobson, T., Alexander, M., (2006). "Atmospheric oxidation in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) during April 2003." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

234. shon_z_h_2008: Shon, Z. H., Madronich, S., Song, S. K., Flocke, F. M., Knapp, D. J., Anderson, R. S., Shetter, R. E., Cantrell, C. A., Hall, S. R., Tie, X., (2008). "Characteristics of the NO-NO2-O3 system in different chemical regimes during the MIRAGE-Mex field campaign." *Atmos. Chem. Phys.*

235. shrivastava_m_2011: Shrivastava, M., Fast, J., Easter, R., Gustafson Jr, W. I., Zaveri, R. A., Jimenez, J. L., Saide, P., Hodzic, A., (2011). "Modeling organic aerosols in a megacity: comparison of simple and complex representations of the volatility basis set approach." *Atmos. Chem. Phys.*

236. sillman_s_2009: Sillman, S., West, J. J., (2009). "Reactive nitrogen in Mexico City and its relation to ozone-precursor sensitivity: results from photochemical models." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

237. singh_h_b_2009: Singh, H. B., Brune, W. H., Crawford, J. H., Flocke, F., Jacob, D. J., (2009). "Chemistry and transport of pollution over the Gulf of Mexico and the Pacific: spring 2006 INTEX-B campaign overview and first results." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

238. smith_j_n_2008: Smith, J. N., Dunn, M. J., VanReken, T. M., Iida, K., Stolzenburg, M. R., McMurry, P. H., Huey, L. G., (2008). "Chemical composition of atmospheric nanoparticles formed from nucleation in Tecamac, Mexico: Evidence for an important role for organic species in nanoparticle growth." *Geophysical Research Letters*.

239. song_j_2010: Song, J., Lei, W., Bei, N., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Cardenas, B., Zheng, J., Zhang, R., Molina, L. T., (2010). "Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

240. sosa_g_2013: Sosa, G., Vega, E., Gonzalez-Avalos, E., Mora, V., Lopez-Veneroni, D., (2013). "Air Pollutant Characterization in Tula Industrial Corridor, Central Mexico, during the MILAGRO Study." Biomed Research International.

241. spencer_k_m_2009: Spencer, K. M., McCabe, D. C., Crounse, J. D., Olson, J. R., Crawford, J. H., Weinheimer, A. J., Knapp, D. J., Montzka, D. D., Cantrell, C. A., Hornbrook, R. S., Mauldin Iii, R. L., Wennberg, P. O., (2009). "Inferring ozone production in an urban atmosphere using measurements of peroxynitric acid." *Atmos. Chem. Phys.*

242. stephens_s_2008: Stephens, S., Madronich, S., Wu, F., Olson, J. B., Ramos, R., Retama, A., Munoz, R., (2008). "Weekly patterns of Mexico Citys surface concentrations of CO, NOx, PM10 and O-3 during 1986-2007." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

243. stevens_g_2007: Stevens, G., de Foy, B., West, J. J., Levy, J. I., (2007). "Developing intake fraction estimates with limited data: Comparison of methods in Mexico City." *Atmospheric Environment*.

244. stevens_g_a_2008: Stevens, G. A., Dias, Rodrigo H., Ezzati, Majid, (2008). "The effects of 3 environmental risks on mortality disparities across Mexican communities." Proceedings of the National Academy of Sciences.

245. stone_e_a_2008: Stone, E. A., Snyder, D. C., Sheesley, R. J., Sullivan, A. P., Weber, R. J., Schauer, J. J., (2008). "Source apportionment of fine organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO experiment 2006." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

246. stone_e_a_2010: Stone, E. A., Hedman, C. J., Zhou, J. B., Mieritz, M., Schauer, J. J., (2010). "Insights into the nature of secondary organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO experiment 2006." *Atmospheric Environment*.

247. streets_d_g_2013: Streets, D. G., Canty, Timothy, Carmichael, Gregory R., de Foy, Benjamin, Dickerson, Russell R., Duncan, Bryan N., Edwards, David P., Haynes, John A., Henze, Daven K., Houyoux, Marc R., Jacob, Daniel J., Krotkov, Nickolay A., Lamsal, Lok N., Liu, Yang, Lu, Zifeng, Martin, Randall V., Pfister, Gabriele G., Pinder, Robert W., Salawitch, Ross J., Wecht, Kevin J., (2013). "Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability." *Atmospheric Environment*.

248. stremme_w_2009: Stremme, W., Ortega, I., Grutter, M., (2009). "Using ground-based solar and lunar infrared spectroscopy to study the diurnal trend of carbon monoxide in the Mexico City boundary layer." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

249. stremme_w_2013: Stremme, W., Grutter, M., Rivera, C., Bezanilla, A., Garcia, A. R., Ortega, I., George, M., Clerbaux, C., Coheur, P. F., Hurtmans, D., Hannigan, J. W., Coffey, M. T., (2013). "Top-down estimation of carbon monoxide emissions from the Mexico Megacity based on FTIR measurements from ground and space." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

250. subramanian_r_2010: Subramanian, R., Kok, G. L., Baumgardner, D., Clarke, A., Shinozuka, Y., Campos, T. L., Heizer, C. G., Stephens, B. B., de Foy, B., Voss, P. B., Zaveri, R. A., (2010). "Black carbon over Mexico: the effect of atmospheric transport on mixing state, mass absorption cross-section, and CN/CO ratios." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

251. talbot_r_2008: Talbot, R., Mao, H., Scheuer, E., Dibb, J., Avery, M., Browell, E., Sachse, G., Vay, S., Blake, D., Huey, G., Fuelberg, H., (2008). "Factors influencing the large-scale distribution of Hg degrees in the Mexico City area and over the North Pacific." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

252. thompson_a_m_2008: Thompson, A. M., Yorks, J. E., Miller, S. K., Witte, J. C., Dougherty, K. M., Morris, G. A., Baumgardner, D., Ladino, L., Rappengluck, B., (2008). "Tropospheric ozone sources and wave activity over Mexico City and Houston during MILAGRO/Intercontinental Transport Experiment (INTEX-B) Ozonesonde Network Study, 2006 (IONS-06)." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

253. thornhill_d_a_2008: Thornhill, D. A., de Foy, B., Herndon, S. C., Onasch, T. B., Wood, E. C., Zavala, M., Molina, L. T., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Marr, L. C., (2008). "Spatial and temporal variability of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

254. thornhill_d_a_2010: Thornhill, D. A., Williams, A. E., Onasch, T. B., Wood, E., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Knighton, W. B., Zavala, M., Molina, L. T., Marr, L. C., (2010). "Application of positive matrix factorization to on-road measurements for source apportionment of diesel- and gasoline-powered vehicle emissions in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

255. tie_x_2009: Tie, X., Madronich, S., Li, G., Ying, Z., Weinheimer, A., Apel, E., Campos, T., (2009). "Simulation of Mexico City plumes during the MIRAGE-Mex field campaign using the WRF-Chem model." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

256. tie_x_2010: Tie, X., Brasseur, G., Ying, Z., (2010). "Impact of model resolution on chemical ozone formation in Mexico City: application of the WRF-Chem model." *Atmos. Chem. Phys.*

257. tie_x_x_2007: Tie, X. X., Madronich, S., Li, G. H., Ying, Z. M., Zhang, R. Y., Garcia, A. R., Lee-Taylor, J., Liu, Y. B., (2007). "Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study." *Atmospheric Environment*.

258. torres-jardon_r_2009: Torres-Jardon, R., Garcia-Reynoso, J. A., Jazcilevich, A., Ruiz-Suarez, L. G., Keener, T. C., (2009). "Assessment of the Ozone-Nitrogen Oxide-Volatile Organic Compound Sensitivity of Mexico City through an Indicator-Based Approach: Measurements and Numerical Simulations Comparison." *Journal of the Air & Waste Management Association*.

259. tovalin-ahumada_h_2007: Tovalin-Ahumada, H., Whitehead, L., (2007). "Personal exposures to volatile organic compounds among outdoor and indoor workers in two Mexican cities." Science of the Total Environment.

260. tovalin-ahumada_h_2007b: Tovalin-Ahumada, H., Whitehead, L., Blanco, S., (2007). "Personal exposure to PM2.5 and element composition-A comparison between outdoor and indoor workers from two Mexican cities." *Atmospheric Environment*.

261. tsimpidi_a_p_2010: Tsimpidi, A. P., Karydis, V. A., Zavala, M., Lei, W., Molina, L., Ulbrich, I. M., Jimenez, J. L., Pandis, S. N., (2010). "Evaluation of the volatility basis-set approach for the simulation of organic aerosol formation in the Mexico City metropolitan area." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

262. tsimpidi_a_p_2011: Tsimpidi, A. P., Karydis, V. A., Zavala, M., Lei, W., Bei, N., Molina, L., Pandis, S. N., (2011). "Sources and production of organic aerosol in Mexico City: insights from the combination of a chemical transport model (PMCAMx-2008) and measurements during MILAGRO." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

263. ulbrich_i_m_2012: Ulbrich, I. M., Canagaratna, M. R., Cubison, M. J., Zhang, Q., Ng, N. L., Aiken, A. C., Jimenez, J. L., (2012). "Three-dimensional factorization of size-resolved organic aerosol mass spectra from Mexico City." Atmospheric Measurement Techniques.

264. unam__2009: UNAM, (2009). "Estudios de la calidad del aire en la corona regional del centro de Mexico ECACOR." .

265. vay_s_a_2009: Vay, S. A., Tyler, S. C., Choi, Y., Blake, D. R., Blake, N. J., Sachse, G. W., Diskin, G. S., Singh, H. B., (2009). "Sources and transport of delta C-14 in CO2 within the Mexico City Basin and vicinity." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

266. vega_e_2004: Vega, E., Reyes, E., Ruiz, H., Garcia, J., Sanchez, G., Martinez-Villa, G., Gonzalez, U., (2004). "Analysis of PM2.5 and PM10 in the atmosphere of Mexico City during 2000-2002." *Journal of the Air & Waste Management Association*.

267. vega_e_2007: Vega, E., Ruiz, H., Martinez-Villa, G., Sosa, G., Gonzalez-Avalos, E., Reyes, E., Garcia, J., (2007). "Fine and coarse particulate matter chemical characterization in a heavily industrialized city in Central Mexico during winter 2003." *Journal of the Air & Waste Management Association*.

268. vega_e_2009: Vega, E., Lowenthal, D., Ruiz, H., Reyes, E., Watson, J. G., Chow, J. C., Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., (2009). "Fine Particle Receptor Modeling in the Atmosphere of Mexico City." *Journal of the Air & Waste Management Association*.

269. vega_e_2010: Vega, E., Eidels, S., Ruiz, H., Lopez-Veneroni, D., Sosa, G., Gonzalez, E., Gasca, J., Mora, V., Reyes, E., Sanchez-Reyna, G., Villasenor, R., Chow, J. C., Watson, J. G., Edgerton, S. A., (2010). "Particulate Air Pollution in Mexico City: A Detailed View." Aerosol and Air Quality Research.

270. vega_e_2011: Vega, E., Sanchez-Reyna, G., Mora-Perdomo, V., Iglesias, G. S., Arriaga, J. L., Limon-Sanchez, T., Escalona-Segura, S., Gonzalez-Avalos, E., (2011). "Air quality assessment in a highly industrialized area of Mexico: Concentrations and sources of volatile organic compounds." Fuel.

271. velasco_e_2003: Velasco, E., (2003). "Estimates for biogenic non-methane hydrocarbons and nitric oxide emissions in the Valley of Mexico." *Atmospheric Environment*.

272. velasco_e_2005: Velasco, E., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Lamb, B., (2005). "Measurements of CO2 fluxes from the Mexico City urban landscape." *Atmospheric Environment*.

273. velasco_e_2005b: Velasco, E., Lamb, B., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Jobson, B. T., Alexander, M., Prazeller, P., Molina, L., Molina, M., (2005). "Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape." *Geophysical Research Letters*.

274. velasco_e_2007: Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., (2007). "Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

275. velasco_e_2008: Velasco, E., Marquez, C., Bueno, E., Bernabe, R. M., Sanchez, A., Fentanes, O., Wohrnschimmel, H., Cardenas, B., Kamilla, A., Wakamatsu, S., Molina, L. T., (2008). "Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

276. velasco_e_2009: Velasco, E., Pressley, S., Grivicke, R., Allwine, E., Coons, T., Foster, W., Jobson, B. T., Westberg, H., Ramos, R., Hernandez, F., Molina, L. T., Lamb, B., (2009). "Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

277. velasco_e_2011: Velasco, E., Pressley, S., Grivicke, R., Allwine, E., Molina, L. T., Lamb, B., (2011). "Energy balance in urban Mexico City: observation and parameterization during the MILAGRO/MCMA-2006 field campaign." Theoretical and Applied Climatology.

278. volkamer_r_2005: Volkamer, R., Molina, L. T., Molina, M. J., Shirley, T., Brune, W. H., (2005). "DOAS measurement of glyoxal as an indicator for fast VOC chemistry in urban air." *Geophysical Research Letters*.

279. volkamer_r_2006: Volkamer, R., Jimenez, J. L., San Martini, F., Dzepina, K., Zhang, Q., Salcedo, D., Molina, L. T., Worsnop, D. R., Molina, M. J., (2006). "Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected." *Geophysical Research Letters*.

280. volkamer_r_2007: Volkamer, R., Martini, F. S., Molina, L. T., Salcedo, D., Jimenez, J. L., Molina, M. J., (2007). "A missing sink for gas-phase glyoxal in Mexico City: Formation of secondary organic aerosol." *Geophysical Research Letters*.

281. volkamer_r_2010: Volkamer, R., Sheehy, P., Molina, L. T., Molina, M. J., (2010). "Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere-Part 1: A radical source perspective." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

282. voss_p_b_2010: Voss, P. B., Zaveri, R. A., Flocke, F. M., Mao, H., Hartley, T. P., DeAmicis, P., Deonandan, I., Contreras-Jimenez, G., Martinez-Antonio, O., Estrada, M. F., Greenberg, D., Campos, T. L., Weinheimer, A. J., Knapp, D. J., Montzka, D. D., Crounse, J. D., Wennberg, P. O., Apel, E., Madronich, S., de Foy, B., (2010). "Long-range pollution transport during the MILAGRO-2006 campaign: a case study of a major Mexico City outflow event using free-floating altitude-controlled balloons." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

283. wang_j_2010: Wang, J., Cubison, M. J., Aiken, A. C., Jimenez, J. L., Collins, D. R., (2010). "The importance of aerosol mixing state and size-resolved composition on CCN concentration and the variation of the importance with atmospheric aging of aerosols." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

284. west_j_j_2004: West, J. J., Zavala, M. A., Molina, L. T., Molina, M. J., San Martini, F., McRae, G. J., Sosa-Iglesias, G., Arriaga-Colina, J. L., (2004). "Modeling ozone photochemistry and evaluation of hydrocarbon emissions in the Mexico City metropolitan area." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.

285. whiteman_c_d_2000: Whiteman, C. D., Zhong, S., Bian, X., Fast, J. D., Doran, J. C., (2000). "Boundary layer evolution and regional-scale diurnal circulations over the Mexico Basin and Mexican plateau." *Journal of Geophysical Research*-Atmospheres.

286. wohrnschimmel_h_2006: Wohrnschimmel, H., Marquez, C., Mugica, V., Stahel, W. A., Staehelin, J., Cardenas, B., Blanco, S., (2006). "Vertical profiles and receptor modeling of volatile organic compounds over Southeastern Mexico City." *Atmospheric Environment*.

287. wohrnschimmel_h_2006b: Wohrnschimmel, H., Zuk, M., Martinez, G., Ceron, J., Bracho, L. R., Cardenas, B., (2006). "The impact of a bus rapid transit system on commuters exposure to air pollutants in Mexico city." Epidemiology.

288. wohrnschimmel_h_2008: Wohrnschimmel, H., Zuk, M., Martinez-Villa, G., Ceron, J., Cardenas, B., Rojas-Bracho, L., Fernandez-Bremauntz, A., (2008). "The impact of a Bus Rapid Transit system on commuters exposure to Benzene, CO, PM(2.5) and PM(10) in Mexico City." *Atmospheric Environment*.

289. wohrnschimmel_h_2010: Wohrnschimmel, H., Magana, M., Stahel, W. A., Blanco, S., Acuna, S., Perez, J. M., Gonzalez, S., Gutierrez, V., Wakamatsu, S., Cardenas, B., (2010). "Measurements and receptor modeling of volatile organic compounds in Southeastern Mexico City, 2000-2007." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

290. wood_e_c_2009: Wood, E. C., Herndon, S. C., Onasch, T. B., Kroll, J. H., Canagaratna, M. R., Kolb, C. E., Worsnop, D. R., Neuman, J. A., Seila, R., Zavala, M., Knighton, W. B., (2009). "A case study of ozone production, nitrogen oxides, and the radical budget in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

291. wood_e_c_2010: Wood, E. C., Canagaratna, M. R., Herndon, S. C., Onasch, T. B., Kolb, C. E., Worsnop, D. R., Kroll, J. H., Knighton, W. B., Seila, R., Zavala, M., Molina, L. T., DeCarlo, P. F., Jimenez, J. L., Weinheimer, A. J., Knapp, D. J., Jobson, B. T., Stutz, J., Kuster, W. C., Williams, E. J., (2010). "Investigation of the correlation between odd oxygen and secondary organic aerosol in Mexico City and Houston." *Atmos. Chem. Phys.*

292. yokelson_r_j_2007: Yokelson, R. J., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Toohey, D. W., Alvarado, E. C., Crounse, J. D., Wennberg, P. O., Fisher, M. E., Wold, C. E., Campos, T. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Hao, W. M., (2007). "Emissions from forest fires near Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

293. yokelson_r_j_2009: Yokelson, R. J., Crounse, J. D., DeCarlo, P. F., Karl, T., Urbanski, S., Atlas, E., Campos, T., Shinozuka, Y., Kapustin, V., Clarke, A. D., Weinheimer, A., Knapp, D. J., Montzka, D. D.,

Holloway, J., Weibring, P., Flocke, F., Zheng, W., Toohey, D., Wennberg, P. O., Wiedinmyer, C., Mauldin, L., Fried, A., Richter, D., Walega, J., Jimenez, J. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Hall, S. R., Shetter, R., (2009). "Emissions from biomass burning in the Yucatan." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

294. yokelson_r_j_2011: Yokelson, R. J., Burling, I. R., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Toohey, D. W., Wold, C. E., (2011). "Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

295. yu_x_y_2009: Yu, X. Y., Cary, R. A., Laulainen, N. S., (2009). "Primary and secondary organic carbon downwind of Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

296. zalakeviciute_r_2012: Zalakeviciute, R., Alexander, M. L., Allwine, E., Jimenez, J. L., Jobson, B. T., Molina, L. T., Nemitz, E., Pressley, S. N., VanReken, T. M., Ulbrich, I. M., Velasco, E., Lamb, B. K., (2012). "Chemically-resolved aerosol eddy covariance flux measurements in urban Mexico City during MILAGRO 2006." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

297. zavala_m_2006: Zavala, M., Herndon, S. C., Slott, R. S., Dunlea, E. J., Marr, L. C., Shorter, J. H., Zahniser, M., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Kolb, C. E., Molina, L. T., Molina, M. J., (2006). "Characterization of on-road vehicle emissions in the Mexico City Metropolitan Area using a mobile laboratory in chase and fleet average measurement modes during the MCMA-2003 field campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

298. zavala_m_2009: Zavala, M., Herndon, S. C., Wood, E. C., Jayne, J. T., Nelson, D. D., Trimborn, A. M., Dunlea, E., Knighton, W. B., Mendoza, A., Allen, D. T., Kolb, C. E., Molina, M. J., Molina, L. T., (2009). "Comparison of emissions from on-road sources using a mobile laboratory under various driving and operational sampling modes." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

299. zavala_m_2009b: Zavala, M., Lei, W., Molina, M. J., Molina, L. T., (2009). "Modeled and observed ozone sensitivity to mobile-source emissions in Mexico City." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

300. zavala_m_2009c: Zavala, M., Herndon, S. C., Wood, E. C., Onasch, T. B., Knighton, W. B., Marr, L. C., Kolb, C. E., Molina, L. T., (2009). "Evaluation of mobile emissions contributions to Mexico Citys emissions inventory using on-road and cross-road emission measurements and ambient data." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

301. zavala_m_2013: Zavala, M., Barrera, H., Morante, J., Molina, L. T., (2013). "Analysis of model-based PM2.5 emission factors for on-road mobile sources in Mexico." *Atmósfera*.

302. zhang_y_2009: Zhang, Y., Dubey, M. K., Olsen, S. C., Zheng, J., Zhang, R., (2009). "Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006-MILAGRO." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

303. zhang_y_x_2009: Zhang, Y. X., Dubey, M. K., (2009). "Comparisons of WRF/Chem simulated O-3 concentrations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the MILAGRO period." *Atmospheric Environment*.

304. zheng_j_2008: Zheng, J., Zhang, R., Fortner, E. C., Volkamer, R. M., Molina, L., Aiken, A. C., Jimenez, J. L., Gaeggeler, K., Dommen, J., Dusanter, S., Stevens, P. S., Tie, X., (2008). "Measurements of HNO3 and N2O5 using ion drift-chemical ionization mass spectrometry during the MILAGRO/MCMA-2006 campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

Anexo 6 Red de carbono negro y forzantes climáticos persistentes en el Centro de México

Resumen

La red de carbono negro y forzantes climáticos persistentes (RCN) es un esfuerzo por establecer un sistema de mediciones continuas de carbono negro (CN) y forzantes climáticos persitentes (FC) en México. La importancia del proceso de validación de datos, previo y durante la creación de la red, hará un sistema de mediciones robusto, continuo, sistematizado y validado, para ofrecer datos confiables a todos los interesados en conocer la concentración ambiental de CN y FC.

Para evaluar la respuesta de los instrumentos que componen la red de carbono negro y forzantes climáticos persistentes se realizó una campaña de muestreo de mediciones de propiedades ópticas y químicas de partículas de tamaño $PM_{2.5}$ en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México para comparar, calibrar y validar los instrumentos de medición que forman parte de la red. De enero a marzo de 2015 se efectuó la campaña de mediciones, la cual también involucra instrumentos de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos. Los instrumentos de medición de carbono negro una vez calibrados se van a trasladar a otros puntos del país para medir continuamente, comenzando con el centro de México.

Los datos de la torre de flujos de CO_2 y CH_4 se compararán con otros instrumentos que miden las concentraciones de los mismos gases para validar la respuesta de la torre, a fin de usarla en un futuro como instrumento de referencia.

Palabras clave: calibración etalómetro, etalómetro, carbono negro, carbono elemental, flujos de carbono, *eddy covariance,* $PM_{2.5}$

Prefacio

Las partículas que se producen en combustiones incompletas se llaman hollín, éste una vez emitido a la atmósfera puede alterar el balance radiativo del planeta al absorber luz solar y provocar un aumento en la temperatura de la atmósfera. Además, puede operar como núcleo de condensación de nube al cambiar las propiedades de las gotas y modificar sus patrones de precipitación. El hollín contiene carbono negro (CN) que es la fracción absorbente de radiacion solar y que le da la propiedad visiblemente oscura al hollín.

Las emisiones urbanas de combustión de diversos materiales contienen compuestos tóxicos, gases de efecto invernadero, precursores de ozono (O_3) y hollín, así que reúnen todas las características para modificar el clima del planeta. Las ciudades difieren unas de otras en estructura, morfología y tamaño y no puede generalizarse la fracción de CN de las emisiones de hollín que generan la industria, los hogares o la flota vehicular, así como tampoco

la cantidad de forzantes climáticos persistentes (FC) que emiten. En ese sentido, la red de carbono negro y forzantes climáticos persistentes (RCN) es un esfuerzo por establecer un sistema de mediciones continuas de CN y FC en las principales ciudades de la República Mexicana.

El proyecto consiste en tres etapas, las cuales involucran: i) las primeras mediciones de CN en Iztapalapa; ii) el método de validación de los instrumentos y iii) la rectificación de las mediciones. La importancia del proceso de validación de datos en la creación de la red radica en que es el primer paso para establecer un sistema de mediciones continuas, sistematizadas y validadas para ofrecer información confiable a todos los interesados en conocer la concentración ambiental de carbono negro y forzantes climáticos persistentes en México. De esta manera, Iztapalapa se considera el punto de inicio en el proceso de formación de la red.

Los contaminantes atmosféricos urbanos afectan la salud de las personas y además algunos promueven el calentamiento del planeta, por eso es importante reducir su emisión a través de los tres órdenes de gobierno, de la iniciativa privada y de la ciudadanía. Los programas de mejoramiento de calidad del aire y los inventarios de emisiones son indispensables para controlar y prevenir el aumento de contaminantes en el aire, pero necesitan un sistema de monitoreo ambiental de contaminantes confiable como herramienta para comparar y validar la efectividad de sus acciones de mitigación de contaminantes.

La publicación y divulgación oportuna de concentraciones de carbono negro y forzantes climáticos persistentes permitirá a la población y las autoridades tomar acciones para reducir su exposición. En el caso de CN, los reportes de sus concentraciones generalmente se hacen después de haber tomado muestras de partículas y haber analizado en laboratorio su contenido de carbono; esto significa que pueden pasar hasta 72 horas después del muestreo para conocer los resultados, mismo tiempo que la gente continúa expuesta a los contaminantes. Por eso es fundamental contar con sistema que publique información en un tiempo menor y de manera confiable, con datos de calidad que incluyan protocolos de control y aseguramiento de la calidad de la información.

6.1 Introducción

La red de carbono negro y forzantes climáticos persistentes (RCN) es un esfuerzo por establecer un sistema de mediciones continuas de CN y FC en México. La importancia del proceso de validación de datos, previo a la creación de la red, radica en que es el primer paso para establecer un sistema de mediciones continuas, sistematizadas y validadas para ofrecer datos confiables a todos los interesados en conocer la concentración ambiental de CN y FC.

El proyecto de la RCN tiene por objetivo calibrar los instrumentos y validar la información que proporcionen los equipos que la conformarán. Para

cumplir con los objetivos se organizó la campaña ACU15 para medir diversas propiedades de las partículas aéreas, así como comparar y revisar el funcionamiento de los instrumentos de la red. Del 19 de enero al 20 de marzo de 2015 se llevó a cabo esta campaña en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM con el fin de determinar las propiedades ópticas y químicas de partículas, la composición de algunos gases ambientales y las condiciones meteorológicas del lugar. Además, se evaluó la operación de instrumentos de medición de carbono negro (CN), elemental (CE), orgánico (CO), así como de los instrumentos que integran la torre de flujos (CH_4 y CO_2). La campaña incorporó instrumentación de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) y de la RCN para validar los resultados.

Los contaminantes generados en zonas metropolitanas (gases y partículas) suelen transportarse lejos de los puntos de emisión, por lo que su área de impacto es mucho mayor que los lugares donde se producen, influyendo así en el clima incluso a escala planetaria. Las partículas de aerosol también influyen en el balance radiativo del sistema Tierra-Atmósfera; por ejemplo, el CN absorbe grandes cantidades de luz solar y opera como núcleo de condensación de gotas que puede cambiar las propiedades de las nubes, así como disminuir la precipitación provocando un aumento en la temperatura de la atmósfera.

Las plumas de contaminantes que generan las ciudades contienen grandes cantidades de compuestos tóxicos, gases de efecto invernadero, precursores de ozono (O_3) y partículas, los cuales pueden modificar el clima del planeta (IPCC, 2013). Las ciudades son diferentes unas de otras, ya que cada una tiene su estructura, morfología y tamaño particular, por lo que no puede generalizarse las concentraciones de carbono negro y forzantes climáticos para toda una región o país.

Los contaminantes atmosféricos urbanos participan en el calentamiento del planeta y es importante reducir su emisión, lo que requiere la atención de los tres órdenes de gobierno, de la iniciativa privada y la ciudadanía. Los programas de mejoramiento de calidad del aire y los inventarios de emisiones son indispensables para controlar y prevenir el aumento de contaminantes en el aire, pero de nada sirven si no hay sistemas de monitoreo de contaminantes confiables con qué comparar la información.

Por tal motivo, se pretende establecer una red de carbono negro en las principales urbes del centro del país para determinar y vigilar las concentraciones ambientales de CN y otros FC que no se miden en estaciones de monitoreo de calidad del aire (CH_4, CO_2 y otros compuestos), debido a que el calentamiento global es innegable y la contribución de México a este problema es aún desconocida o determinada con mucha incertidumbre.

Además, es recomendable que el país cuente con una red de información en tiempo real que permita a la población conocer las condiciones atmosféricas en el menor tiempo posible y así puedan tomar acciones para reducir su exposición.

6.1.1 CARBONO NEGRO

El hollín es un producto directo de la combustión, de color negro característico por el carbono negro que lo compone y que es la métrica para determinar su abundancia en el ambiente; por tal motivo es común hablar del carbono negro que contienen las partículas atmosféricas. En ese sentido, las mediciones de hollín ambiental tratan de manera indistinta al carbono negro y otras especies similares que contiene el hollín y que se determinan por distintos métodos analíticos considerando que se trata de la misma especie, pero medida con base en propiedades ópticas (carbono negro) o térmicas (carbono elemental) (Peralta *et al.,* 2007).

Uno de los primeros estudios sobre hollín urbano se realizó en la zona de Chapultepec, en la ciudad de México, del 22 al 28 de agosto de 1990 y reporta una concentración promedio de hollín de 3.4 ± 0.5 $\mu g/m^3$ para seis horas de muestreo (Miranda *et al.,* 1992), aunque no muestra la serie de tiempo de las concentraciones de hollín determinado en el estudio.

Años después, Edgerton *et al.* (1999) publicaron un estudio de composición de partículas en la ciudad de México, en el que reportan para la Merced una concentración ambiental promedio de carbono elemental de 4.5 $\mu g/m^3$, entre febrero y marzo de 1997. Los resultados mostrados eran determinaciones de carbono elemental y orgánico en muestreos de partículas $PM_{2.5}$ de 24 horas, así que no se podía conocer la evolución horaria del carbono elemental. Watson *et al.* (2001) midieron con etalómetros (instrumentos que miden la atenuación de luz) la concentración ambiental de carbono negro en la ciudad de México, en esa misma campaña de 1999 en la Merced y el Pedregal. Sus lecturas tienen una resolución de 5 minutos y muestran las variaciones horarias y diarias de las concentraciones de carbono negro. Los registros de concentraciones se encuentran dentro del intervalo de 1-10 $\mu g/m^3$ y registran concentraciones promedio diarias de 4.0 $\mu g/m^3$ en la Merced y 2.9 $\mu g/m^3$ en el Pedregal.

Otros estudios siguieron a ésos pero a la fecha han sido esfuerzos aislados o temporales de mediciones de concentraciones de carbono negro en zonas urbanas de México, los cuales reportan concentraciones promedio en el intervalo de 2-12 $\mu g/m^3$ (Baumgardner *et al.,* 2002; Chow *et al.,* 2002; Doran *et al.,* 2007). Los datos pocas veces abarcan más de un mes de mediciones, lo que impide ver la variabilidad estacional y su relación con inventarios de emisiones. Sin embargo, un estudio reciente (Retama *et al.,* 2015) reporta las variaciones anuales del CN en un sitio en el norte de la ciudad de México (Vallejo).

En otras ciudades igualmente pobladas, como Tokio y Pekín, ya se han realizado mediciones de CN a largo plazo, ya sea por medio de instrumentación óptica (Kondo *et al.,* 2006) o con muestreos rutinarios de partículas y análisis químicos (Yang *et al.,* 2005).

En la RCN se emplearán impactadores de bajo volumen con sustratos de cuarzo para determinar la concentración ambiental de partículas y su contenido de carbono elemental y con ello hacer una comparación con los equipos automáticos como el extintómetro fotoacústico PAX (*photoacoustic extinctometer*) que mide el carbono negro por medio de un haz láser que impacta en las partículas y mide la onda acústica que genera el carbono negro para determinar su concentración; los etalómetros que miden la atenuación de luz producida por las partículas para estimar la concentración de carbono negro y el fotómetro PSAP (*particle soot absorption photometer*) que mide también atenuación de luz. Los muestreos se hicieron en periodos de 24 horas y las primeras muestras se analizarán con técnicas termo-ópticas en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

6.1.2 FLUJOS DE CO_2

Las ciudades generan gases de efecto invernadero al ambiente y de estos el dióxido de carbono (CO_2) es el gas más importante en términos de forzamiento radiativo (IPCC, 2013). Se emite directamente por la quema de combustibles fósiles y la biomasa asociada con sistemas de transporte, consumo de energía en hogares y edificios públicos, así como en la industria. Las emisiones de plantas de generación eléctrica, incineradores, aeropuertos y puertos marítimos también contribuyen a las emisiones totales de CO_2 de las ciudades y no siempre se producen dentro de los límites urbanos.

Sistemas de monitoreo de gases de efecto invernadero (GEI) basados en métodos independientes son necesarios para validar la exactitud de las emisiones estimadas. En este contexto, las mediciones directas de los flujos de CO_2 que incluyen todas las fuentes y sumideros naturales y antropogénicos en una zona específica pueden utilizarse para evaluar los inventarios de emisiones. Los estudios que caracterizan los flujos de masa y energía son esenciales para comprender procesos que van desde el comportamiento de las plantas hasta el desarrollo de modelos orientados a predecir el tiempo y los cambios del clima (Granier *et al.,* 2000). Dentro de los flujos de masa destacan el flujo de vapor de agua y el de dióxido de carbono por ser los principales gases causantes del efecto invernadero.

En los últimos años, gran número de científicos han caracterizado el ciclo global del carbono. Este interés surge como consecuencia del descubrimiento de un aumento en la concentración del CO_2 atmosférico que conlleva a un calentamiento global asociado al aumento de gases de efecto invernadero. Ante este escenario surge el protocolo de Kyoto como herramienta para promover la reducción de emisiones de CO_2 a la atmósfera. En él se plantea la necesidad de cuantificar las posibles fuentes y sumideros para gestionar las emisiones y promover la conservación de los principales sumideros de CO_2.

Las herramientas empleadas tradicionalmente para medir la asimilación de CO_2 por parte de los ecosistemas son los sistemas de cubetas y cámaras, que se remontan a la década de 1960 y aún en la actualidad se emplean para la medida de las variaciones diurnas de CO_2 en hojas, ramas e

incluso árboles individuales o suelo. El carácter manual de estas técnicas tradicionales y la necesaria modificación del entorno para la realización de las medidas limitan la fiabilidad de los resultados que, además, se obtienen de modo puntual y deben extrapolarse al conjunto del ecosistema. En la actualidad, estos sistemas manuales —como las cámaras de flujo de CO_2 al suelo— suelen emplearse en experimentación (Liu *et al.,* 2006b; Vicca *et al.,* 2007), modelización de la respiración del suelo (Reichstein *et al.,* 2003) y en validación y complementación de otras técnicas destinadas a cuantificar los intercambios a nivel de ecosistema (Janssens *et al.,* 2001).

Las limitaciones de estas técnicas tradicionales a la hora de extrapolar los datos al conjunto del ecosistema, los continuos avances en el campo de la dinámica de fluidos y de la micrometeorología y el progreso tecnológico han favorecido en los últimos años el impulso de nuevas técnicas. Es el caso de los métodos micrometeorológicos (Dabberdt *et al.,* 1993; Baldocchi, 2003), cuya importancia radica en la toma de medidas desde el aire sin perturbar el ecosistema. Y entre los métodos micro-meteorológicos destaca la técnica *eddy covariance* (EC) como la única capaz de medir directamente los flujos de CH_4, CO_2 y vapor de agua entre un ecosistema y la atmósfera. Esta técnica se basa en mediciones directas de flujo turbulento próximo a la superficie. Para ello se requiere instrumentación capaz de trabajar con una respuesta rápida y alta frecuencia de muestreo (10 Hz) y de proporcionar información acerca de los flujos en escalas de una hora o menos. A pesar de las dificultades a la hora de la toma y almacenamiento de medidas en continuo se ha demostrado que la integración a escala anual del intercambio de CO_2 a nivel de ecosistema es posible (Wofsy *et al.,* 1993).

El método EC es ampliamente utilizado para investigar el ciclo del carbono en diversos ecosistemas naturales como bosques, cultivos, pastizales, (Baldocchi, 2008) y urbanos. En los 15 últimos años el método se ha empleado para evaluar el intercambio de CO_2 en superficies urbanas. Es una técnica micro-meteorológica que mide directamente la concentración de CO_2 ambiental proveniente de fuentes de emisión antropogénicas y naturales. Varios estudios han demostrado la utilidad del método EC para validar la exactitud de las estimaciones de las emisiones de flujos ascendentes y descendentes de CO_2 (Matese *et al.,* 2009; Christen *et al.,* 2011; Nordbo *et al.,* 2012; Ward *et al.,* 2013; Velasco *et al.,* 2013), así como de los inventarios de emisiones oficiales (Velasco *et al.,* 2009). Además, estudios a largo plazo (un año) han proporcionado datos para investigar los ciclos anuales de intercambio de carbono, asociados con otras variables ambientales, así como cambios estacionales en la vegetación urbana y el consumo de energía (Bergeron y Strachan, 2011; Crawford *et al.,* 2011).

En la ciudad de México, el método EC para medir los flujos turbulentos de gases traza y aerosoles se empleó en 2003 con una torre de flujos, demostrando la viabilidad del método para medir los de gases distintos del CO_2 sobre zonas urbanas (León-Velasco *et al.,* 2005a, 2005b). Una segunda torre de flujo fue colocada en el 2006 durante el proyecto MILAGRO (Molina *et al.,* 2010). Los resultados de estos estudios ayudaron a elucidar si las observaciones estacionales son necesarias y si el cambio climático a través de un

ciclo anual influye en el flujo de CO_2. La torre de flujos opera desde mayo de 2014 y proporciona continuamente datos de concentraciones ambientales de CO_2 y CH_4.

6.2 Objetivo

Crear una red de monitoreo de carbono negro y forzantes climáticos persistentes que opere continuamente y que genere datos confiables para incorporarlos a otras bases de datos. La red se enfoca en la medición de carbono negro de partículas con diámetro aerodinámico de 2.5 µm ($PM_{2.5}$), así como los forzantes climáticos persistentes (CH_4 y CO_2).

6.3 Método e instrumentación

Las mediciones consisten en usar instrumentación (etalómetros y torres de flujo con monitores de CO_2 y CH_4) para medir directamente las concentraciones de carbono negro ambiental y de forzantes climáticos persistentes.

6.3.1 INSTRUMENTACIÓN

En la campaña ACU15 se empelaron instrumentos ópticos que miden la absorción o dispersión de luz solar provocada por las partículas atmosféricas y la convierten en concentración. Además, impactadores MiniVol colectaron muestras de partículas atmosféricas para análisis en laboratorio donde los equipos de análisis usan métodos destructivos para determinar alguna propiedad química de las muestras. La **Tabla A06-1** muestra los equipos involucrados en la campaña ACU15.

6.3.2 MEDICIONES DE CARBONO NEGRO

El procedimiento consistió en medir la concentración de CN ambiental con etalómetros, PAX y PSAP. Estos instrumentos tienen respuesta rápida y estiman la concentración de CN sin realizar análisis químico en laboratorio. Todos los instrumentos de medición de CN estaban conectados a ciclones para separar las $PM_{2.5}$ y eliminar las demás.

Los etalómetros AE-42 y AE-31 miden la atenuación de la luz que producen las partículas al depositarse en un filtro continuo de cuarzo. Los instrumenton utilizan fuentes de luz de siete longitudes de onda distintas para medir la atenuación y emplean la de 880 nm para medir el carbono negro. Los etalómetros trabajan en varias longitudes de onda (370-950 nm) para medir la atenuación y estimar concentraciones de CN usando un coeficiente empírico, de absorción de masa de fábrica de 10.8 m^2/g. Este valor se corregirá con los datos del analizador de carbono para las propiedades del hollín de la ciudad de México (Shen *et al.,* 2012). El principio de atenuación de la luz visible para medir CN se muestra a continuación:

$$ATN = 100 * \ln (I0/I)$$

$$ATN (\lambda) = \sigma (1/\lambda) * [cn]$$

$$cam = \sigma (1/\lambda)$$

Donde ATN es la atenuación de la luz en el filtro, I_0 e I son las intensidades de la luz incidente (1/λ) y CAM es el coeficiente de absorción de masa.

El extintómetro fotoacústico PAX (*photoacoustic extinctiometer*) mide carbono negro por medio de un haz láser que impacta en las partículas y con la onda acústica que genera el carbono negro determina su concentración. Además, cuenta con un nefelómetro que mide la absorción y dispersión de luz producida por las partículas para hacer las correciones de las lecturas de carbono negro a una longiutd de onda de 870 nm.

El fotómetro PSAP (*particle soot absorption photometer*) mide la atenuación de luz que producen las partículas al depositarse en un filtro de cuarzo y usa una fuente de luz de 570 nm.

Tabla A06-1 Instrumentos de la campaña ACU15

Instrumento	Nombre / medición	Información que reporta	Resolución	Datos totales generados en campaña
AE-31 1	Etalómetro AE-31	CN	1 min	86400
AE-31 2	Etalómetro AE-31	CN	1 min	86400
AE-42	Etalómetro AE-42	CN	1 min	86400
CPC	Contador de partículas	Número partículas	1 min	86400
PAX	Espectrómetro fotoacústico PAX-054	ßabs, ßdis, CN	1 min	86400
PAS	Espectrómeto fotoacústico	ßabs, ßdis, CN	1 min	86400
PSAP	Fotómetro	ßabs	1 min	86400
NEF	Nefelómetro	ßdis	1 min	86400
PICARRO	Analizador CO, CO_2, CH_4, H_2O	CO, CO_2, H_2O, CH_4	1 min	86400
SMPS	Clasificador electrostático	Dist. Partículas		
TFlujos CCA	CO_2, H_2O, CH_4, viento, radiación	CO, CO_2, H_2O, CH_4	30 min	2880
ACSM	Espectrómetro de aerosoles	Iones	30 min	2880
Gases criterio	Gases criterio RAMA	CO, O_3, NO_x, $PM_{2.5}$	1 min	86400
Meteorología	Datos meteorológicos	Viento, Temp, radiación	1 min	86400
MiniVol Iones	Mini vol iones cromatografía teflón	6 iones + gravimetría	23.5 h	60
MiniVol UIC	Análisis carbono	CE, CT, CO	23.5 h	60
MiniVol-Fluo	Mini vol análisis fluorescencia cuarzo	elmentos	23.5 h	60
MiniVol-AnM	Mini vol metales cuarzo	Metales + Hg	23.5 h	60
MiniVol-fluo	Mini vol análisis fluorescencia policarbonato	Elementos	23.5 h	60
C-Ion	Cromatografía de iones	6 iones		
UIC	Análisis de carbono	Carbono		
Fluo	Análisis elemental por fluorescencia	Elementos		
C-14	Análisis de carbono 14	C14		
ACSM	análisis iónico	4 iones		
AnM	Análisis metales	Metales + Hg		
Meteo	análisis meteorológico	Datos meteo		
M-Datos	matriz de datos		≈ 60x40	1

6.3.3 MEDICIONES DE CARBONO ELEMENTAL Y ANÁLISIS ELEMENTALES

Se emplearon impactadores de bajo volumen (MiniVol) y sustratos de cuarzo para determinar la concentración ambiental de partículas, posteriormente se les hará un análisis termo-óptico para medir su contenido de carbono elemental y con ello hacer una comparación con los equipos automáticos, como los etalómetros y los extintómetros.

Los MiniVol tenían cabezales de 2.5 µm para recolectar partículas para el análisis de la composición química (CE, elementos e iones). Los muestreos se realizaron durante 24 horas, adicionalmente se midieron concentraciones de los gases criterio (O_3, NO_x, CO y SO_2) para correlacionarlos con la composición química y abundancia de las partículas. Los muestreos se hicieron en periodos de 24 horas y las primeras muestras se analizarán con técnicas termo-ópticas en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

6.3.4 PUNTOS DE MUESTREO

El primer punto de muestreo se ubicó en Iztapalapa, una zona urbana muy poblada y semiárida. En este lugar se instalaron etalómetros en la azotea de un edificio a 15 m sobre el nivel del suelo. Simultáneamente se llevó acabo la recolección de partículas atmosféricas $PM_{2.5}$ utilizando impactadores MiniVol con sustratos de cuarzo previamente acondicionados, esto con la finalidad de determinar el contenido de carbono elemental y de esta manera poder corregir las lecturas de los etalómetros. Este lugar se considera como el primer sitio de muestreo de la RCN dentro del centro de México. Se realizaron mediciones de carbono negro ambiental en el Cenica (Iztapalapa) desde julio a diciembre de 2013 con dos etalómetros (AET-31 y AET-42, Magee Scientific Company). Se recolectó material particulado $PM_{2.5}$ con un impactador Minivol y se determinó su contenido de carbono elemental utilizando un método termo-óptico analizador de carbono por culombimetría (UIC, Inc.).

El segundo sitio fue en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y cuenta con un extintómetro fotoacústico (PAX) y una torre de flujos de CH_4 y CO_2. El tercer punto de muestreo fue Juriquilla, un municipio del estado de Querétaro con un total de 10,561 habitantes de acuerdo con el Censo de población y vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La campaña ACU15 comenzó el 19 de enero 2015; sin embargo, algunos instrumentos ya estaban en operación. La RUOA cuenta con PAX y analizadores de gases CO_2 y CH_4 (PICARRO) que operan desde fines de noviembre 2014. Los demás instrumentos se incorporaron paulatinamente a la campaña de medición.

6.3.5 MATERIAL PARTICULADO

La concentración de carbono negro ambiental, metales, iones y algunos elementos se determinó mediante la recolección de material particulado con impactadores MiniVol (AirMetrics). El muestreo se realizó en intervalos de

23.5 horas. El equipo recolectaba partículas a las 12:20p deteniéndose al día siguiente a las 11:50 am con un flujo aproximado de 5 l/min.

Se trabajó con cinco MiniVol que usaron diferentes tipos de sustratos (cuarzo, policarbonato y teflón) para su posterior análisis con diversas técnicas analíticas.

Tabla A06-2 Información de impactadores MiniVol para la campaña ACU15

Minivol	Identificación del sustrato	Sustrato	Análisis	Flujo (l/min)
CCA1	QJ-n	Cuarzo	Elementos por fluorescencia de Rayos X (XRF)	5.06
CCA2	PC-n	Policarbonato		4.99
CCA3	TF-n	Teflón	Iones	5.05
CCA4	QO-n	Cuarzo	Carbono negro	5.11
UMDI1	QR-n	Cuarzo	Metales pesados	5.03

6.3.5.1 SUSTRATOS

Antes de iniciar el muestreo del material particulado $PM_{2.5}$, los diferentes tipos de sustratos utilizados en la campaña tuvieron un tratamiento previo para eliminar impurezas que pudieran encontrarse. De cada sustrato se obtuvo el peso inicial y el final usando una balanza analítica (Sartorius, modelo CPA225D-0CE) a condiciones de temperatura (24 °C) y humedad relativa constantes (< 40%); con esto se generó un inventario de 340 sustratos para ser utilizados durante los dos meses de campaña. Con la finalidad de reducir la incertidumbre en los valores de los pesos iniciales y finales obtenidos por la balanza se utilizaron marcos de pesas de referencia de 20, 50, 100 y 200 mg.

6.3.5.1.1 *Cuarzo*

El tratamiento previo para los filtros de cuarzo consistió en colocarlos en cápsulas de porcelana, en una mufla a 550 ^{0}C durante 8 horas, para eliminar impurezas. Transcurrido este tiempo, los filtros se colocaron en cajas Petri y se acondicionaron durante 24 horas a condiciones estables de temperatura y HR (25 ˚C; < 40%).

6.3.5.1.2 *Teflón*

Los filtros se lavaron con agua desionizada por ambos lados para eliminar impurezas. Posteriormente se colocaron en cajas de Petri y se llevaron a una campana de flujo laminar donde se secaron. Una vez secos se colocaron en una cámara de acondicionamiento a 25 ^{0}C durante 24 horas previo al proceso de pesaje.

6.3.5.1.3 *Policarbonato*

Estos filtros no requirieron tratamiento previo alguno, pero antes de pesarlos se colocaron en una cámara de acondicionamiento a 25 ˚C.

6.3.5.2 MUESTREO

Los MiniVol estuvieron en operación todos los días por 23:30 horas, dejando un periodo de 30 minutos para el cambio de filtro correspondiente. El calendario de actividades de la **Tabla A06-3** muestra la recolección de partículas durante la campaña ACU15.

Tabla A06-3 Calendario de muestreo

Enero						
Lunes	**Martes**	**Miércoles**	**Jueves**	**Viernes**	**Sábado**	**Domingo**
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	
Febrero						
Lunes	**Martes**	**Miércoles**	**Jueves**	**Viernes**	**Sábado**	**Domingo**
						1
2	**3**	**4**	**5**	**6**	7	8
9	10	**11**	**12**	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	**27**	28	
Marzo						
Lunes	**Martes**	**Miércoles**	**Jueves**	**Viernes**	**Sábado**	**Domingo**
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	**10**	**11**	12	13	14	15
16*	17	18	19	**20**	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

*El cabezal del filtro no se cerró adecuadamente por lo que no se obtuvo recolección de partículas.

- Inicio de la campaña
- Impermeabilización en los alrededores del sitio de muestreo.
- Días de lluvia.
- Se encontró agua dentro del cabezal.
- Se colocó mal el cabezal del equipo.
- Fin de la campaña.

Los impactadores se situaron en el techo del Centro de Ciencias de la Atmósfera durante la campaña. En la **Tabla A06-4** y la **Figura A06-1** se detallan la altura correspondiente de cada equipo con respecto a un marco de referencia. Se considera que la altura relativa toma como punto de referencia inicial la distancia medida desde el techo del edificio hasta el cabezal del MiniVol y la altura absoluta considera la distancia desde el suelo.

Tabla A06-4 Altura correspondiente de cada equipo (m)

Minivol	Altura relativa (m)	Altura absoluta (m)
CCA1	2.38	15.08
CCA2	2.11	14.81
CCA3	2.07	14.77
CCA4	2.00	14.7
UMDI1	2.27	14.97

Se colocaron 3 MiniVol en un soporte y 2 en otro, la distancia entre ellos era aproximadamente 2 m. Los equipos se colocaron a 4 y 2.5 m de distancia de los bordes. De igual manera se fijaron los soportes para evitar una caída de los equipos por cualquier eventualidad.

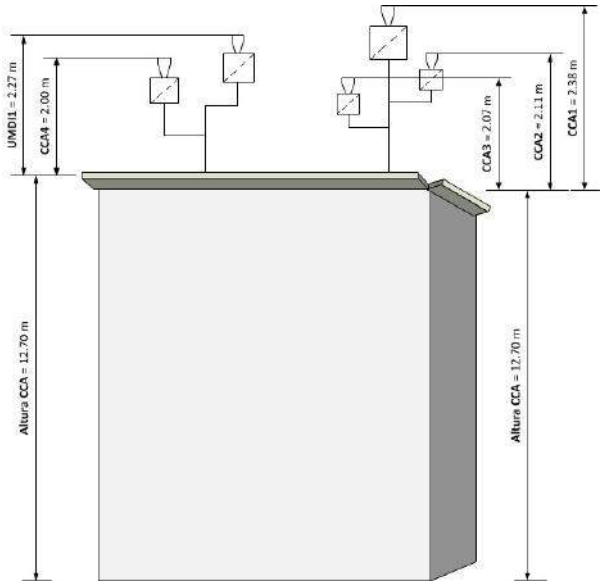


Figura A06-1 *Altura de cada equipo (m).*

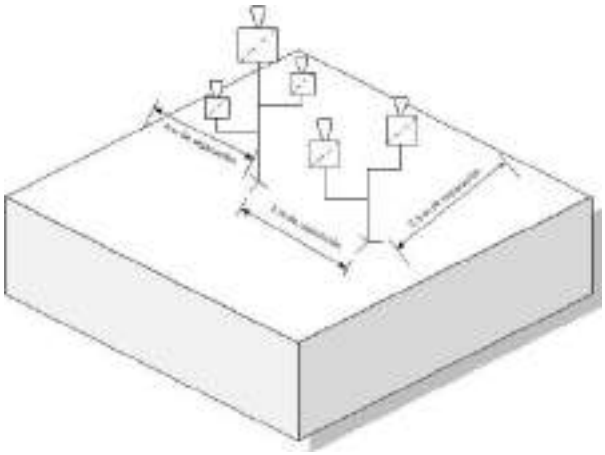


Figura A06-2 *Distancia entre equipos y bordes de la azotea en sitio de muestreo.*

Figura A06-3 *Fotografías de los equipos y sus posiciones.*

6.3.6 FLUJOS DE CO_2

La técnica *Eddie Covariance* permite la medición continua de flujos de carbono a corto (media hora) y largo plazo (interanuales). Se basa en la interpretación de la covarianza entre un viento turbulento (en la dirección normal a la superficie) y las concentraciones de un constituyente (como el CO_2) como un flujo hacia o desde la superficie de interés. La torre de flujos se encuentra montada en la Plataforma de Instrumentación del Centro de Ciencias de la Atmósfera a 15 m de altura. La torre posee un anemómetro ultrasónico 3D (WindMaster Pro, Gill Instruments), un analizador de gases de vía abierta para medición de CO_2/H_2O (LI-7500, LICOR Biosciences) y una unidad de interfase (LI-7500A LICOR Biosciences).

El LI-7550A digitaliza la secuencia de datos del anemómetro y lo combina con datos del analizador de CO_2/H_2O, almacena los archivos de datos en una unidad USB extraíble de grado industrial. La transferencia de datos desde la unidad USB a una computadora se realiza utilizando una conexión Ethernet lo que permite obtener los datos en tiempo real. Tanto el anemómetro como el analizador de gases funcionan a una frecuencia de 10 Hz; los datos de flujos de CO_2, H_2O, calor sensible y latente se calculan usando un software (EddyPro version 5.1.1, LICOR Biosciences).

6.4 Resultados

Los instrumentos instalados en Cenica han reportado datos de agosto a diciembre de 2013. La **Figura A06-4** muestra sólo una parte de las series de tiempo que han registrado los instrumentos AE-31 y AE-42.

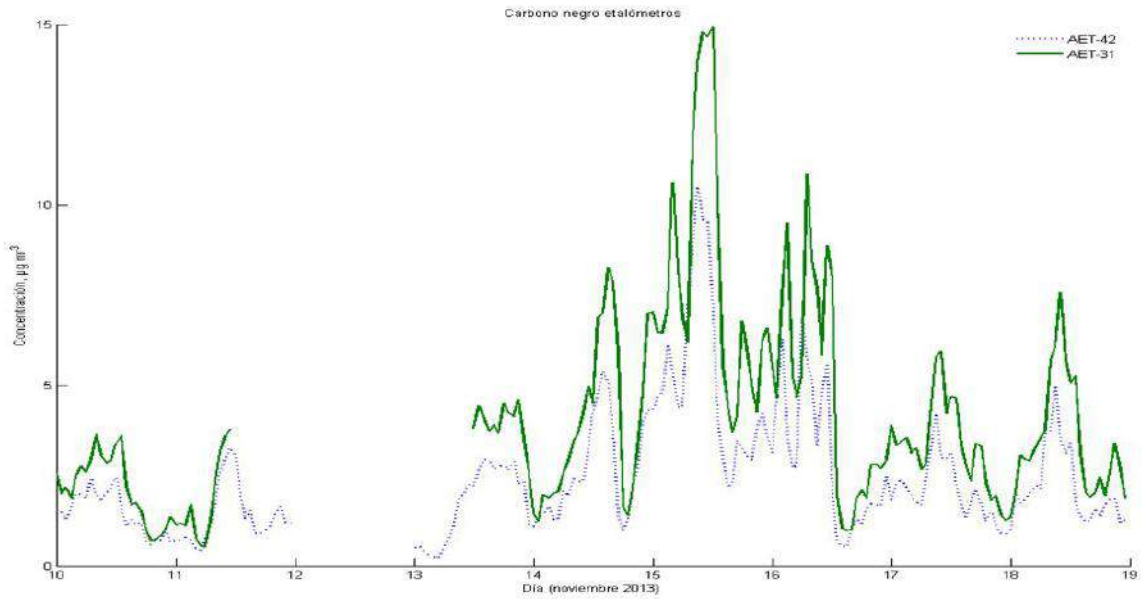


Figura A06-4 *Serie de tiempo de concentración de carbono negro medido con etalómetros.*

El análisis de partículas presentes en la atmósfera durante agosto de 2013 se muestra en la **Tabla A06-3**. Los cálculos del coeficiente de absorción de masa (CAM) se realizaron para las muestras que presentaron un error <10% en el análisis gravimétrico. El intervalo de CAM es de 2.35-6.7 m^2/g para el AET-42 y de 3.06-10.56 m^2/g. En la tabla, el término CN corresponde con el carbono negro medido con los etalómetros, CT con el carbono total y CE con el carbono elemental determinado en las muestras.

Tabla A06-1 Correcciones del coeficiente de absorción de masa CAM (m^2/g) para muestreo de agosto de 2013

ID	CT/ Masa	CE/ Masa	Error	Conc, µg/m³	UIC CN, µg/m³	AET-42 CN, µg/m³	AET-31 CN, µg/m³	σ AET-42	σ AET-31	CAM-42	CAM-31
Q47-001	0.60	0.23	< 10%	24.85	5.80	1.26	1.64	13.608	17.712	2.35	3.06
Q47-003	0.90	0.23	< 10%	13.38	3.04	1.09		11.772		3.87	
Q47-004	0.65	0.20	< 10%	25.31	5.00	1.09		11.772		2.35	
Q47-014	0.62	0.24	> 15%	14.69	3.47	2.15	3.39	23.22	36.612	6.70	10.56

Para el muestreo de marzo de 2014 se analizó el carbono elemental (CE) de la mitad de las muestras y el resto se analizó con otro analizador de carbono (TOC, Sun Microsystems) en Cenica. Las fechas de muestreo y los cálculos de la concentración ambiental de carbono del segundo muestreo se encuentran en la **Tabla A06-4**.

Tabla A06-2 Carbono elemental en muestras recolectadas en marzo 2014

Comienzo de muestreo	Fin de muestreo	ID filtro	Masa muestra, mg	Tiempo muestreo, min	Flujo, lpm	Conc., mg/l	Conc., µg/m³	CO, %	CE, %	CO, µg/m³	CE, µg/m³
13-mar-14	15-mar-14	1	0.52	2742	4.93	3.84E-05	38.44	20.87	12.16	8.02	4.68
13-mar-14	15-mar-14	2	0.64	2754	4.90	4.74E-05	47.38				
18-mar-14	20-mar-14	6	0.62	2886	4.96	4.33E-05	43.29				
20-mar-14	22-mar-14	7	0.60	2880	4.93	4.22E-05	42.22	22.20	4.36	9.37	1.84
20-mar-14	22-mar-14	8	0.76	2880	4.86	5.43E-05	54.28				
24-mar-14	26-mar-14	11	0.68	2886	4.87	4.83E-05	48.31	16.76	7.21	8.10	3.48
24-mar-14	26-mar-14	12	0.44	2880	4.92	3.11E-05	31.05				
26-mar-14	28-mar-14	13	0.69	2880	4.93	4.86E-05	48.56	16.96	2.29	8.24	1.11
26-mar-14	28-mar-14	14	0.73	2832	4.81	5.27E-05	52.70				

CO = carbono orgánico; CE = carbono elemental.

Los extintómetros fotoacústicos (PAX) de la RUOA operan en el Centro de Ciencias de la Atmósfera y en la Facultad de Ciencias, campus Juriquilla, Qro. Actualmente se analizan los datos de la campaña de medición y con ello se contará con una matriz de datos de partículas y gases para correlacionarlos entre sí y validar la respuesta de todos los instrumentos. De esto se podrá concluir si las correlaciones y los ajustes corresponden con alguna fuente de emisión común o con un proceso atmosférico que modifique su condición.

6.4.1 CARBONO NEGRO

Los instrumentos instalados en Iztapalapa reportaron de manera continua datos de agosto a noviembre de 2013. En la **Figura A06-5** se muestran las concentraciones de carbono negro que han obtenido con dos instrumentos (AE-31 y AE-42). Los etalómetros están colocados en la azotea de un edificio, por lo que se considera que las lecturas corresponden a aire ambiental.

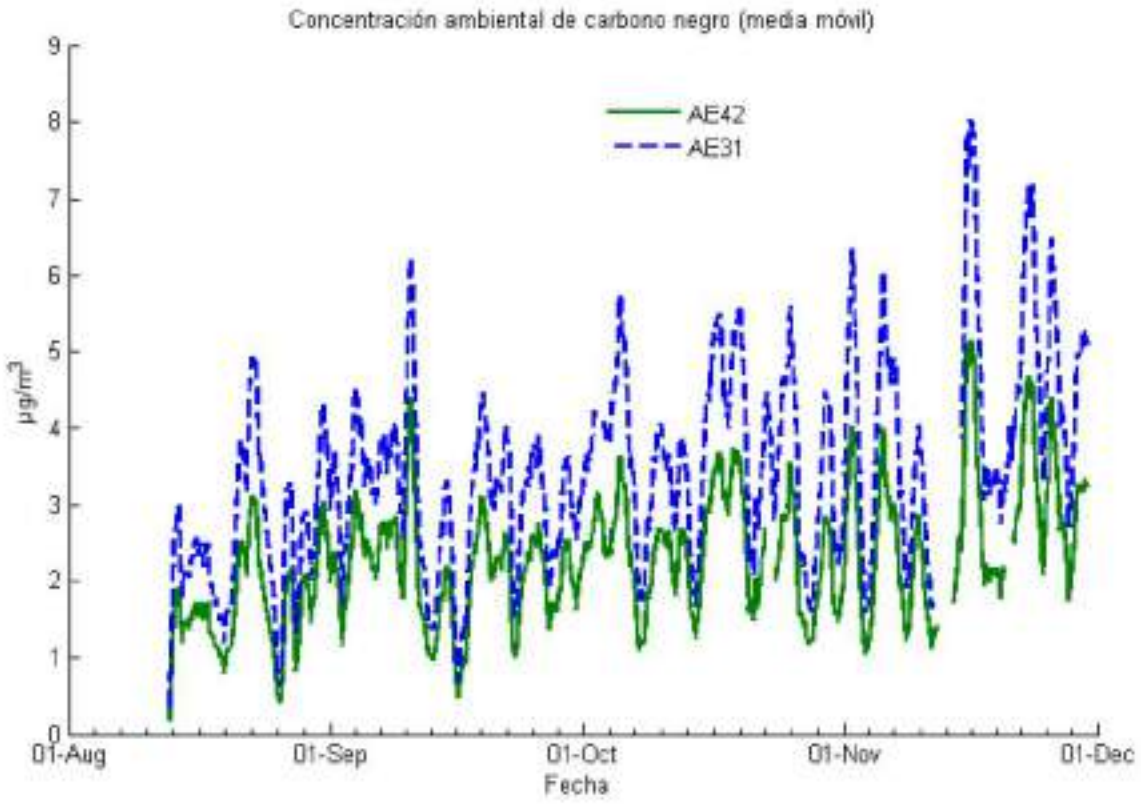


Figura A06-5 *Serie de tiempo de la media móvil de la concentración de carbono negro medido con etalómetros.*

La media móvil de las series de tiempo muestra un aumento en la concentración ambiental de CN registrado. El intervalo de mediciones va de 0.5 a 8.5 µg/m^3. Las series de tiempo también muestran picos de concentraciones y ciclos que corresponden con actividades de semanas laborables. Existe una pequeña diferencia en las lecturas de los etalómetros debida a diferencias en el flujo de aire de muestra que entra a cada instrumento. El flujo del etalómetro AE-42 se calibró con un Gilian que registró un flujo promedio de 3.98 l/m de aire cuando el rotámetro del etalómetro indica 5 l/m. Los histogramas de frecuencias muestran esta diferencia, como lo indica la **Figura A06-6**.

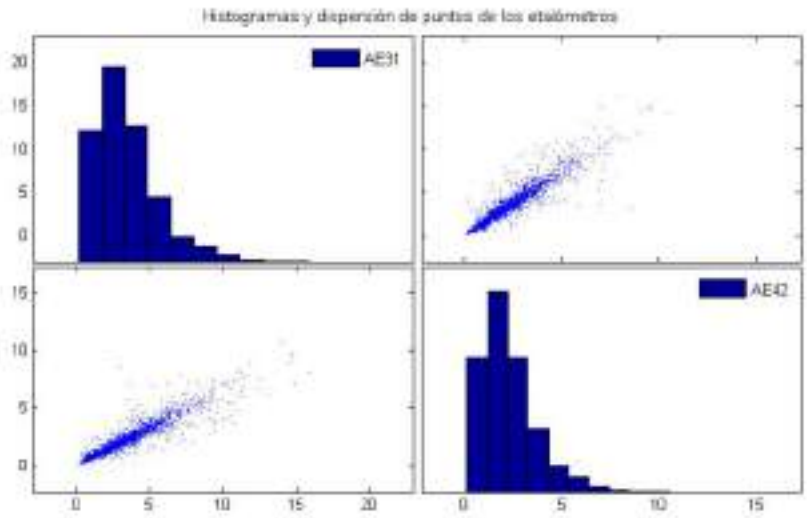


Figura A06-6 *Histogramas y dispersión de datos de los etalómetros.*

Hay una correspondencia lineal entre ambos instrumentos. La regresión lineal de los datos da la siguiente distribución de datos y curva de regresión (**Figura A06-7**).

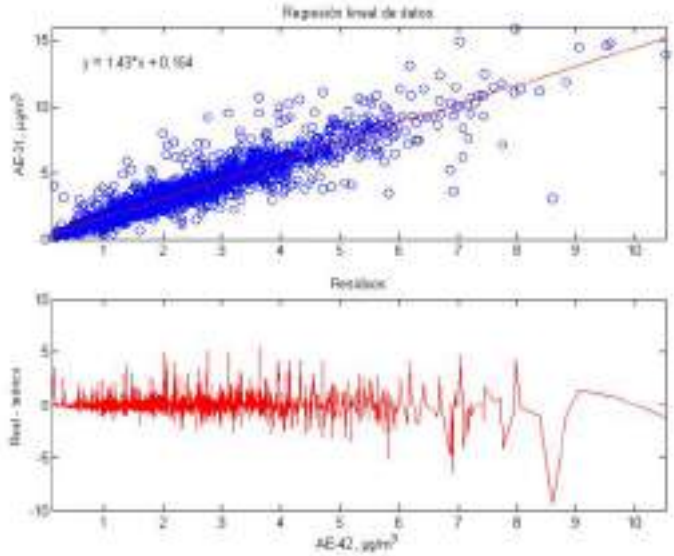


Figura A06-7 *Regresión lineal de datos de los etalómetros y distribución de residuos.*

La curva de residuos de los datos indica que a concentraciones ambientales bajas de carbono negro (CN_{AE-31} < 6.0 µg/m^3) ambos instrumentos tienen un buen ajuste y en el caso del AE-42 más de 75% de la población de datos cae dentro de ese intervalo. El promedio semanal de la concentración de carbono negro indica que hay un patrón definido en la evolución de esta especie a lo largo de la semana. Los días laborales muestran dos picos, a las 08:00 y a las 20:00, mayor que 3 µg/m^3 y un descenso notorio en la concentración ambiental los fines de semana, en especial los domingos. Las líneas punteadas corresponden con la desviación estándar de los datos (**Figura A06-8**).

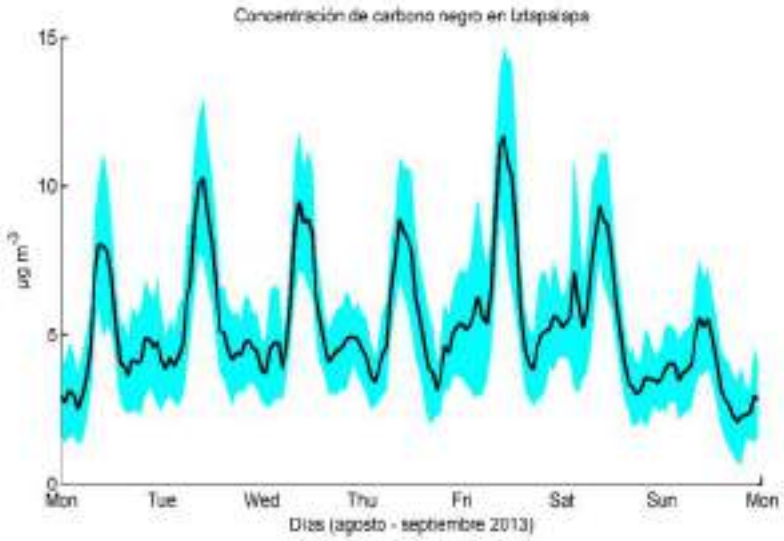


Figura A06-8 *Promedio semanal de carbono negro.*

Los resultados de las concentraciones de CN permitirán calibrar los etalómetros y validar los datos que reportan. Además, permitirá tener datos comunes para comparar resultados de instrumentos con principios de operación diferentes, como etalómetros, fotómetros y extintómetros fotoacústicos.

Los extintómetros fotoacústicos (PAX) del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Coyoacán) y de la Facultad de Ciencias (campus Juriquilla, Qro.) operan desde fines de noviembre 2014. Ambos instrumentos forman parte de la RUOA y la RCN. La **Figura A06-9** muestra las series de tiempo de concentraciones ambientales de CN.

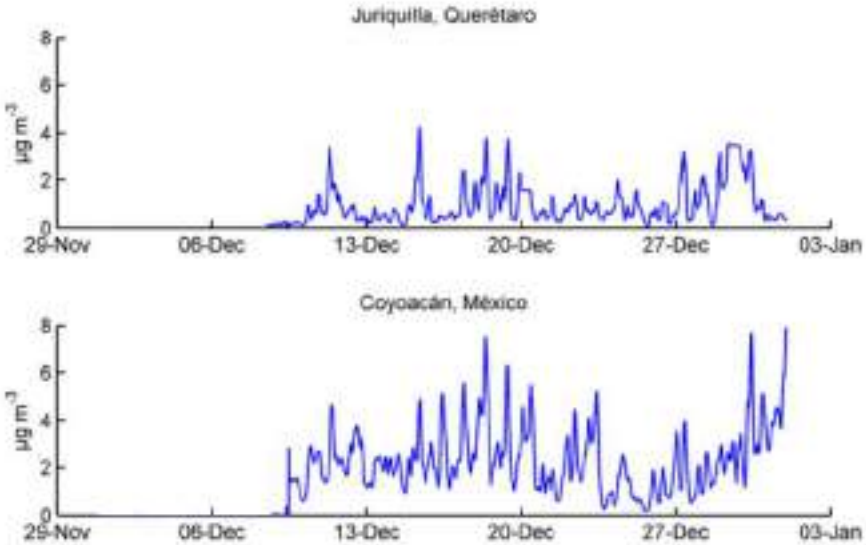


Figura A06-9 *Concentración ambiental de carbono negro en Juriquilla, Qro. y Coyoacán, México, D.F., en diciembre 2014.*

Los gráficos muestran que hay una concentración promedio más alta de CN en Ciudad Universitaria (Coyoacán, 3.4 µg/m^3) que en Juriquilla (1.1 µg/m^3). El PAX de Ciudad Universitaria tuvo un desperfecto del 30 de noviembre al 8 de diciembre. La **Figura A06-10** muestra los datos de dispersión de CN de los etalómetros y el microetalómetro. Además se muestra una media móvil que suaviza las curvas y mejora las correlaciones de datos. La **Figura A06-11** muestra las series de tiempo de los instrumentos durante la intercomparación.

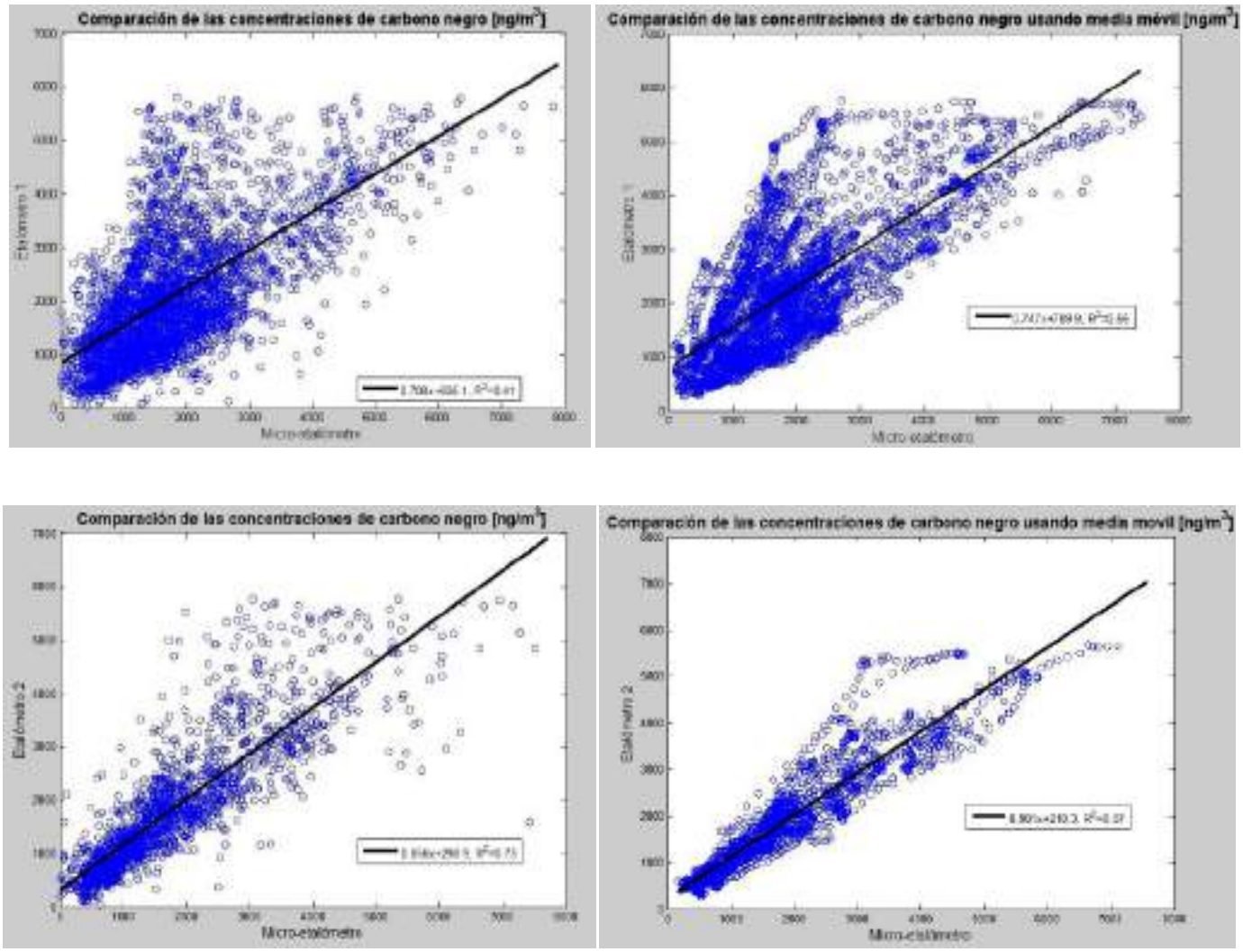


Figura A06-10 *Dispersión de datos de CN.*

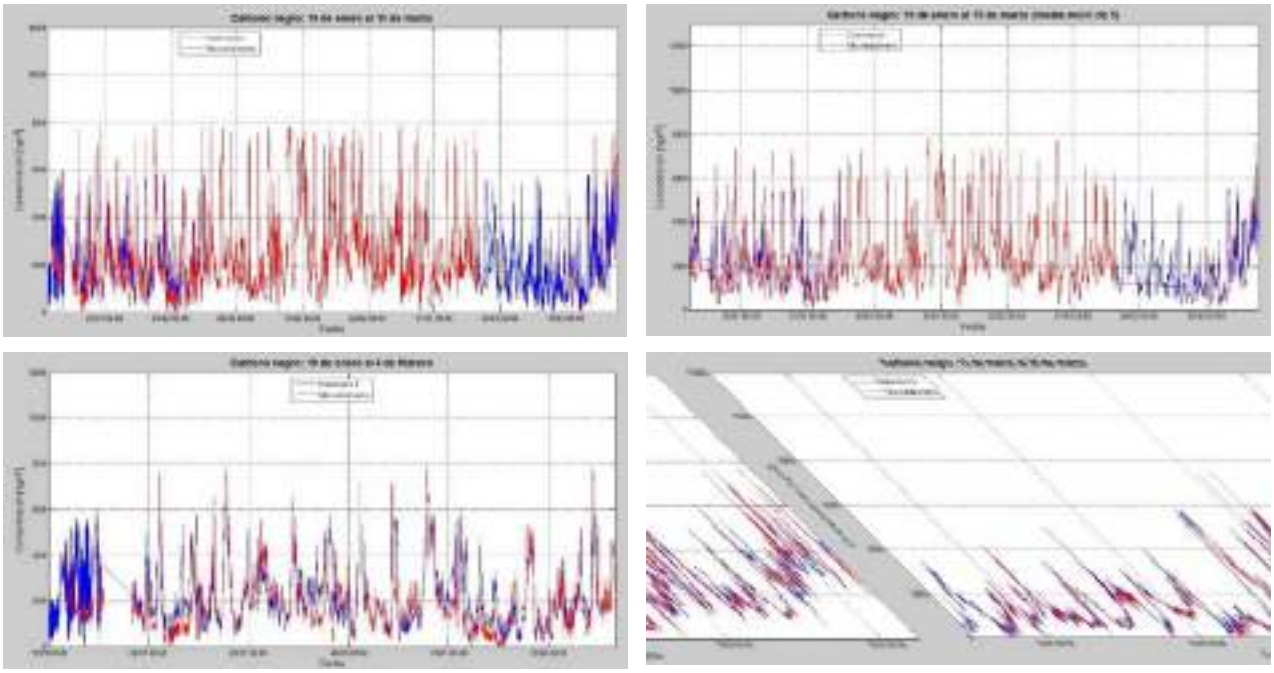


Figura A06-11 *Series de tiempo de los etalómetros.*

6.4.2 MATERIAL PARTICULADO

Para determinar la concentración en masa de las partículas (µg m^{-3}), en especial de los filtros de cuarzo, cuyo análisis será de carbono total, se utilizaron tanto el peso inicial y final de cada filtro. La **Figura A06-12** muestra un filtro de cuarzo antes y después del muestreo.

Figura A06-12 *Filtros de cuarzo antes y después del muestreo.*

La concentración se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración}\left[\frac{\mu g}{m^3}\right] = \frac{\text{Peso final - Peso inicial}}{\text{Flujo de MiniVol} * \text{Tiempo de muestreo}}$$

La **Tabla A06-7** muestra los resultados del análisis gravimétrico que se obtuvieron de las muestras colectadas durante la campaña ACU15.

Tabla A06-3 Concentraciones respectivas de cada filtro en masa (µg m^{-3}) obtenidas por día de muestreo

Fecha	I.D. Filtro	Masa muestra (mg)	Concentración muestra (µg/m^3)	Fecha	I.D. Filtro	Masa muestra (mg)	Concentración muestra (µg/m^3)
19/01/2015	QO-01	0.25	34.698	18/02/2015	QO-31	0.62	86.050
20/01/2015	QO-02	0.34	47.189	19/02/2015	QO-32	0.65	90.214
21/01/2015	QO-03	0.26	36.086	20/02/2015	QO-33	0.63	87.438
22/01/2015	QO-04	0.34	47.189	21/02/2015	QO-34	0.68	94.378
23/01/2015	QO-05	0.41	56.904	22/02/2015	QO-35	0.52	72.171
24/01/2015	QO-06	0.39	54.128	23/02/2015	QO-36	0.62	86.050
25/01/2015	QO-07	0.43	59.680	24/02/2015	QO-37	0.66	91.602
26/01/2015	QO-08	0.36	49.965	25/02/2015	QO-38	0.65	90.214
27/01/2015	QO-09	0.37	51.353	26/02/2015	QO-39	0.69	95.765
28/01/2015	QO-10	0.35	48.577	27/02/2015	QO-40	0.46	63.844
29/01/2015	QO-11	0.19	26.370	28/02/2015	QO-41	0.21	29.146
30/01/2015	QO-12	0.46	63.844	01/03/2015	QO-42	0.36	49.965
31/01/2015	QO-13	0.32	44.413	02/03/2015	QO-43	0.41	56.904
01/02/2015	QO-14	0.34	47.189	03/03/2015	QO-44	0.48	66.619
02/02/2015	QO-15	0.52	72.171	04/03/2015	QO-45	0.34	47.189
03/02/2015	QO-16	0.36	49.965	05/03/2015	QO-46	0.43	59.680
04/02/2015	QO-17	0.42	58.292	06/03/2015	QO-47	0.44	61.068
05/02/2015	QO-18	0.39	54.128	07/03/2015	QO-48	0.42	58.292
06/02/2015	QO-19	0.36	49.965	08/03/2015	QO-49	0.26	36.086
07/02/2015	QO-20	-0.32		09/03/2015	QO-50	0.41	56.904
08/02/2015	QO-21	0.13	18.043	10/03/2015	QO-51	0.22	30.534
09/02/2015	QO-22	0.39	54.128	11/03/2015	QO-52	0.18	24.982
10/02/2015	QO-23	0.49	68.007	12/03/2015	QO-53	0.15	20.819
11/02/2015	QO-24	0.36	49.965	13/03/2015	QO-54	0.07	9.715
12/02/2015	QO-25	0.41	56.904	14/03/2015	QO-55	0.24	33.310
13/02/2015	QO-26	0.62	86.050	15/03/2015	QO-56	0.27	37.473
14/02/2015	QO-27	0.7	97.153	16/03/2015	QO-57	0.23	31.922
15/02/2015	QO-28	0.45	62.456	17/03/2015	QO-58	0.21	29.146
16/02/2015	QO-29	0.48	66.619	18/03/2015	QO-59	0.33	45.801
17/02/2015	QO-30	0.56	77.723	19/03/2015	QO-60	0.43	59.680

6.4.3 FLUJOS DE CO_2 Y H_2O

Los flujos de dióxido de carbono y vapor de agua también se han medido en Ciudad Universitaria (Coyoacán). La **Figura A06-13** es un ejemplo de dos días (12-14 de marzo 2015) de mediciones de flujos de CO_2 y H_2O desde la torre de flujos (sistema *Eddy Covariance*).

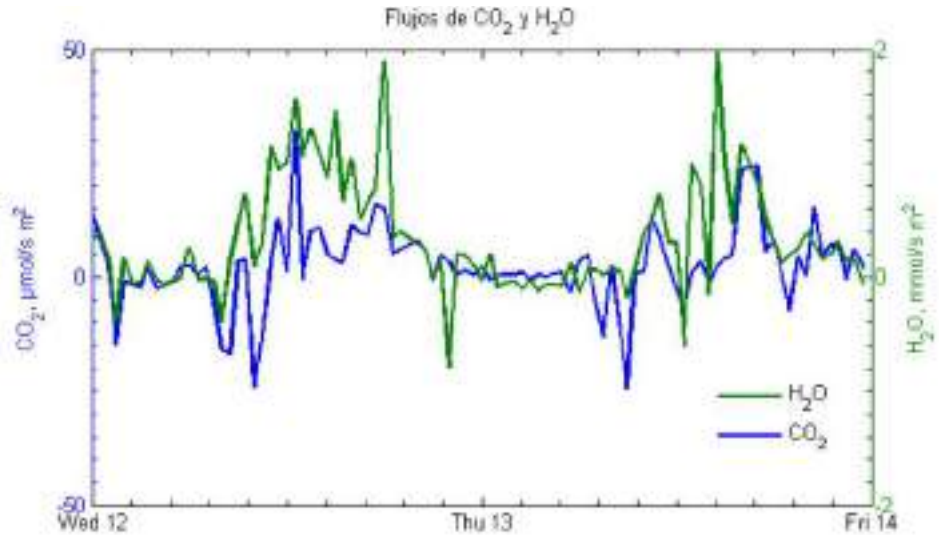


Figura A06-13 *Flujos de CO_2 y H_2O.*

Los flujos de CO_2 y H_2O se expresan respectivamente en µmol/(s m^2) y mmol/(s m^2). En la figura se observa una correspondencia entre ambos, los cuales tienen un máximo hacia el mediodía y disminuyen por la noche. Siguen un patrón de mayor tasa de cambio en las concentraciones de CO_2 cuando hay alta radiación solar (alrededor de mediodía) que favorece la actividad fotosintética de las plantas del entorno.

En la **Figura A06-14**, el histograma de datos de CO_2 (imagen superior izquierda) muestra que el flujo de CO_2 se centra en el cero, por lo que no hay un aporte real de este gas en el punto de muestreo. La distribución no es simétrica, probablemente porque hay un aporte extra de emisiones de CO_2 al medio, como son las vehiculares. Mientras que en el vapor de agua se observa una tendencia a un flujo ascendente de H_2O, lo que indica evaporación de agua de superficie al medio.

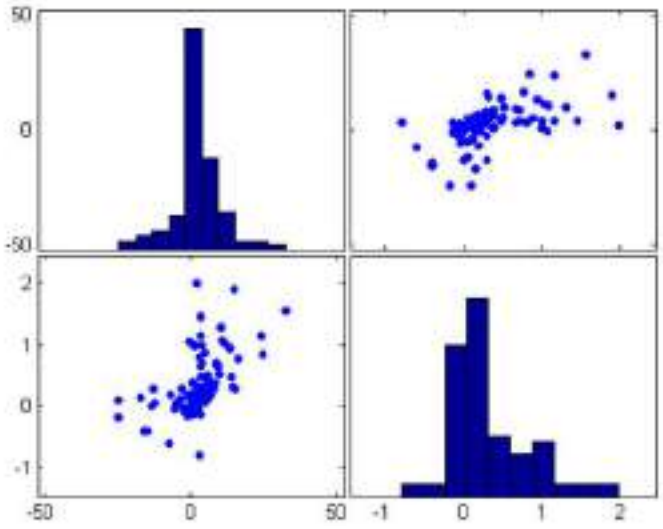


Figura A06-14 *Histogramas y dispersión de datos de flujos de CO_2 y H_2O.*

6.4.4 CONCENTRACIONES DE CO_2 Y CH_4

Las concentraciones de CO_2 y CH_4 obtenidas con la torre de flujos se compararon con los registros del analizador de CO_2 (PICARRO); se utilizaron los datos continuos obtenidos del 7 de febrero al 19 de marzo de 2015.

En la **Figura A06-15** se representan las series de 24 horas de las concentraciones promedio de CO_2 (ppm) separando los días de entresemana y los fines de semana. El patrón de distribución de las concentraciones a lo largo del día entre la torre de flujos y el PICARRO fue similar.

De manera general se observó en ambos equipos que las mayores concentraciones de CO_2 se presentaron entre las 7:00 y las 11:00, y entre las 18:00 y las 21:00, lo que coincide con las horas de mayor flujo vehicular en CU.

La **Figura A06-16** muestra las series de tiempo de 24 horas de las concentraciones promedio de CH_4 (ppm). Al igual que con el CO_2 se separaron las mediciones entre semana y los fines de semana.

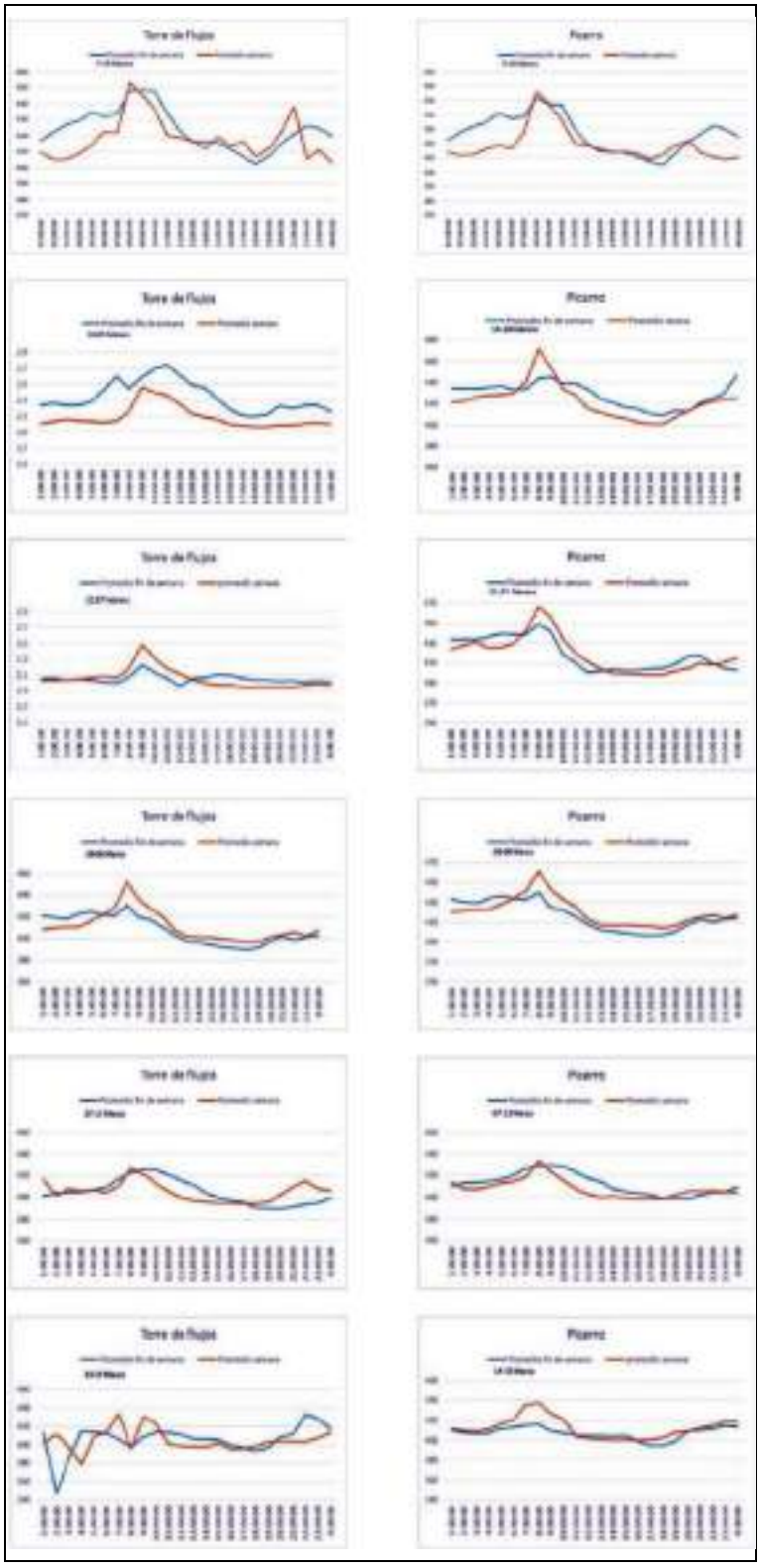


Figura A06-15 *Series de tiempo de 24 horas de las concentraciones promedio de CO_2 (ppm) generadas con la Torre de Flujos y el PICARRO.*

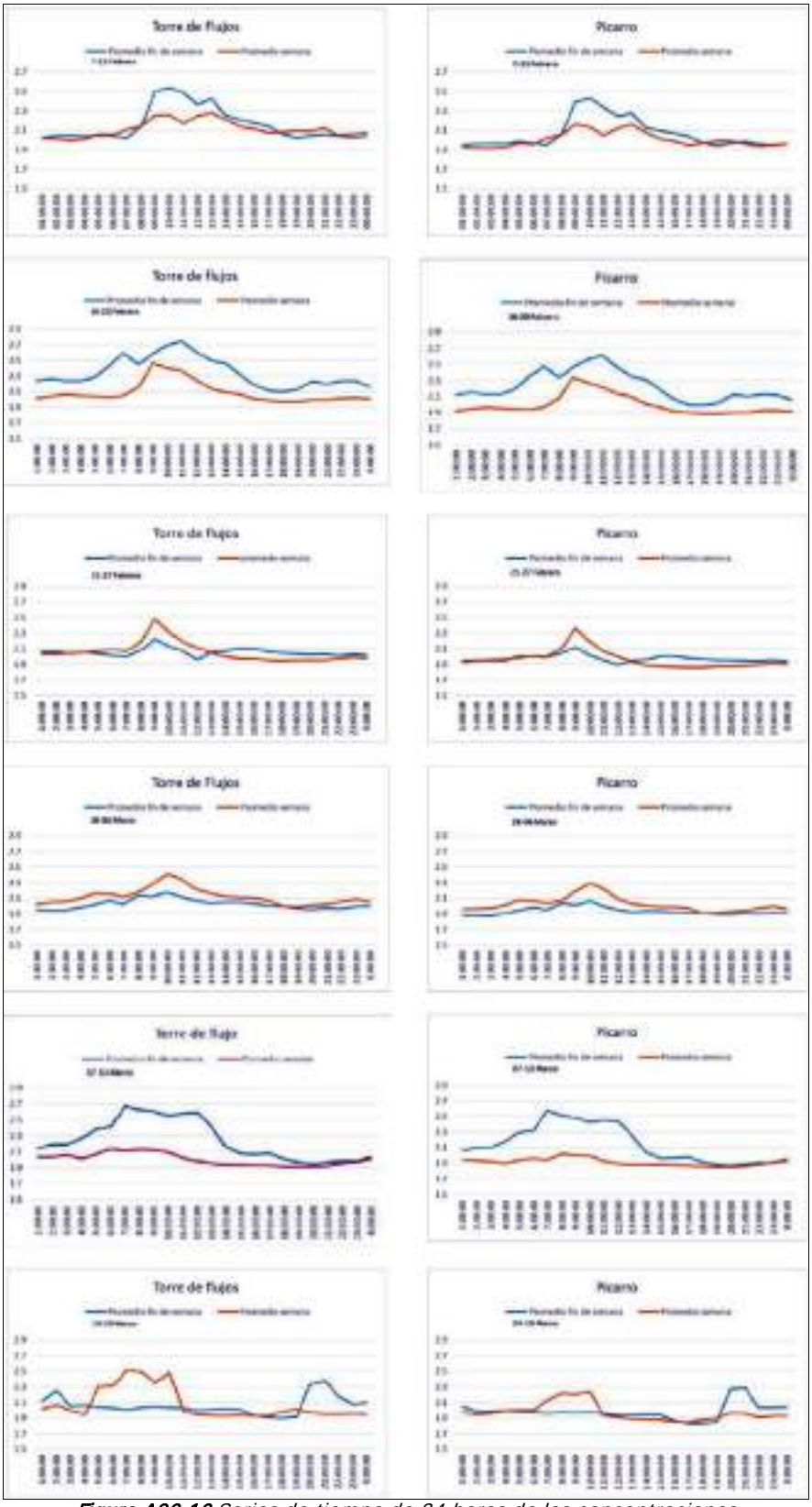


Figura A06-16 *Series de tiempo de 24 horas de las concentraciones promedio de CH4 (ppm) generadas con la Torre de Flujos y el PICARRO.*

Los patrones de distribución de las concentraciones de CH_4 fueron muy parecidos en ambos equipos.

Con en este gas se pudo observar, en algunas ocasiones, valores más altos hacia el fin de semana. El pico de mayor valor en las concentraciones diarias se observó entre las 8:00 y las 17:00.

La comparación entre la torre de flujos y el PICARRO se muestran mediante diagramas de dispersión de las concentraciones de CO_2 y CH_4 (**Figuras A06-17 y 18**).

La correlación semanal de CO_2 entre ambos equipos fue alta, con valores de r^2 entre 0.81 y 0.95. En el caso del CH_4, la correlación fue mucho mayor con valores de r^2 entre 0.92 y 0.99.

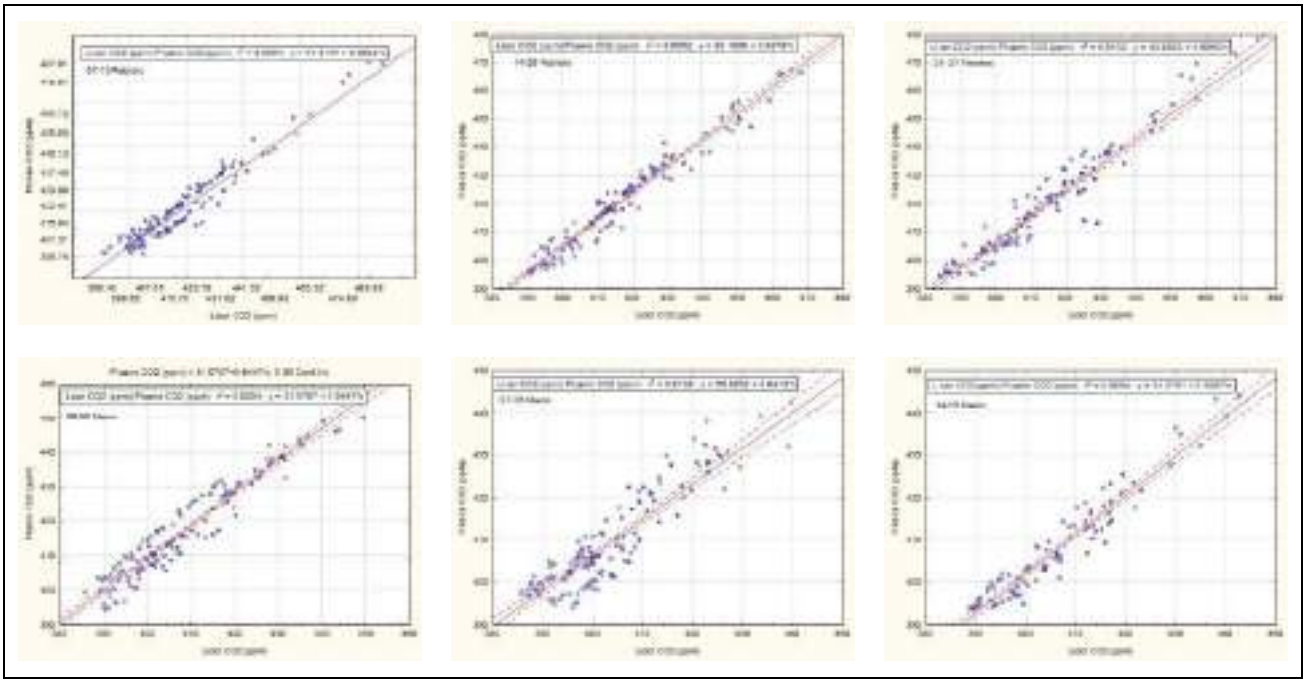


Figura A06-17 *Gráficas de dispersión de las concentraciones de CO_2 entre la Torre de Flujos y el PICARRO.*

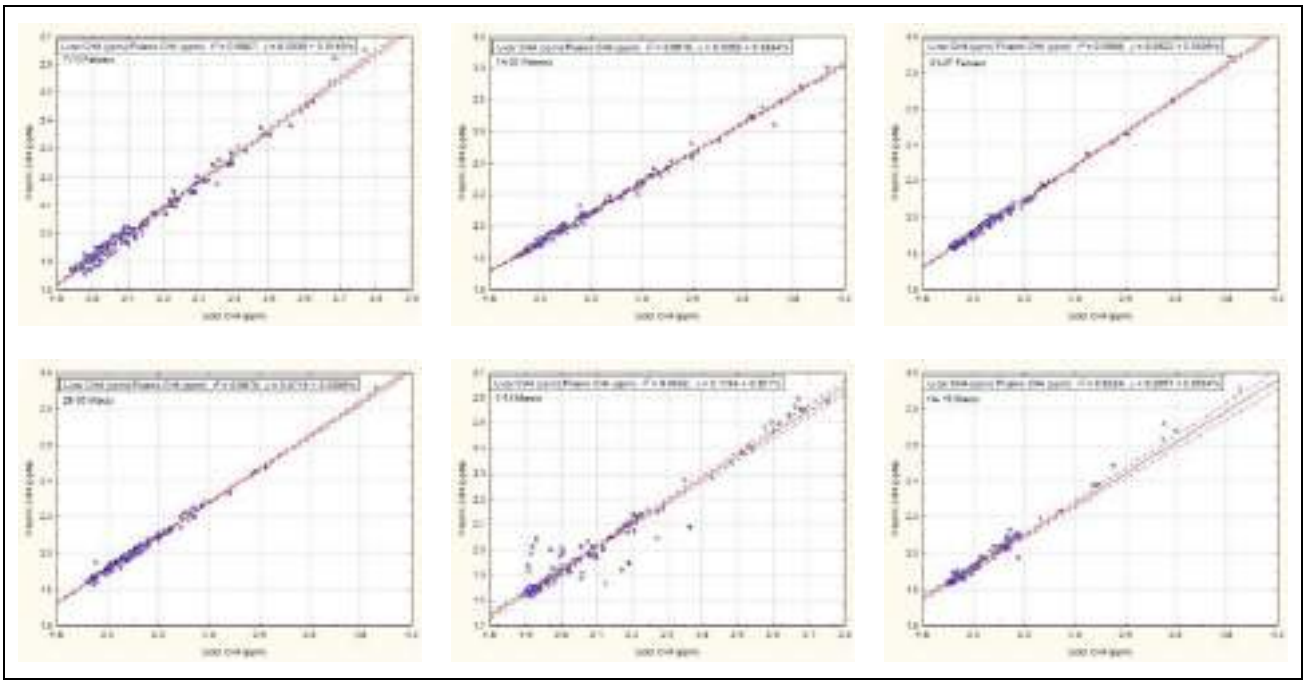


Figura A06-18 *Gráficas de dispersión de las concentraciones de CH_4 entre la Torre de Flujos y el PICARRO.*

6.5 Comentarios

Los etalómetros reportan concentraciones similares aunque ligeramente distintas, con una diferencia de 4%, las cuales se consideran aceptables. Para calibrarlos se empleó el resultado del análisis de carbono elemental de muestras del analizador termo-óptico con celda culombimétrica (UIC) que tiene el Centro de Ciencias de la Atmósfera, así como la comparación de datos entre distintos equipos y la calibración de flujos, pero antes se debe validar la información de los etalómetros y realizar los análisis de carbono elemental de todas las muestras. Los CAM reportados en este estudio preliminar son cercanos a los de otros estudios (Subramanian *et al.*, 2010), pero aún falta validarse. Las concentraciones de CN que registran los PAX de la RUOA en Juriquilla y Ciudad Universitaria (Coyoacán) indican las tendencias y cambios en las concentraciones ambientales, pero aún no se comparan con los resultados de otros instrumentos, por lo que no se pueden considerar como concentraciones absolutas validadas.

Los etalómetros reportan a veces concentraciones distintas (hasta 19%) principalmente debido a los flujos de muestreo. Con la corrección en el flujo de muestreo las lecturas difieren en 4%, con ello las mediciones se consideran estadísticamente aceptables. La serie de tiempo de la concentración ambiental de carbono negro indica que existen patrones mensuales, semanales y diarios en la abundancia de esta especie, ligadas a las actividades de los habitantes de la zona, pues los picos de concentraciones coinciden con horas de actividad económica y de transporte en la zona; es decir a las 8:00 y a las 20:00.

La torre de flujos instalada en Ciudad Universitaria ha medido CO_2, CH_4 y H_2O de marzo 2014 a marzo 2015. La correlación de los datos obtenidos con la torre y el PICARRO fue alta (> 0.81 para el CO_2) y (> 0.92 para el CH_4). Estos resultados permiten tener de manera satisfactoria la validación de los datos.

6.6 Recomendaciones

Se ha calculado el coeficiente de absorción de masa (CAM) del muestreo de agosto 2013 en Iztapalapa, pero la cantidad de datos no es estadísticamente suficiente para tener resultados concluyentes. Para el muestreo de marzo 2015, la mitad de las muestras se ha analizado con otro detector de carbono elemental y se espera que pronto se tengan los datos suficientes para realizar los cálculos de los CAM correspondientes y así corregir los primeros datos de CN de los etalómetros.

La primera etapa del proyecto de la RCN consistió en calibrar los etalómetros, validar sus registros de concentraciones, así como verificar la operación correcta de la torre de flujos. Actualmente se tienen algunos análisis de carbono para validar las lecturas de CN registradas por los etalómetros y

así calcular el CAM para todas las muestras. En este aspecto se recomienda seguir el procedimiento de validación de datos para los equipos futuros. Se ha medido el carbono negro ambiental en Iztapalapa de agosto a diciembre 2013 y de enero a marzo 2015 en Ciudad Universitaria y en Juriquilla. Esa cantidad de datos muestra patrones mensuales, semanales y diarios en la concentración ambiental, con un intervalo de concentraciones de carbono negro de 0-8.5 µg/m^3. Querol et al (2008) reportaron una concentración promedio de carbono elemental para PM_{10} en Iztapalapa de 3.6 µg/m^3. La **Tabla A06-8** muestra las concentraciones promedio de carbono negro en tres lugares de la Corona del Centro de México.

Tabla A06-8 Concentraciones respectivas de cada filtro en masa (µg m^{-3}) obtenidas por día de muestreo

Lugar	Fecha de medición	Población (millones)	Tiempo (días)	µg/m^3
Iztapalapa	Agosto-diciembre 2013	1.8	105	4.1
Coyoacán	Enero-marzo 2015	0.6	100	2.3
Juriquilla	Enero-marzo 2015	0.01	100	0.7

Dados los primeros resultados de los instrumentos involucrados en el proyecto se recomienda seguir con las mediciones en las zonas urbanas del país como Toluca, Pachuca, Cuernavaca, Puebla, etc.), ya que ahí se concentra la mayor actividad industrial y poblacional del país y las características de las partículas de carbono negro de esas zonas urbanas (**Tabla A06-8**) probablemente no sean muy diferentes unas de otras.

Glosario

ATN	Atenuación de la luz en el filtro
ACSM	Monitor para especiación química de aerosoles
CAM	Coeficiente de absorción de masa. Coeficiente que determina las propiedades de atenuación de luz del carbono negro
CE	Carbono elemental. Fracción de carbono de una partícula que tiene propiedades térmicas similares al grafito
CN	Carbono negro. Fracción de carbono de una partícula que tiene propiedades ópticas de absorción de radiación similares al grafito
CO	Carbono orgánico. Fracción de carbono de una partícula que tiene propiedades térmicas similares a compuestos orgánicos
CPC	Contador de partículas
CT	Carbono total, corresponde con la suma de carbono elemental y orgánico
NEF	Nefelómetro
PAS	Espectrómetro fotoacústico
PAX	Extintómetro fotoacústico
PICARRO	Analizador de CO, CO_2, y CH_4
$PM_{2.5}$	Material particulado con diámetro aerodinámico de 2.5 µm
PSAP	Fotómetros de absorción
RCN	Red de Carbono Negro
SMPS	Clasificador electrostático de partículas
$ß_{ABS}$	Coeficiente de absorción. Determina la cantidad de luz que es absorbida por la partícula
$ß_{DIS}$	Coeficiente de dispersión. Determina la cantidad de luz que esparcida por la partícula

Referencias

Baldocchi, D. (2003): Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystem: past, present and future. *Global Change Biology,* 9: 479-492

Baldocchi, D., (2008): Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Aust. J. Bot*. 56, 1-26

Baumgardner, D., G. Raga, O. Peralta, I. Rosas, and T. Castro (2001), Diagnosing black carbon trends in large urban areas using carbon monoxide measurements, *Journal of Geophysical Research,* (107), 1-9

Bergeron, O., Strachan, I.B., (2011): CO2 sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city. *Atmos. Environ.* 45, 1564 - 1573

Chow, J., J. Watson, S. Edgerton, and E. Vega (2002): Chemical composition of PM2.5 and PM10 in Mexico City during winter 1997, *The Science of the Total Environment,* (287), 177-201

Christen, A., Coops, N.C., Crawford, B.R., Kellett, R., Liss, K.N., Olchovski, I., Tooke, T. R., van der Laan, M., Voogt, J.A., (2011): Validation of modeled carbon dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements. *Atmos. Environ.* 45, 6057-6069

Dabberdt, W. F., Lenschow, D. H., Horst, T. W., Zimmerman, P. R., Oncley, S. P., and Delany, A. C. (1993): Atmosphere-surface exchange measurements. *Science,* 260: 1472-1481

Doran *et al.* (2007), The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics,* 19(7), 1585-1598

Edgerton, S. *et al.* (1999): Particle air pollution in Mexico City: a collaborative research project, *Journal of the Air & Waste Management Association,* 1221–2129

Granier, A., Ceschia, E., Damesin, C., Dufrêne, E., Epron, D., Gross, P., Lebaube, S., Le Dantec, V., Le Goff, N., Lemoine, D., Lucot, E., Ottorini, J. M., Pontailler, J. Y. y Saugier, B. (2000): The carbon balance of a young beech forest. *Functional Ecology,* 14: 312 - 325

Janssens, I. A., Lankreijer, H., Matteucci, G., Kowalski, A. S., Buchmann, N., Epron, D., Pilegaard, K., Kutsch, W., Longdoz, B., Grünwald, T., Montagnani, L., Dore, S., Rebmann, C., Moors, E. J., Grelle, A., Rannik, Ü., Morgenstern, K., Oltchev, S., Clement, R., Gudmundsson, J., Minerbi, S., Berbigier, P., Ibrom, A., Moncrieff, J. B., Aubinet, M., Bernhofer, C., Jensen, N. O., Vesala, T., Granier, A., Schulze, E.-D., Lindroth, A., Dolman, A. J., Jarvis, P. G., Ceulemans, R. y Valentini, R. (2001): Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology,* 7: 269 - 278

Kondo, Y. *et al.* (2006): Temporal variation of elemental carbon in Tokyo, *Journal of Geophysical Research,* (111), D12205

Liu, Q., Edwards, N. T., Post, W. M., Gu, L., Ledford, J. y Lenhart, S. (2006b): Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology,* 12(11): 2136-2145

Matese, A., Gioli, B., Vaccari, F.P., Zaldei, A., Miglietta, F. (2009): CO2 emissions of the city center of Firenze, Italy: measurement, evaluation and source partitioning. J. Appl. Meteorol. Clim. 48, 1940-1947

Miranda, J., J. Morales, T. Cahill, F. Aldape, and J. Flores (1992): A study of elemental contents in atmospheric aerosols in Mexico City, *Atmósfera* (5), 95–108

Molina, L. T., Madronich, S., Gaffney, J. S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J. L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A. R., Russell, P., Schauer, J. J., Stevens, P. S., Volkamer, R., Zavala, M., (2010): An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 8697-8760

Nordbo, A., Jarvi, L., Haapanala, S., Wood, C. R., Vesala, T. (2012): Fraction of natural area as main predictor of net CO2 emissions from cities, *Geophys. Res. Lett.,* 39, L20802 http://dx.doi.org/10.1029/2012GL053087

Peralta, O., Baumgardner, D., and Raga, G. (2007): Spectrothermography of carbonaceous particles, *Journal of Atmospheric Chemistry,* (57), 153 –169

Querol X., J. Pey, M. C. Minguillón, N. Pérez, A. Alastuey, M. Viana, T. Moreno, R. M. Bernabé, S. Blanco, B. Cárdenas, E. Vega, G. Sosa, S. Escalona, H. Ruiz, and B. Artíñano (2008): PM speciation and sources in Mexicoduring the MILAGRO-2006 Campaign, *Atmos. Chem. Phys.,* 8, 111-128

Reichstein, M., Rey, A., Freibauer, A., Tenhunen, J. D., Valentini, R., Banza, J., Casals, P., Cheng, Y., Grünzweig, J. M., Irvine, J., Joffre, R., Law, B. E., Loustau, D., Miglietta, F., Oechel, W., Ourcival, J. M., Pereira, J. S., Peressotti, A., Ponti, F., Qi, Y., Rambal, S., Rayment, M., Romanya, J., Rossi, F., Tedeschi, V., Tirone, G., Xu, M. y Yakir, D. (2003): Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical,* 17: 15(1-15)

Retama, A, D. Baumgardner, G. B. Raga, G. R. McMeeking, and J. W. Walker. Seasonal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.,* 15, 12539–12582, 2015 www.atmos-chem-phys-discuss.net/15/12539/2015/

Shen, G., Y. Chen, S. Wei, X. Fu, Y. Zhu, and S. Tao (2012), Mass absorption efficiency of elemental carbon for source samples from residential biomass and coal combustions, *Atmospheric Environment,* (76), 79-84

Subramanian, R. *et al.* (2010): Black carbon over Mexico: the effect of atmospheric transport on mixing state, mass absorption cross-section, and BC/OC ratios, *Atmospheric Chemistry and Physics,* (10), 219–237

Velasco, E., Lamb, B., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Jobson, T., Alexander, M., Prazeller, P., Molina, L., Molina, M., (2005b): Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape, *Geophys. Res. Lett.,* 32, L20802, http://dx.doi.org/10.1029/2005GL023356.

Velasco, E., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Lamb, B., (2005a): Measurements of CO2 fluxes from the Mexico City urban landscape, *Atmos. Environ.,* 39, 7433-7446

Velasco, E., Pressley, S., Grivicke, R., Allwine, E., Coons, T., Foster, W., Jobson, T., Westberg, H., Ramos, R., Hern_andez, F., Molina, L.T., Lamb, B., (2009): Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.,* 9, 7325-342

Velasco, E., Roth, M., Tan, S.H., Quak, M., Nabarro, S., Norford, L., (2013): The role of vegetation in the CO2 flux from a tropical urban neighborhood. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 10185-10202

Vicca, S., Serrano-Ortiz, P., De Boeck, H. J., Lemmens, C. M. H. M., Nijs, I., Ceulemans, R., Kowalski, A. S. y Janssens, I. A. (2007): Effects of climate warming and declining species richness in grassland model ecosystems: acclimation of CO2 fluxes. *Biogeosciences,* 4: 27-36

Ward, H. C., Evans, J.G., Grimmond, C.S.B., (2013): Multi-season eddy covariance observations of energy, water and carbon fluxes over a suburban area in Swindon, UK. Atmos. Chem. Phys. 13, 4645-4666

Watson, J., and J. Chow (2001): Estimating Middle-, neighborhood-, and urban-scale contributions to elemental carbon in Mexico City with a rapid response aethalometer, *Journal of the Air & Waste Management Association,* 1522–1528

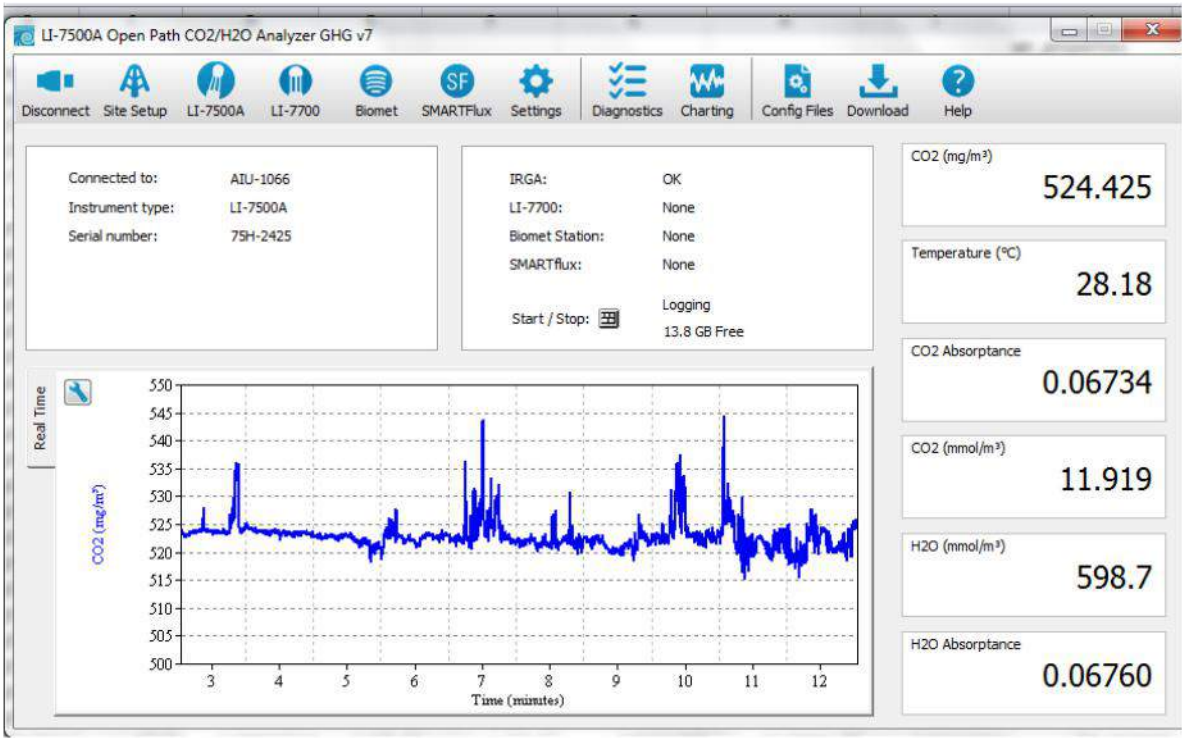
Wofsy, S. C., Goulden, M. L., Munger, J. W., Fan, S.-M., Bakwin, P. S., Daube, B. C., Bassow, S. L. y Bazzaz, F. A. (1993): Net Exchange of CO2 in a Mid-Latitude Forest. *Science,* 260: 1314-1317

Yang, F., K. He, B. Ye, X. Chen, L. Cha, S. Cadle, T. Chan, and P. Mulawa (2005): One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Sahngai, *Atmospheric Chemistry and Physics,* (5), 1449–1457

Apéndices

Eddy Pro

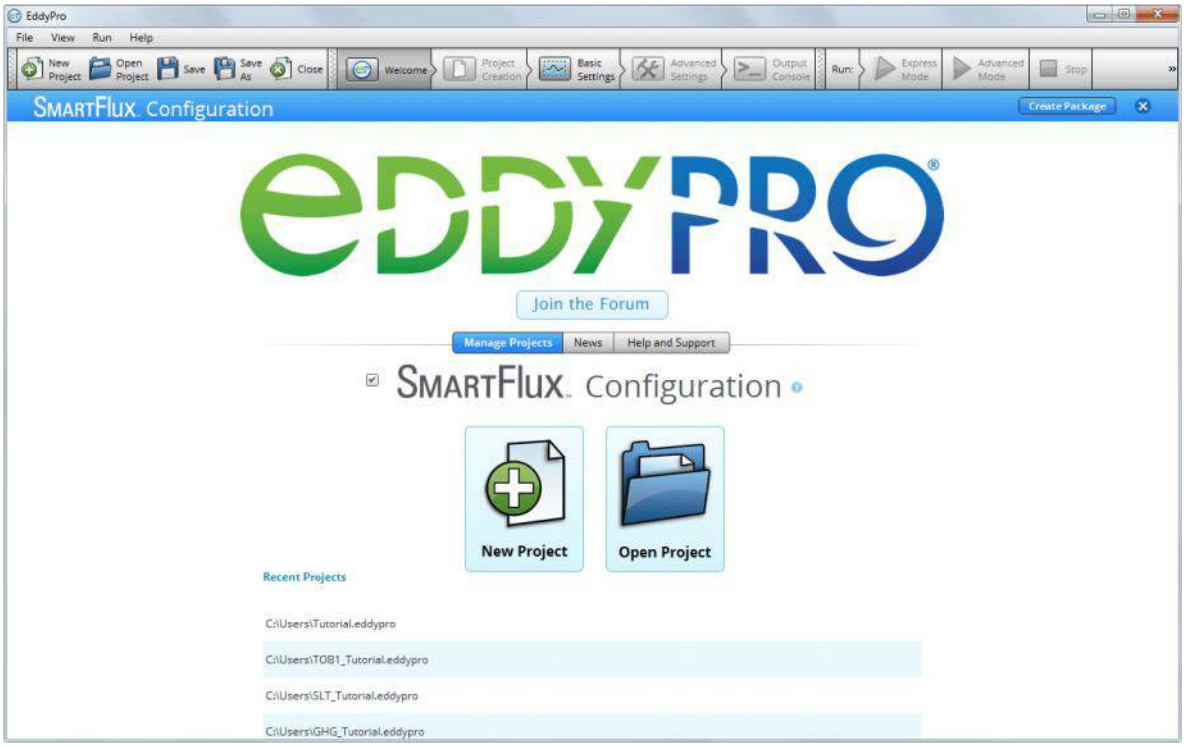
Eddy Pro versión 5 es el programa encargado de descargar la información de los analizadores que conforman la torre de flujos y realizar los cálculos de flujos de CO2, H2O y CH4. El programa tiene una interfaz interactiva que permite elegir las opciones de configuración de equipos para realizar los cálculos.

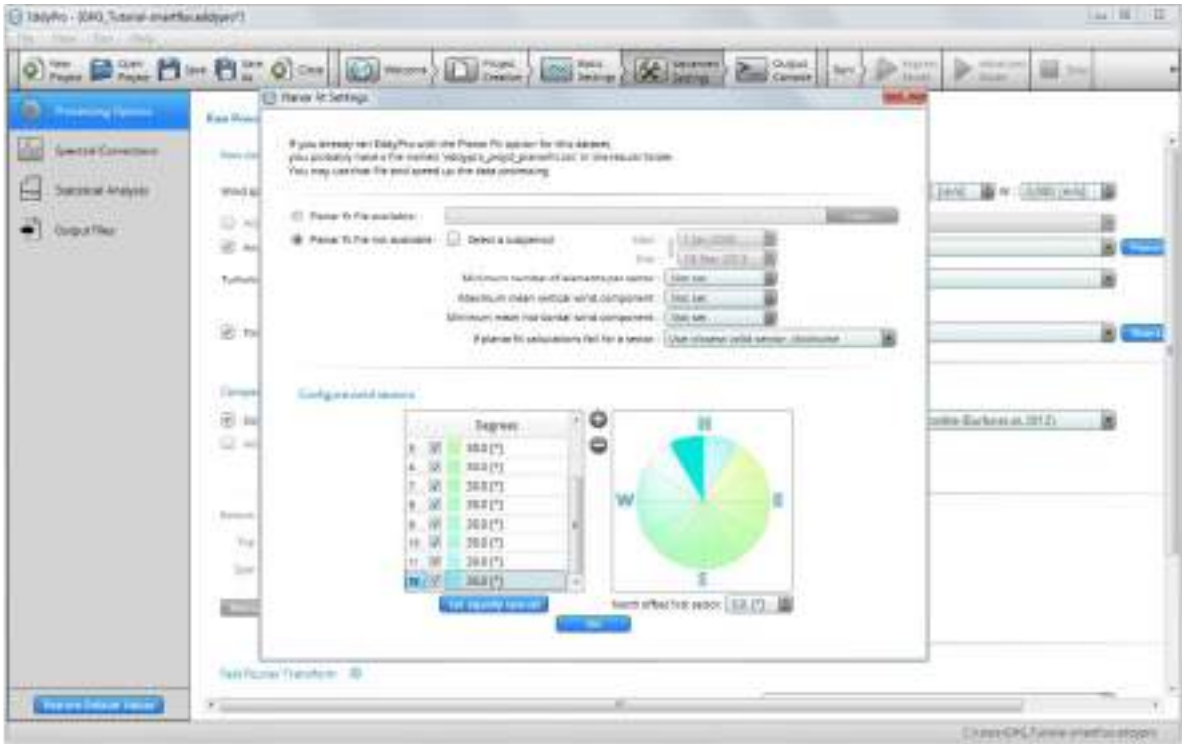


El programa es gratuito (*freeware*) y se puede descargar en la página web de LICOR (http://www.licor.com), así como los cursos tutoriales e información adicional. EddyPro es una aplicación de software de código abierto desarrollado, mantenido y apoyado por LICOR Biosciences. El software procesa los datos registrados del sistema Eddy Covariance (EC) y calcula los flujos de la biosfera y atmósfera de CO_2, H_2O, CH_4, otros gases traza y energía. EddyPro® está personalizado para procesar eficientemente datos registrados de los analizadores de gas LICOR® (archivos .ghg). También es compatible con otros tipos de archivo, incluyendo los datos almacenados como tablas ASCII, archivos binarios (incluyendo el formato TOB1), y formatos de SLT (EddySoft y EdiSol).

Procesar los datos requiere una larga secuencia de operaciones como filtrado de datos, calibración y otros algoritmos para calcular y corregir los flujos. Para muchos pasos del proceso están disponibles varias opciones. A pesar de muchos esfuerzos, la comunidad científica ha llegado a acuerdos definitivos en los que sugieren que estas opciones son las mejores. La solución de EddyPro® es proporcionar dos caminos para procesamiento de datos: modo de exprés (rápido) y avanzado. En el modo exprés, EddyPro® utiliza ajustes de procesamiento predeterminados que están bien establecidos y aceptados en la comunidad. Este enfoque reduce drásticamente la necesidad de interacción con el usuario, permitiéndole obtener los flujos en unos pocos pasos. El modo exprés es adecuado para la mayoría las configuraciones de covarianza turbulenta.

En modo avanzado, puede elegir cómo se aplican las correcciones y configuración de ajustes para adaptarse a sus necesidades de investigación, por lo que es la elección correcta para los datos adquiridos en las situaciones que se desvían de los arriba mencionados. El uso efectivo del modo avanzado requiere tanto un cierto nivel de comprensión de la teoría de la EC y una interacción más profunda con el software.





Analizador termoóptico de celda culombimétrica (UIC)

El carbono se determina en un analizador UIC modelo CM5014. Consiste en un horno que opera a temperatura constante, donde se coloca la muestra dentro de una corriente de O_2. El producto de la oxidación de los compuestos de carbono en la muestra se analiza por coulombimetría en una celda (culombímetro) con monoetanolamina (metm) y un indicador colorimétrico de pH. El equipo proporciona una determinación absoluta de carbono en cualquier corriente que contenga gas CO_2. El detector del culombímetro puede cuantificar carbono en un intervalo de 0.01 µg a 100 mg (UIC, 2006).

La temperatura de cuantificación de carbono total (CT) es 900 °C y la del carbono orgánico (CO) 450 °C. El carbono elemental (CE) corresponde con la diferencia entre el CT y el CO, en el intervalo de temperaturas de 900-450° C (Johnson et al, 1998):

$$\boldsymbol{CN^{450-900} = CT^{900} - CO^{450}}$$

UIC, Inc., (2008), Carbon dioxide coulometer Aplication Note 1, *Joillet,* Il, US, p. 4

Johnson K., Dickson A., Eischeid G., Goyet C., Guenther P., Key R., MIllero F., Purkerson D., Sabine C., Schottle R., Wallace D., Wilke R., and Winn C. (1998), Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: assessment of the quality of total inorganic carbon measurements made during the US Indian Ocean CO2 Survey 1994-1996, *Marine Chemistry,* 63, 21-13

Anexo 7 Emisiones de mercurio al sur de la Sierra Gorda de Querétaro

Resumen

Este informe presenta la suma de actividades realizadas para cumplir, según los Términos de Referencia, con los compromisos adquiridos en el proyecto Estudios de la calidad del aire y su impacto en el Centro de México (ECAIM).

Las actividades de referencia se pueden resumir en tres aspectos fundamentales:

1. Modelación de las trayectorias de campos de viento utilizando el sistema de modelación regional atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF, por sus siglas en inglés).
2. Medición de mercurio atmosférico de forma continua y en tiempos similares.
3. Obtención del mercurio total en aire y en depósito húmedo relacionado con los diferentes escenarios influenciados por la emisión de mercurio ambiental como resultado de la producción de mercurio y su impacto hacia otras regiones dentro del concepto de cuenca atmosférica.

La falta de una red mínima confiable de estaciones para una medición continúa a largo plazo del mercurio elemental gaseoso-vía húmeda y su correlación con parámetros meteorológicos para evaluar adecuadamente la dispersión y distribución, afecta particularmente pronósticos de impacto a largo plazo, que además requieren mayor resolución espacial.

Dado que en nuestro país, un productor industrial, son numerosos los productos que contienen mercurio, las vías de liberación de este elemento son y han sido catalogadas como potencialmente tóxicas.

A este documento se han integrado elementos conceptuales de gran utilidad para conocer la dispersión de las emisiones locales de mercurio y las trayectorias hacia ciudades aledañas.

Una revisión histórica de las bases de datos meteorológicos de las estaciones de la Comisión Estatal del Agua y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), establecidas alrededor de la región de San Joaquín, Qro., reveló grandes dificultades en la red de estaciones climatológicas. La falta de una red mínima confiable de estaciones de superficie para evaluar adecuadamente la meteorología, afecta particularmente pronósticos de mayor resolución espacial.

Palabras clave: mercurio elemental; depósito húmedo; San Joaquín; modelo WRF; dispersión mercurio.

Introducción

En este estudio se presenta una evaluación de la emisiones de mercurio, su distribución y migración en el municipio de San Joaquín en donde doscientos años de minería han convertido a San Joaquín, Querétaro en el "lugar más afectado por mercurio en nuestro país", desde una perspectiva más general, el trabajo realizado por el Dr. Gilberto Hernández del Centro de Geociencias de la UNAM, realizó un muestreo regional que constó con el registro de más de 100 lugares, con una estrategia orientada a entender los procesos geoquímicos en suelo, resultado de este intenso trabajo, publico un mapa de la distribución de mercurio total en suelos, sedimentos y terreros (Álvarez y Toscano, 1997).

El área de estudio abarca 170 km^2 aproximadamente; está delimitada por el concepto de cuenca hidrográfica y se encuentra integrada por nueve microcuencas que confluyen hacia el río Extóraz.

La Sierra Gorda queretana es parte de la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental compuesta por numerosas formaciones marinas mesozoicas deformadas y plegadas. La región de estudio está enclavada en la parte centro meridional de la Sierra Gorda. Estructuralmente se caracteriza por pliegues anticlinales y sinclinales noreste-suroeste y por fallamiento normal preferentemente este-oeste. Su columna litoestratigráfica está representada por varios eventos: a) sedimentos calcáreo-terrígenos de la formación Trancas del Jurásico; b) las calizas de plataforma de las formaciones El Doctor/El Abra; c) facies equivalentes de cuenca, de las formaciones Tamaulipas/Cuesta del Cura del Cretácico inferior, y d) sedimentos calcáreo-terrígenos de las formaciones Méndez/Soyatal del Cretácico superior. Las formaciones cenozoicas están representadas por pequeños depósitos de conglomerados (formación El Morro) y por un magmatismo (intrusivos grano dioríticos y volcanismo andesítico) más reciente (Hernández-Silva *et al.,* 2012). Al sur de la Sierra Gorda existen importantes yacimientos de cinabrio en función del gran territorio mesoamericano. La minería subterránea del cinabrio en la Sierra Gorda tiene una larga historia para la región mexicana; se le ha datado al menos desde el año 100 a.C.

En los años 2006 a 2009, el Centro de Geociencias de la UNAM y el Instituto Geológico de Hungría (MAFI) emprendieron, en el marco del tratado intergubernamental bilateral México-Hungría, el proyecto "Investigación de sitios mineros prehispánicos y modernos en el área de San Joaquín y su efecto en el ambiente y la salud pública", enfocado en mayor parte a tareas geológicas para realizar mapas georeferenciados de la distribución minera en suelo, sedimentos y terreros. La parte mexicana estuvo a cargo del muestreo regional de campo (con una contribución parcial de investigadores húngaros).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) estableció, en el año 2012, un compromiso internacional con el Joint Research Centre (JRC) para participar en el Sistema de Observación Global de Mercurio (GMOS,

por sus siglas en ingles). El compromiso comprendió la instalación de una estación de monitoreo de mercurio en aire ambiente y en depositación húmeda en las instalaciones de la Unidad Académica Sisal de la Universidad Nacional Autónoma de México, localizada en Sisal Yucatán. Adicionalmente a los esfuerzos internacionales, en México se pretende conocer el impacto de las emisiones de mercurio a partir de determinar su producción y concentraciones ambientales.

En este proyecto se presentan la selección de sitio de monitoreo basado en los criterios del National Atmospheric Depositon Program (NADP) y, en la, modelación de meteorología, los resultados de medición de mercurio y su posible impacto local y regional por dispersión de emisiones generadas en las actividades de producción.

7.1 Antecedentes

En 2009 se reportaron los resultados de suelo con base a las actividades mineras, los datos obtenidos correspondieron a 103 sitios de muestreo georreferenciados (Hernández *et al.,* 2005). Las muestras de los materiales se hicieron de acuerdo a diferentes usos del suelo: 1) Suelo en sitio prehispánico; 2) en vegetación secundaria; 3) forestal; 4) agrícola; 5) terrero + suelo; 6) terrero solo; 7) terrero tipo skam; 8) sedimento; 9) mina moderna; 10) mina prehispánica, y 11) mina prehispánica + moderna.

La concentración del mercurio fue determinada utilizando un equipo AMA-254, específico para el mercurio, en el Instituto Geológico de Hungría (MAFI). Para determinar el modelo de dispersión del mercurio, se elaboró un mapa mediante el uso de una microestación, con datos compilados en el MAFI por el programa MGE de Intergraph y convertidos después a un formato ArcView 3.2 en el Centro de Geociencias de la UNAM (Hernández *et al.,* 2005). Los resultados mostraron concentraciones por encima de los niveles fijados por la Organización Mundial de la Salud (OMS): la del fondo ambiental es de 2 a 4 ng/m^3 y en ciudades de 10 ng/m^3 (OMS, 2005).

Un primer resultado del análisis fue obtener la correlación entre las muestras y el contexto geológico. Las muestras tomadas en la vecindad de las minas arrojaban valores altos en el contenido total de mercurio, y a mayor distancia de los yacimientos el valor decrece hasta el rango entre 2.5 y 25 mg/kg, que es el del fondo regional. Gilberto y colaboradores (2009) concluyeron que una de las principales fuentes de mercurio fue la cercanía a las minas y a fenómenos asociados a procesos naturales como el intemperismo y la erosión.

En el año 2012 se obtuvieron los primeros resultados de monitoreo de mercurio atmosférico realizado en la Unidad Académica Sisal, Yucatán, seleccionada como sitio de fondo, ya que se localiza fuera del impacto de la actividad urbana, en una zona costera del estado donde se puede ver un corredor de sistemas de dunas y estuarios. Las concentraciones detectadas de mercurio atmosférico estuvieron en un rango de 0.50 a 2.82 ng/m^3, y una concentración promedio anual de 1.047 ± 0.271 ng/m^3.

El conocimiento actual sobre la presencia de mercurio en diversas matrices ambientales de la zona, tiene como antecedentes diferentes proyectos de naturaleza interdisciplinaria que han contemplado la colaboración entre instituciones académicas locales, nacionales y extranjeras en la zona de San Joaquín, Querétaro. Estos estudios sólo se han centrado en la contaminación por mercurio en suelos y agua, y en su impacto en la salud pública, derivado de un contexto de minería prehispánica y moderna. De ahí la importancia de integrar la medición de mercurio atmosférico y en depósito húmedo, debido a su efecto tóxico a corto y largo plazos.

7.2 Objetivos

7.2.1 Objetivo general

Determinar la distribución y migración del mercurio respecto de la deposita-ción húmeda y en su fase gaseosa, en el área de San Joaquín, Querétaro.

7.2.2 Objetivos particulares

En esta última fase del proyecto se plantearon los siguientes objetivos:

1. Realizar mediciones continuas de mercurio atmosférico y deposita-ción húmeda en el sitio de muestreo de mayor influencia de acuerdo al modelo WRF.
2. Estimación cualitativa de la dispersión de emisiones de mercurio en San Joaquín mediante la generación de trayectorias, empleando la meteorología con modelación, con lo que se podrá establecer cuáles son las ciudades impactadas.
3. Estimación cuantitativa de la dispersión de mercurio con el modelo Calpuff para determinar la influencia de las emisiones en la región, considerando los procesos de dispersión y transformación de las emisiones proveniente de la producción de mercurio en el municipio de San Joaquín, Querétaro.

7.3 Diseño experimental

7.3.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La región de San Joaquín está ubicada al sur de la Sierra Gorda de Querétaro. Es uno de los 18 municipios que forman esa entidad. Tiene una superficie de 212 km², que representan aproximadamente 1.8% de la superficie estatal. Se localiza entre los 20° 51' 36" y los 21° 03' 33" de latitud norte y entre los 99° 27' 28" y 99° 38' 25" de longitud oeste, en el centro-noreste del estado. Colinda, al noroeste, con el municipio de Pinal de Amoles; al norte, con Jalpan de Serra, y al poniente y al sur con Cadereyta, que pertenece a la cuenca hidrológica del río Moctezuma (**Figura A07-1**).

Figura A07-1 *Ubicación de la región de San Joaquín, Querétaro. Información de marco estadístico de INEGI 2013.*

En San Joaquín se han registrado actividades relacionadas con la explotación y manejo del cinabrio desde el siglo IV. A partir de 1930 y especialmente en las décadas de los años cincuenta y sesenta del siglo XX, se presentó una bonanza en la producción primaria de mercurio, y esta entidad se convirtió en el primer productor nacional de ese metal (Carrillo-Martínez, 1997).

7.4 Método

Para conocer el impacto de las emisiones de mercurio de la región se efectuaron las siguientes actividades:

- Selección del sitio de muestreo.
- Estimación de las emisiones de mercurio mediante el conocimiento del proceso realizando entrevistas a mineros.
- Recorridos sistemáticos.
- Trabajo de campo en las minas.
- Revisión bibliográfica.
- Modelación de las condiciones meteorológicas para elegir el sitio de monitoreo que sirvió de base para la identificación de trayectorias y para la modelación de la dispersión de emisiones.
- Mediciones de mercurio en el sitio.

Cabe señalar que en México no hay normatividad con respecto a valores emitidos y/o presentes en aire ambiente para mercurio o sus compuestos. Sin embargo, como valor guía, se considerarán los valores máximos permitidos, propuestos por el Air Resources Board de California en su *Consolidated Table of OEHHA / ARB Approved Risk Assessment Health Values* (OEHHA/ARB, 2014).[1] Los niveles de exposición de referencia correspondientes para mercurio y sus compuestos inorgánicos se especifican en la **Tabla A07-1.** Cabe mencionar que los valores que se presentan fueron revisados o impuestos en diciembre de 2008 y corresponden a valores máximos para efectos diferentes del cáncer.

Tabla A07-1 Normatividad aplicable; valores de referencia para exposición humana a mercurio y sus compuestos (OEHHA/ARB, 2014)

Tipo de exposición	Valor límite ($\mu g/m^3$)
Inhalación aguda	0.6
Inhalación durante 8 horas	0.06
Inhalación crónica	0.03
Crónico oral	0.16

La **Tabla A07-1** no incluye un valor para la exposición horaria, a la vez que CALPUFF no puede determinar concentraciones para períodos menores a una hora. Sin embargo, para fines de comparación, se puede determinar un valor límite horario aproximado como el promedio del valor límite para exposición aguda durante 15 minutos y el valor crónico de inhalación durante los 45 minutos restantes, dando un valor límite horario aproximado de 0.17 µg/m3.

A continuación se describen las actividades desarrolladas

7.4.1 SITIO DE MUESTREO

Se seleccionó el sitio de muestreo aplicando los criterios de protocolos de operación del National Atmospheric Deposition Program (NADP) que contempla la distribución fisiográfica del sitio. Se diseñó y construyó la caseta de monitoreo; se planifico el monitoreo, y se instalaron el analizador automático de vapor de mercurio Tekran Modelo 2537A (**Figura A07-2**), la estación meteorológica Avantage Plus 2 y el colector automático de lluvia (Andersen, General Metal Works, Inc.) wet/dry Andersen modelo 78-100 (**Figura A07-3**), utilizado para la colección de la precipitación pluvial. Cada uno de los instrumentos fue calibrado para obtener calidad (exactitud, precisión, representatividad y comparabilidad) en la información de los resultados.

[1] Disponible en http://www.arb.ca.gov/toxics/healthval/contable.pdf

El analizador automático de vapor de mercurio Tekran Modelo 2537A, realiza medidas continuas de mercurio gaseoso total (TGM) en el aire ambiente con una actualización de 2.5 minutos y un límite de detección de 0.1 ng/m³. El TGM es la suma del mercurio elemental gaseoso (Hg^0; GEM) y de los gases de mercurio oxidado (GOM); ambos constituyen las especies orgánicas e inorgánicas de mercurio gaseoso. El Hg^0 constituye la especie dominante de mercurio, que representa generalmente el 98% de la concentración del mercurio total en el aire ambiente en sitios control.

El instrumento utiliza la técnica de amalgamación para atrapar el mercurio gaseoso del aire de acuerdo al método utilizado por la Agencia de Protección Ambiental (por sus siglas en inglés, Environmental Protection Agency-USEPA, 1999), Method IO-5 "Sampling and Analysis of Vapor and Particulate Phase Mercury in Ambient Air Utilizing Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry". El analizador automático de vapor de mercurio determina con exactitud el volumen de aire que pasa a través de un cartucho que contiene un adsorbente (una superficie de oro), en la que todo el mercurio gaseoso se absorbe cuantitativamente. Posteriormente el mercurio adsorbido en el cartucho se desorbe por calentamiento como GEM (Hg^0) y es cuantificado por Espectrometría de Fluorescencia Atómica por Vapor Frío (CVAFS). La cantidad de Hg^0 está en función de la respuesta del detector, el cual debe ser previamente calibrado con cantidades conocidas de Hg^0 vapor.

La precisión de la medición depende de la exactitud de la calibración y de las mediciones de volumen de aire. Se utilizan controladores de flujo másico o medidores de flujo para determinar el volumen de aire. La concentración TGM se presenta como ng/m³ de Hg^0, a cierto volumen, presión y temperatura. Los instrumentos CVAFS son muy sensibles y requieren argón ultrapuro (99.998% o más) como gas de transporte, donde el Hg ha sido eliminado mediante una trampa de arena cubierta con oro.

Figura A07.2 Instalación y operación del analizador automático de vapor de mercurio Tekran Modelo 2537A.

Figura A07-3 Colector Automático de lluvia (Andersen, General Metal Works, Inc.) wet/dry, modelo 78-100.

La caseta de monitoreo, se encuentra en las coordenadas 20° 54' 41" N, 99° 24' 13" W, en una zona rural boscosa que tiene una altitud promedio de 2488 msnm. Los resultados de mercurio atmosférico se realizan durante las 24 horas del día, con mediciones analizadas en línea y en tiempo real, con el objeto de determinar la variación estacional y espacial. Los resultados se evalúan también semanal y mensualmente para asegurar la calidad. Por ello es importante considerar la implantación de iniciativas de monitoreo a largo plazo, ya que proporcionan información más sólida sobre las tendencias en los niveles de permanencia y persistencia de mercurio. Esto permitiría la detección de cambios en la dispersión y distribución espacial y temporal de mercurio atmosférico, con la finalidad de generar información técnica que contribuya al conocimiento y entendimiento del transporte del mercurio a nivel local, regional y global, con miras a establecer políticas públicas para la reducción de sustancias indeseables en el ambiente.

7.4.2 MÉTODO PARA ESTIMACIÓN CUANTITATIVA DE EMISIONES

Los modelos de dispersión dependen de información de la fuente de emisión y de las condiciones meteorológicas. En el caso de datos de la fuente se requiere conocer la emisión (masa/tiempo), la altura de la chimenea, velocidad de salida, temperatura y presión de los gases de escape para el caso de emisiones puntuales. En el caso de las condiciones meteorológicas se requiere conocer la velocidad y dirección del viento, la estabilidad, la altura de capa de mezclado, humedad y temperatura ambiente. Usando como caso de ejemplo el modelo de dispersión Gaussiana tenemos que la concentración en superficie en el punto x,y se estima:

$$C(x,y,0)=\frac{Q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}e^{\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right)}e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)}$$

Despejando Q de la ecuación anterior se puede estimar lo que se considera como el factor de dilución:

$$(C/Q)=\frac{1}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}e^{\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right)}e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)}$$

Como se puede observar el factor de dilución depende de la distancia al punto receptor (x,y), la altura efectiva de chimenea (h) y de las condiciones meteorológicas ( ). Mediante el empleo del Calpuff se puede estimar el factor de dilución de cada una de las fuentes de emisión en los puntos receptores para cada hora durante el periodo de muestreo. Con las emisiones y los factores de dilución se puede estimar la concentración de la siguiente manera:

$$C_r=\sum_{i=1}^{n}E_i(C/Q)_i+C_f$$

Donde:
C_r es la concentración en el sitio receptor, E_i es la emisión, $(C/Q)_i$ es el factor de dilución del sitio *i* respectivamente, esto es para una hora dada y C_f es la concentración de fondo.

La ecuación anterior es útil para identificar la emisión de cada fuente a partir de la concentración medida en el sitio receptor y el factor de dilución estimado desde cada sitio. El número de sitios de emisión está determinado por el número de mediciones. En este proyecto se tienen las mediciones de mercurio para un periodo dado. Por otra parte, se conocen los sitios de las posibles fuentes y, a partir de la modelación de la meteorología y mediante el empleo del Calpuff, se puede estimar el factor de dilución de cada fuente.

Para cada sitio de emisión se corre el Calpuff. Por ello, se requiere primero identificar el origen de las posibles fuente de emisión basándonos en las trayectorias retrasadas en el tiempo para un periodo de muestreo. Finalmente, los pasos a seguir son identificar las fuentes de emisión y hacer las modelaciones para los sitios, para posteriormente desarrollar el sistema de ecuaciones y con ello identificar las emisiones posibles de cada sitio que contribuyen con las concentraciones medidas en los sitios receptores.

A continuación se describen las acciones realizadas para identificar las fuentes de emisión y hacer las modelaciones. Empleando el modelo WRF y el Calpuff con el objeto de estimar las emisiones de mercurio en la región.

Se aplicó el siguiente procedimiento:

1. Identificar las posibles fuentes de emisión de Hg en la región.
2. Ubicar los sitios de monitoreo de Hg como sitios receptores en el domino de modelación.
3. Identificar de forma cualitativa, mediante el uso de trayectorias retrasadas y vientos del WRF, las fuentes que podrían contribuir con emisiones a los sitios receptores.
4. Mediante el uso del Calpuff se identificó cuantitativamente la contribución relativa de las fuentes identificadas previamente.

Con el propósito de entender cómo se desarrollan y operan los modelos WRF y Calpuff, se describen en los dos apartados siguientes:

MODELO: WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

El WRF (Weather Research and Forecasting) es un sistema numérico de pronostico del tiempo a mesoescala, no-hidrostático, desarrollado para aplicarse en modo pronóstico para el estudio de fenómenos meteorológicos. Lo desarrollaron NCAR (National Center of Atmospheric Research), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NCEP (National Centers for Environmental Prediction), FSL (Forecast Systems Laboratory), AFWA (Air Force Weather Agency), y FAA (Federal Aviation Administration). La **Figura A07-4** muestra el diagrama de flujo del modelo WRF, donde se observan 4 pasos fundamentales para obtener una simulación numérica.

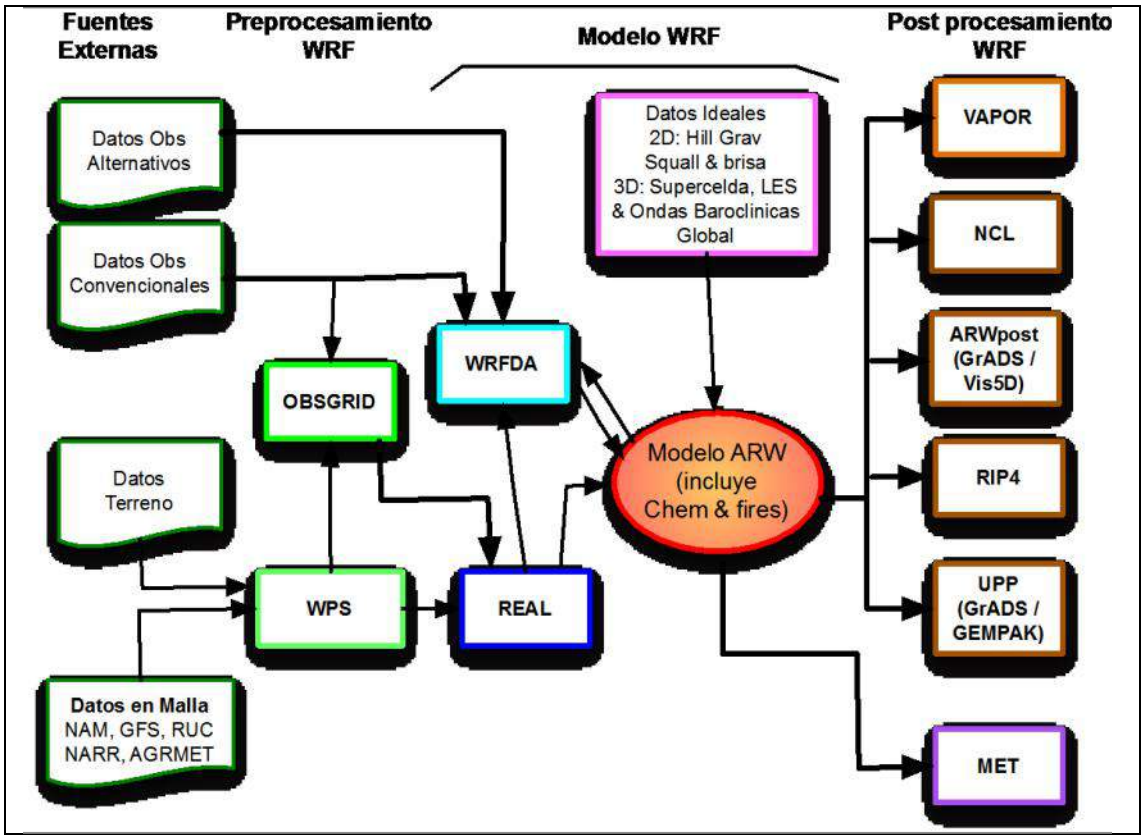


Figura A07-4 *Diagrama de flujo del modelo WRF 3.0. Tomada de Skamarock et al., 2008.*

MODELO: CALPUFF

Calpuff es un sistema avanzado de modelación meteorológica y de calidad del aire creado el Grupo de Estudios Atmosféricos de TRC Solutions, que lo desarrolla y distribuye. La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA) usa este modelo en su *Guía para Modelos de Calidad del Aire* para la evaluación de transporte de contaminantes a gran escala y como base para aplicaciones determinadas que involucran condiciones meteorológicas complejas. Calpuff corre en terrenos planos. Puede hacerlo también en sitios con condiciones topográficas complejas (elevaciones de alta

montaña), con información importada de un modelo digital de elevación. Tal es el caso de la región de San Joaquín, localizada en una zona con relieve accidentado.[2]

Forman el modelo tres componentes principales y un conjunto de programas de pre y postprocesamiento que a continuación se describen:

- **Calmet:** módulo meteorológico donde se desarrollan los campos horarios de viento y temperatura en el dominio de modelación en una malla tridimensional. Contiene además parametrizaciones de flujos de las laderas, efectos cinemáticos y del bloqueo del terreno, un procedimiento de minimización de la divergencia y un modelo micrometeorológico para las capas límites sobre tierra y agua. En el archivo producido por Calmet se incluyen los campos bidimensionales asociados como la altura de mezclado, las características de la superficie y sus propiedades de dispersión.
- **Calpuff:** es el modelo de transporte y dispersión lagrangiano, gaussiano, no estacionario, que contiene los módulos donde se estiman los efectos del terreno complejo, del transporte sobre agua, de la depositación seca y húmeda, y de las transformaciones químicas simples. El modelo advecta *"puffs"* o bocanadas del material emitido desde fuentes modeladas, simulando procesos de dispersión y transformación en el camino. Típicamente usa los campos generados por Calmet, o como opción puede usar datos meteorológicos más simples muy similares a modelos de plumas existentes. En la distribución resultante de *"puffs",* a lo largo del periodo simulado, incorpora explícitamente variaciones temporales y espaciales de los campos meteorológicos. Los archivos de salida de Calpuff contienen concentraciones o flujos de depositaciones horarias evaluadas en los puntos receptores seleccionados.
- **Calpost:** módulo de postprocesamiento de los archivos de Calpuff. Genera las tablas que resumen los resultados de la simulación, identificando por ejemplo la ubicación de las concentraciones máximas. Cuando se realizan modelaciones relacionadas a visibilidad, Calpost usa concentraciones de Calpuff para calcular coeficientes de extinción y mediciones relacionadas a visibilidad, reportándolas para los tiempos promediados y sitios seleccionados.

Cada uno de estos programas tiene una interfaz gráfica. Hay, además, otros numerosos procesadores que pueden utilizarse para preparar datos geofísicos (como el terreno y uso de suelo), meteorológicos (como precipitación o datos provenientes de boyas), o interfaces a otros modelos como el MM5, WRF, modelos RUC o RAMS.

Algunos ejemplos de aplicaciones para las que el Calpuff puede resultar adecuado son:

[2] Para el montaje de la información topográfica, se obtuvieron, de www.webgis.com, los archivos *.dem correspondientes a la región que rodea el ingenio, y se convirtieron al formato requerido por Calmet, para después montarse en el modelo Calpuff.

- Impactos cercanos a superficies en flujos complejos o con situaciones de dispersión.
- Terrenos complejos.
- Condiciones de fumigación, inversión, recirculación y estancamiento.
- Transporte sobre el agua y condiciones costeras.
- Condiciones de vientos de baja velocidad o calma.
- Transporte a gran escala.
- Evaluaciones de visibilidad.
- Formación de contaminantes secundarios y modelamiento de partículas
- Para emisiones de área y de fuentes lineales (como incendios forestales o instalaciones de reducción de aluminio).

Para implementar Calpuff se efectuaron las siguientes actividades:

- Especificación de la zona de modelación y adecuación del modelo de elevación digital (DEM) del terreno correspondiente a la zona de estudio, así como montaje de la topografía del área en el preprocesador de terreno correspondiente, para su posterior uso en el modelo matemático de dispersión Calpuff.
- Obtención de mapas correspondientes al área de estudio en Google Earth.
- Adecuación de información meteorológica con el preprocesador meteorológico Calmet e introducción de los datos a Calpuff. Se emplearon datos meteorológicos medidos en superficie, así como salidas del modelo MM5 para tres diferentes periodos:
  - 3 al 24 de marzo 2011 (estudio exploratorio).
  - 7 días seleccionados en 2012 (determinación de la afectación hacia Querétaro).
  - 7 al 15 de marzo 2015 (calibración del modelo Calpuff).
- Especificación de las características físicas y emisiones de la chimenea e introducción al modelo Calpuff.
- Georreferenciación de las fuentes de emisión de mercurio en la zona, y ubicación de las mismas en los mapas y zona de modelación.

7.4.3 EXTRACCIÓN DE MERCURIO

Las minas emplean cinabrio como materia prima debido a que químicamente equivale a sulfuro de mercurio II (HgS), por lo que se pueden esperar emisiones de Hg y de SO_2.

Para determinar la emisión de Hg en los hornos artesanales, se emplearon factores de emisión obtenidos mediante un método de balance de masa (Li *et al.,* 2009). El factor de emisión se puede calcular de:

$$F = \frac{(O \text{ x } 10^{4} - S)\ (W \text{ x } 10^{-6}) - P}{P} \text{ x } 100\%$$

Donde:
F = factor de emisión de Hg, definido como la cantidad (kg) de Hg emitido al aire atmosférico por cada kg de Hg producido.
O = concentración de Hg en el cinabrio (%).
S = concentración de Hg en los desechos del proceso de producción (mg/kg).
W = la cantidad de cinabrio consumido en una carga del horno (kg).
P = producción de Hg por horno (kg).

Asimismo, la eficiencia o porcentaje de recuperación de Hg se puede determinar de:

$$R = \frac{P}{OW} \text{ x } 100\%$$

La producción controlada de mercurio se lleva a cabo alrededor de los yacimientos más importantes del mundo, ubicados en Almadén, España, e Idrija, Eslovenia.

Por otra parte, sin control, se explotan minas de pequeñas dimensiones principalmente en Rusia, China y México.

La recuperación de minerales de mercurio en México data de tiempos prehispánicos, y la de mercurio metálico comenzó en los primeros años del Virreinato.

El proceso varía en las diferentes minas. Predominan las de equipos artesanales, sin dispositivos de control y, en consecuencia, sumamente contaminantes, que están prohibidos por la Agencia de Protección Ambiental (USEPA 2000 por sus siglas en inglés).

En el proceso informal de producción de mercurio, el cinabrio triturado se cuece en un horno artesanal hecho con tubos de acero y ladrillos o adobes. Los hornos que se emplean actualmente en la región de San Joaquín consisten en una serie de tubos de 12 pulgadas de diámetro colocados dentro de una cámara de calentamiento, donde se aplica desde abajo el calor proveniente de la quema de combustibles. El mineral se coloca dentro de los tubos llenándolos hasta un poco menos de la mitad; se coloca una tapa de ladrillo que se sella con barro para evitar fugas de calor. Del lado opuesto de la tapa se encuentran los denominados tubos de condensación, cuyo diámetro es de 6 pulgadas; estos tubos se colocan en posición inclinada, de tal forma que desembocan en una cámara donde el vapor de mercurio es condensado con el aire ambiente en una vasija de barro —y en procesos más rudimentarios, puede ser incluso de plástico.

La cantidad de tubos en los hornos artesanales en San Joaquín varía generalmente entre 4 y 7, aunque se pueden tener hornos de hasta 10 tubos. La carga de cada uno es de aproximadamente 100 kg de cinabrio. El combustible empleado es principalmente leña, aunque también se usan, a veces, aceite quemado y gas.

Figura A07-5 *Horno artesanal y tubos de condensación.*

El proceso de cocción dura entre 8 y 10 horas. Los hornos no cuentan con chimenea; los gases migran al exterior por una abertura de 20 cm aproximadamente, en cualquier dirección según las condiciones meteorológicas. Los trabajadores de las minas visitadas indican que las temperaturas de cocción son de 300 a 400 °C, pero deben alcanzar más de 540 °C, que es la temperatura a la cual el Hg se evapora. Para la extracción de mercurio, el cinabrio (mineral extraido de la mina) se mezcla con cal para hacer más eficiente la combustión; para una carga de 100 kg de cinabrio, se pueden usar entre 5 y 8 kg de cal (**Figura A07-5**).

7.5 Resultados

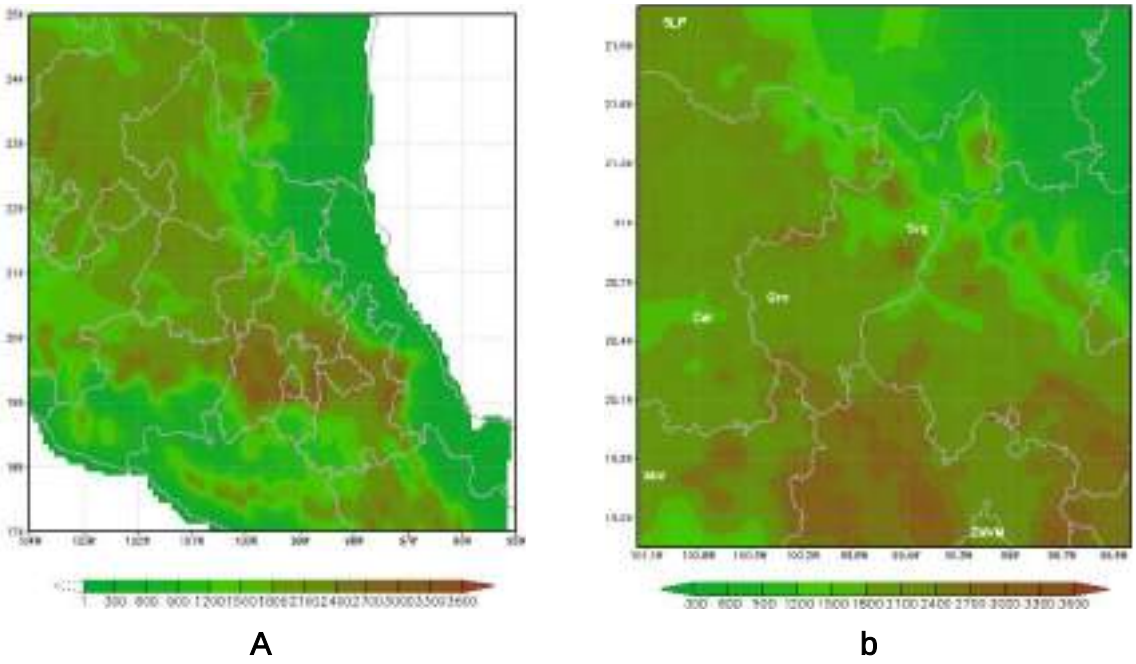
7.5.1 TRAYECTORIAS WRF

Se presentan resultados de la modelación (WRF) de campos de viento para identificar el sitio de monitoreo y conocer las trayectorias de las emisiones. Se identificó el área de influencia de emisiones de mercurio de la región de San Joaquín, con dos dominios de modelación: uno que abarca la mayor parte del país, y otro, con mayor resolución, que se aplicó para observar el impacto regional de las posibles trayectorias de emisiones de mercurio.

La **Figura A07-6a** muestra el área de modelación de dominio mayor, que tiene 80x80 celdas de 15 km. En la **Figura A07-6b** se muestra el dominio de modelación del dominio menor que incluye las ciudades de San Luis Potosí al noroeste, Querétaro al centro sur, Morelia al suroeste, Toluca al sur, y la ciudad de México. Este dominio posee 79x79 celdas de 5 km.

Para la estimación de las trayectorias se empleó el domino 2. Los resultados se presentan a continuación en figuras que muestran la topografía así como San Joaquín (SJq), Celaya (Cel), Morelia (Mor), Querétaro (Qro), Toluca

(tol), Tlaxcala (Tlax), San Luis Potosí (SLP) y la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Las áreas urbanas se delimitan en color gris. En la modelación de trayectorias de marzo de 2015., se observa que el área de influencia va hacia las ciudades de Querétaro y Celaya como se muestra en la Figura A07-7.



Figuras A7-6a y b *Área de modelación del dominio mayor (a) y domino interior (b) para trayectorias de emisiones; se presentan la topografía y la división política.*

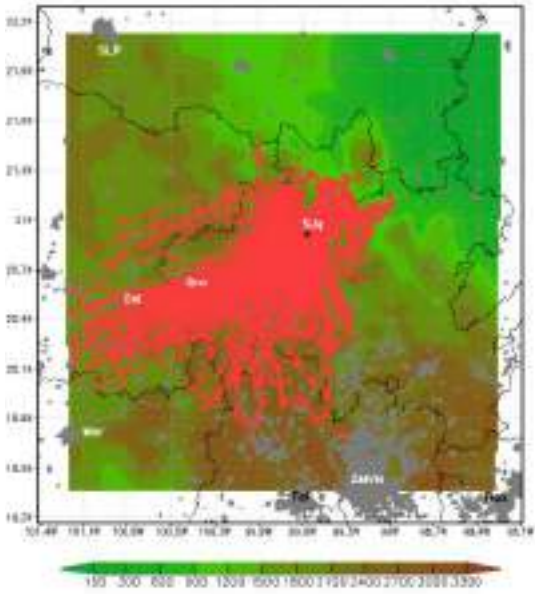


Figura A07-7 *Topografía, zona urbana y trayectorias horarias de las emisiones de San Joaquín durante marzo 2015. Cada punto representa una hora, el recorrido es de ocho horas a partir de San Joaquín.*

La información meteorológica empleada fue la de Análisis Final (NCEP FNL 2000). Se extrajeron aleatoriamente datos de 20 días del año 2012 para estimar las posibles regiones de influencia de emisiones. Después, de esos 20 episodios se seleccionaron los que influyeron sobre zonas urbanas, para realizar una modelación de dispersión de emisiones con Calpuff: Las fechas fueron: enero 13, enero 27, febrero 9, marzo 21, abril 17, abril 30, mayo 14, mayo 27, junio 10, julio 7, julio 20, agosto 16, agosto 30, septiembre 12, septiembre 26, octubre 9, noviembre 5, noviembre 16 y diciembre 17 (serie de **Figuras A07-8**).

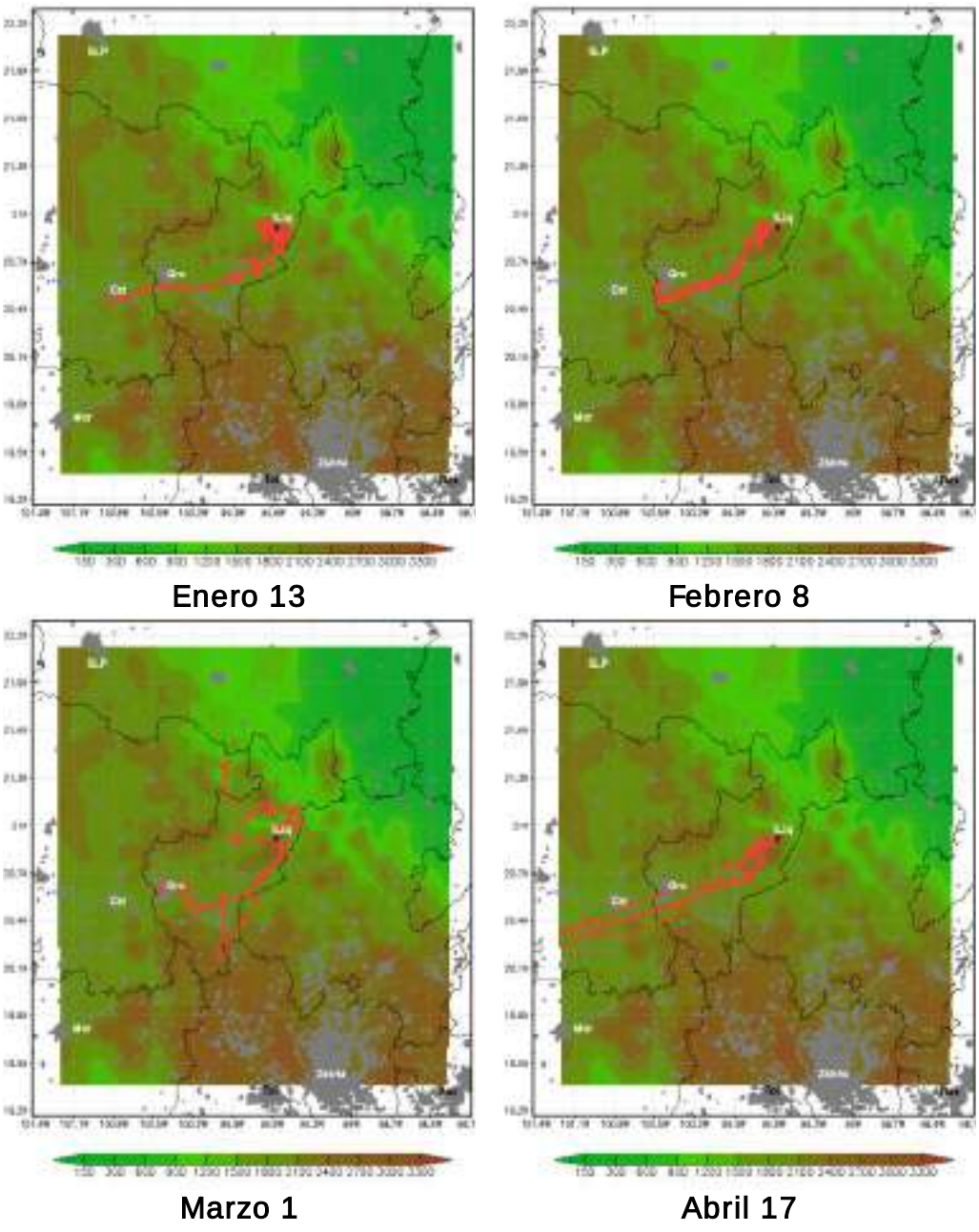


Figura A7-8 *Trayectorias del mes y días seleccionados; enero a abril.*

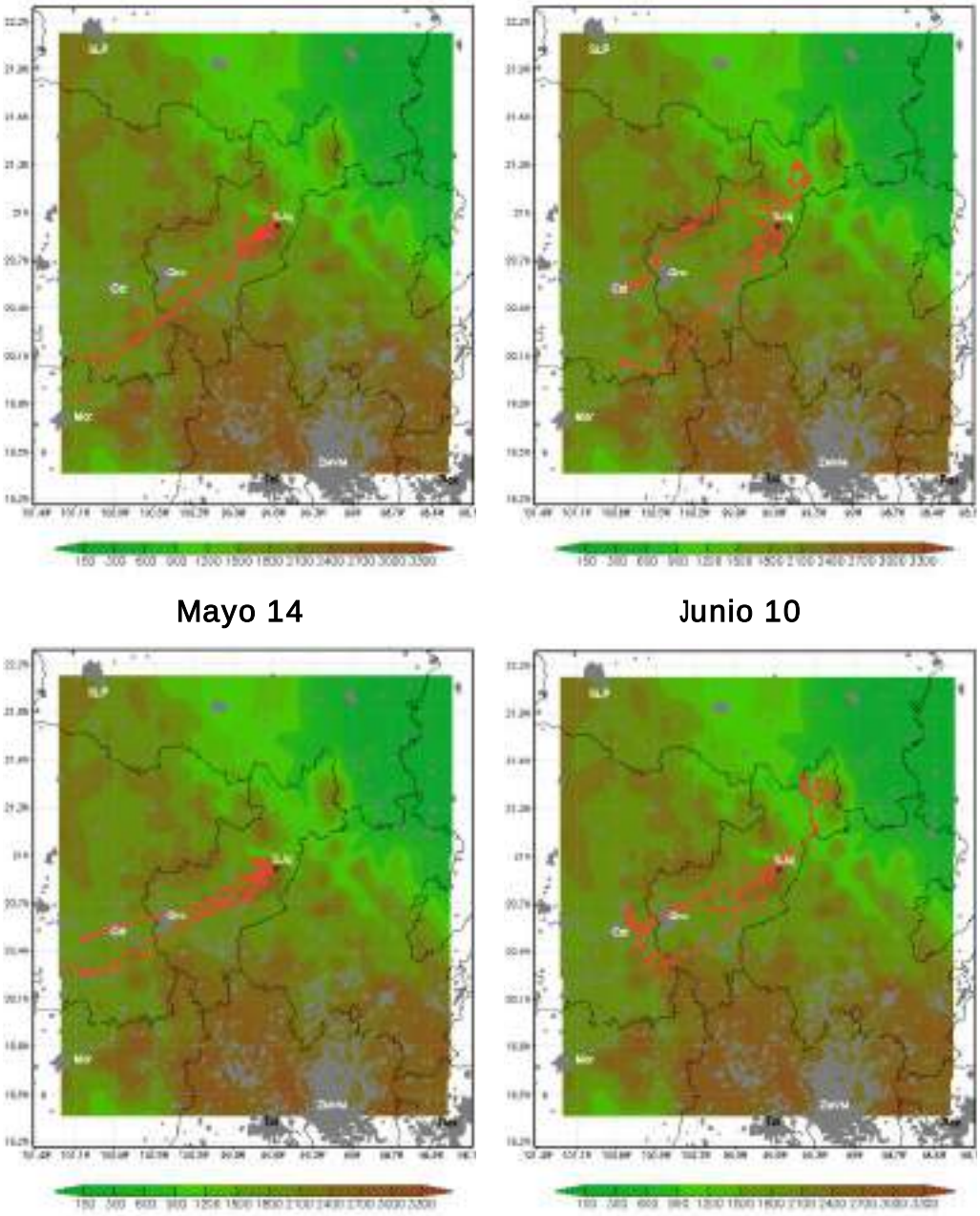


Figura A7-8 *Trayectorias del mes y días seleccionados; mayo a agosto.*

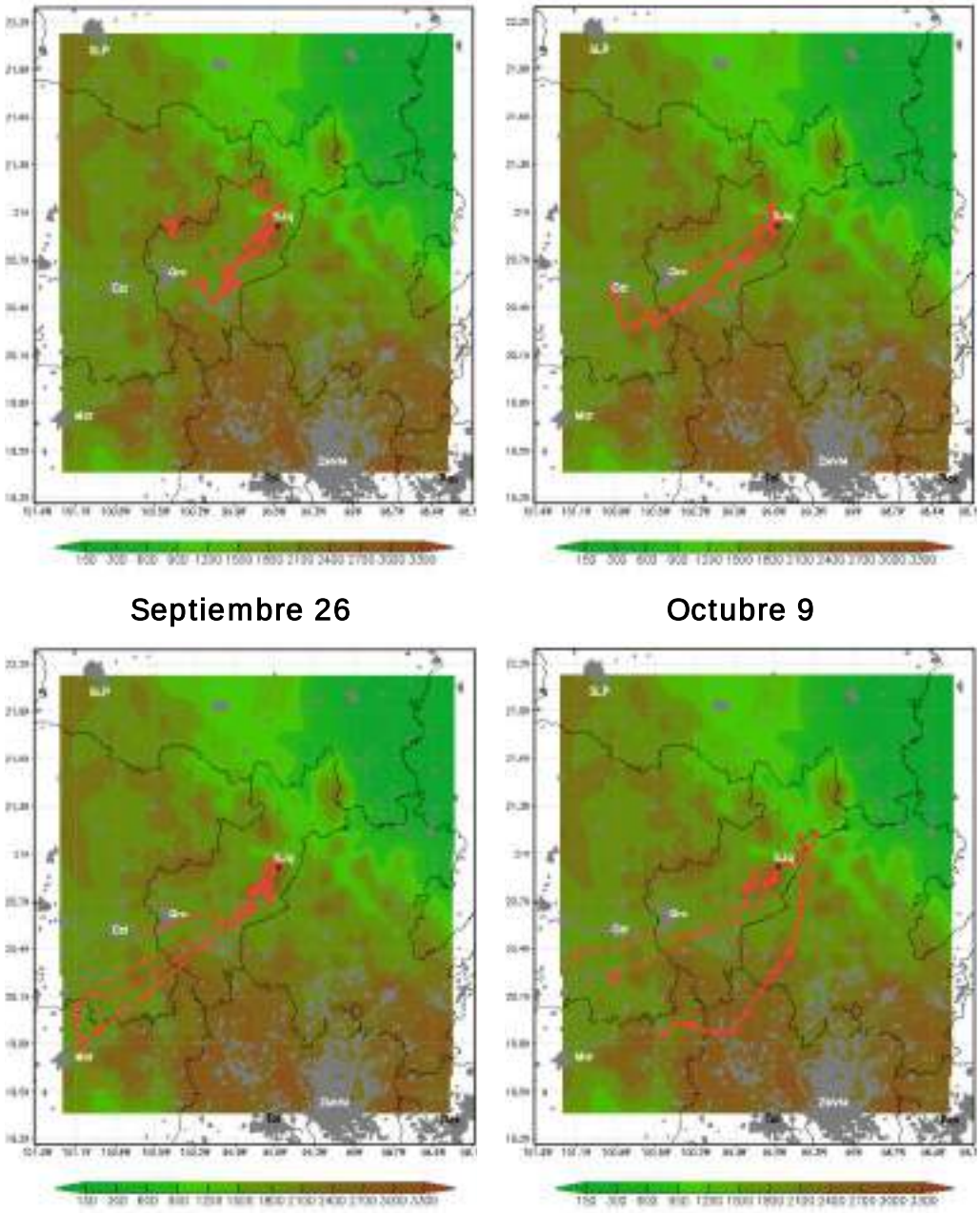


Figura A7-8 *Trayectorias del mes y días seleccionados; septiembre a diciembre.*

7.5.2 MODELO CALPUFF

PERIODO DEL 3 AL 24 DE MARZO (ESTUDIO EXPLORATORIO)

Las **Figuras A07-9a y b** presentan las concentraciones máximas horaria y diaria en la zona, durante el periodo de modelación entre el 3 y el 24 de marzo de 2011. Las concentraciones horarias máximas observadas son de alrededor de 130 ng/m^3, mientras que los valores diarios son de 8 ng/m^3.

La modelación preliminar nos permite ver el impacto de las mineras sobre la región y las zonas aledañas a las minas ya que se detectaron concentraciones altas, que pueden ser nocivas para la población local y aún más para los trabajadores de las mineras.

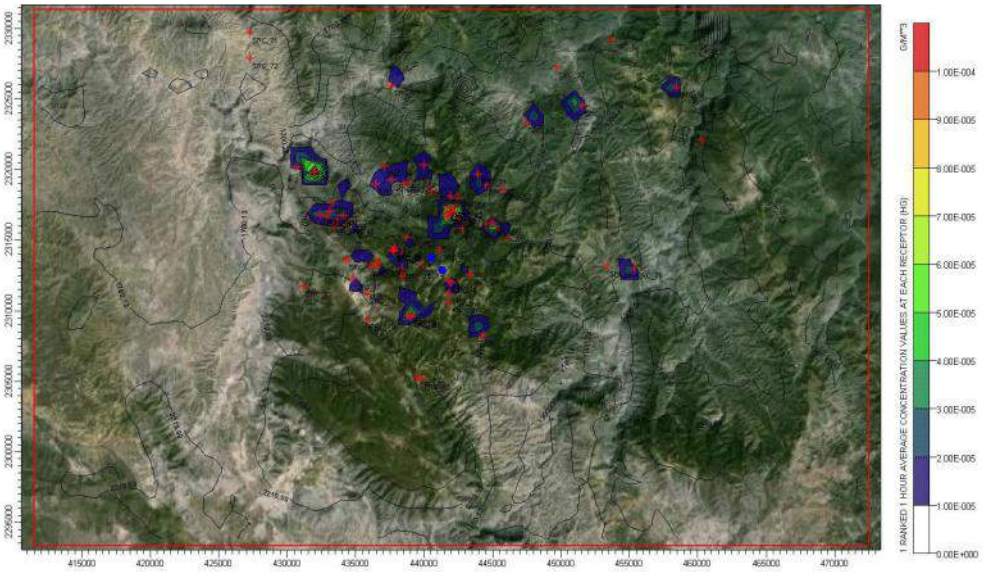


Figura A07-9a *Concentración horaria máxima de Hg encontrada en la zona, 3 al 24 de marzo de 2011.*

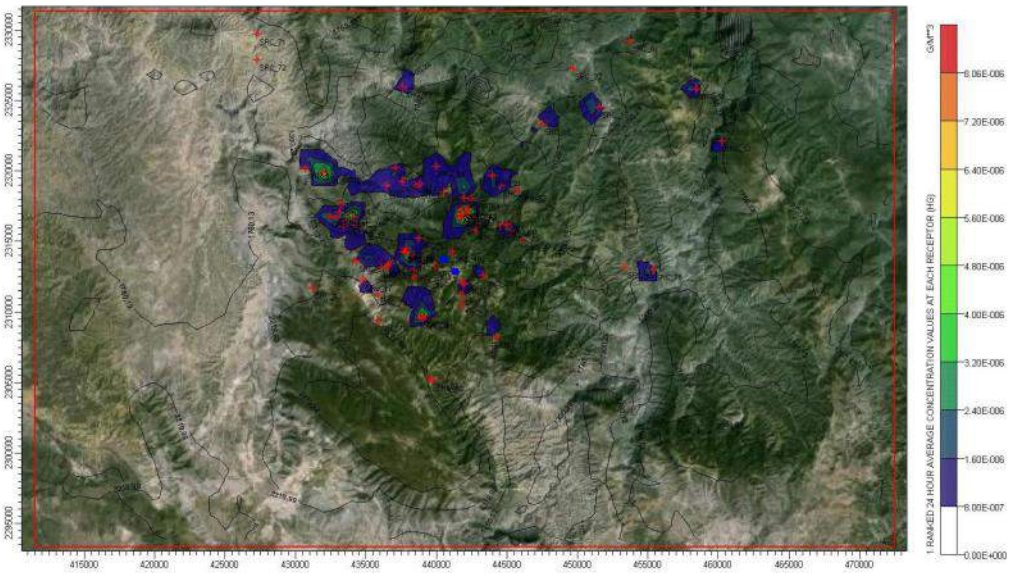


Figura A07-9b *Concentración diaria máxima de Hg encontrada en la zona, 3 al 24 de marzo de 2011.*

7 AL 15 DE MARZO 2015 (CALIBRACIÓN DEL MODELO CALPUFF)

- Un modelación durante el periodo comprendido entre el 7 y el 15 de marzo de 2015 para comparar los valores de concentración de Hg con los valores medidos, y así poder calibrar el modelo. Para este periodo se dividió la emisión calculada entre dos, de acuerdo con información recabada en las visitas de campo, en donde se encontró que el nivel de producción ha caído aproximadamente en un 50% en el último año.
- La modelación de la concentración de Hg durante 7 días de 2012, elegidos dentro de 20 días seleccionados aleatoriamente, como casos en donde la contaminación de la zona minera de San Joaquín de desplaza hacia el suroeste (Querétaro, Celaya) y noroeste (San Luis Potosí).

La **Figura A07-10** presenta la topografía de la región de modelación de la zona de estudio. Se indican las poblaciones cercanas; las minas que se consideraron en la modelación están indicadas con una cruz roja y los puntos de monitoreo de Hg dentro del poblado de San Joaquín con un punto azul. Presenta además la región de estudio tomada en cuenta para analizar la afectación local de las minas de mercurio dentro de las comunidades en donde funcionan. Este dominio reducido incluye 61 x 38 celdas de 1 km2 y tiene su origen en el punto con coordenadas UTM (41518, 2293319 14).

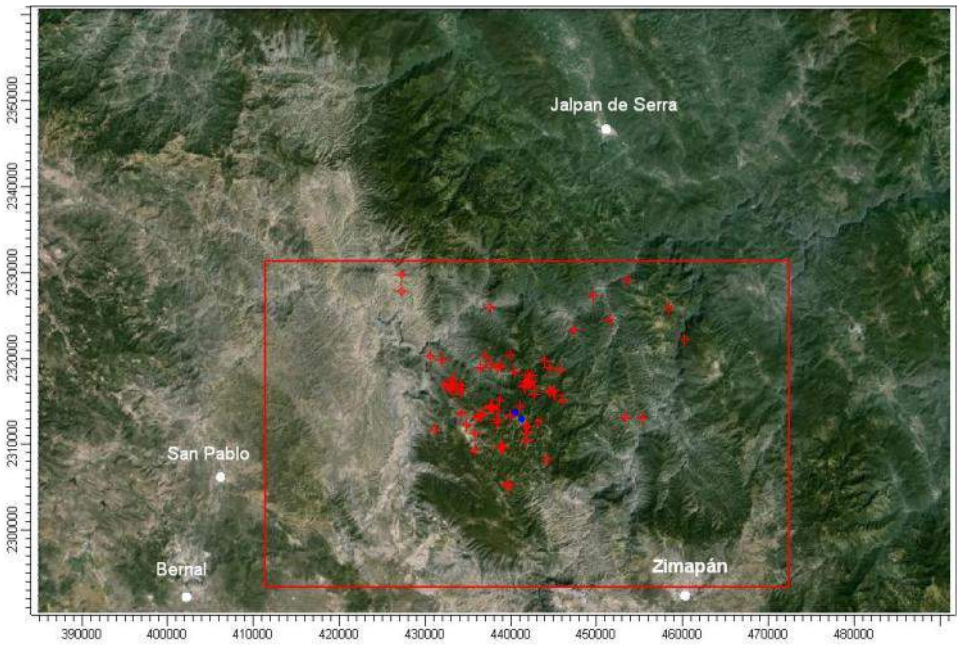


Figura A07-10 *Topografía del área circundante a la zona minera de San Joaquín. Se indica con marcas rojas las fuentes de emisión y con punto azul los puntos de monitoreo.*

7.5.3 FUENTES DE EMISIÓN MINERA

Las fuentes de emisión de Hg que se tienen localizadas en la zona de San Joaquín, Querétaro, se presentan en la **Tabla A07-2**.

Tabla A07-2 Localización de minas artesanales de mercurio en San Joaquín, Qro.

	Nombre del lote	UTMx	UTMy
1	FÁTIMA	438544.00	2318885.60
2	AMPL. SAGRADA FAMILIA	439071.64	2309653.14
3	DIANA I	431977.83	2319829.78
4	LA BANDA DEL ZORRO	442023.22	2311966.85
5	MARÍA ESTRELLA	434343.93	2313544.78
6	SAN JOSÉ CARRIZAL	453739.63	2329195.72
7	AURCANA I FRACCIÓN 2	439947.75	2313213.78
8	AURCANA I FRACCIÓN 3	441854.17	2311203.77
9	AURCANA II	453382.99	2313148.70
10	LA PALOMA	451544.31	2324520.36
11	EL ZORRO	441867.54	2312055.94
12	PLOMOSA 2	438835.76	2319072.67
13	SAN JUAN IV	431216.62	2311697.98
14	JUAN MINERO	430679.98	2320200.38
15	PLOMOSA	439983.75	2320319.16
16	LOS ALCONES	447477.23	2323293.15
17	LA PERLA	434817.13	2312225.86
18	PTO. HONDO	441950.86	2318065.42
19	MACONI	444319.30	2308162.85
20	SAGRADA FAMILIA	439060.75	2309520.37
21	GAVILÁN	443962.63	2319652.28
22	LAS VÍRGENES	449671.67	2327248.59
23	YONTHE FRACCIÓN A - R1	438407.64	2312931.63
24	TRES AMIGOS	433289.02	2317588.75
25	SAN ANTONIO	438421.76	2313938.74
26	SAN ALEJANDRO	437809.07	2314162.37
27	FRACCIÓN DE SAN ALEJANDRO	437788.77	2314295.26
28	PODER DE DIOS	441738.57	2316815.50
29	SANTO SEÑOR DE CHALMA	443346.05	2312571.03
30	APREMIO N	441851.71	2310495.45
31	EL PEÑÓN FRACC. I	433141.16	2317013.81
32	EL PEÑÓN FRACC. II	433679.45	2316425.06
33	ÁTICA	436120.51	2313117.31
34	RINCÓN DE LOS AZOGUES	444543.27	2316086.53
35	NIÑO DE ATOCHA	440590.47	2318479.72
36	FRESNO	433407.71	2316071.97
37	SALAMINA	436536.85	2313215.33
38	ROSARIO	441696.56	2316693.91
39	PODER DE DIOS	441750.55	2317269.24
40	MARAVILLA	436693.55	2313402.89
41	SANTA	442134.18	2316969.07
42	AMPLIACIÓN No. 1 LA ESPERANZA	442270.30	2317245.29
43	LA O	442270.49	2317300.63
44	ATENEA	442746.13	2316546.39
45	LIBERTAD	437893.42	2314471.95
46	LA PEÑITA	434312.45	2316112.65
47	ÁGUILA DORADA	446089.28	2315107.50
48	RANAS	441126.65	2314294.21
49	YONTHE FRACCIÓN B	432900.61	2316660.60
50	YONTHE FRACCIÓN E	438853.09	2309620.74

	Nombre del lote	UTMx	UTMy
51	AMPLIACIÓN II DE MINA DE LOS POBRES	436485.87	2318937.60
52	LA BARRANCA HONDA	438738.23	2315166.10
53	LA INSPIRACIÓN	460298.76	2322106.53
54	MILENIO 3	442480.98	2318041.44
55	AMPLIACIÓN DE MINA DE LOS POBRES	437124.97	2320252.24
56	SUR	438457.84	2312444.46
57	MINA DE LOS POBRES	437620.17	2319254.27
58	BARTOLO	458447.65	2325807.62
59	ZIMAPENCE No. 1	445249.10	2315730.03
60	SANTO NIÑO	445042.76	2316217.69
61	PRIMERA AMPL. SAN ALEJANDRO	437798.96	2314239.88
62	LOS GAVILANES	445757.51	2318594.90
63	EL DIVISADERO	444563.13	2318930.86
64	La Sonia	423903.07	2348148.01
65	La Liga	423903.07	2348148.01
66	Los Banquitos	430790.17	2340738.67
67	La Mora	437697.41	2337021.74
68	La Tranca	425565.96	2333382.57
69	Morelos	429020.22	2331522.68
70	Soyatal	429020.22	2331522.68
71	El Mono	427280.00	2329685.00
72	Cristo Rey	427272.73	2327840.87
73	Todos Santos	437655.72	2325953.90
74	San Cristóbal	432422.71	2316751.08
75	Las Calabacillas	434155.52	2316744.14
76	La Maravilla	455377.21	2312984.61
77	La Pequeña	408132.48	2311333.07
78	La Barranca	435859.97	2309358.95
79	La Lana	435867.05	2311203.55
80	San Juan	439831.90	2305101.58
81	La Poza	441780.24	2316838.72
82	San Juan Nepomuceno	439514.78	2305317.92
83	Otatal	442816.42	2315820.59

De las anteriores, las fuentes *La Sonia*, *La Liga*, *Los Banquitos*, *La Mora*, *La Tranca*, *Morelos*, *Soyatal* y *La Pequeña* (fondo verde) se ubican fuera del área de modelación del dominio 1, por lo que no fueron tomadas en cuenta para analizar la afectación local de las minas; sí fueron incluidos en la modelación en el dominio 2 para analizar la afectación a la zona urbana de la ciudad de Querétaro. Las minas *El Rosario*, *Atenea*, *La Maravilla*, *La Barranca*, *San Juan*, *La Poza*, *San Juan Nepomuceno* (o *San Juan II*) y *Otatal* (fondo magenta) se conocieron a fondo en una visita de campo, y fueron utilizadas para poder determinar el factor de emisión de Hg en la región.

7.5.4 PRODUCCIÓN MINERA DE MERCURIO

Con los datos recopilados durante las visitas realizadas en campo se estima que la producción de Hg está entre 0.25 y 0.7 kg de Hg por tubo, correspondiendo a una producción promedio de 1.8 a 4.9 kg de Hg por horno, con un promedio de 3.6 kg diarios o 43 kg semanales. Asimismo, y considerando

que varía la cantidad de tubos por horno, se asume una carga promedio de 728.6 kg de cinabrio por horno. Cabe mencionar que la mina de San Juan Nepomuceno reporta una producción promedio de 16 kg Hg por cada carga de 200 kg de cinabrio. Está producción se explica por la alta eficiencia del horno ecológico que se emplea en esta mina, y por la elección de cargar solamente cinabrio de muy alto contenido de Hg.

Dentro de las visitas y a partir de las entrevistas realizadas a mineros se mencionó que actualmente la producción de Hg es mucho menor que durante el año 2011. Según los declarantes, se multiplicó la producción actual estimada de Hg por dos, para poder replicar las condiciones reportadas para 2011.

7.5.5 FACTORES DE EMISIÓN MERCURIO

Cabe mencionar que los datos requeridos son muy variables, ya que la concentración de Hg en el cinabrio, así como la eficiencia y tamaño de los hornos, varían ampliamente dependiendo de la región geográfica.

Según un estudio en la región minera de San Joaquín (Martínez-Trinidad *et al.,* 2013), los jales hidrotermales de mercurio presentan contenidos que varían de 2.4 hasta 4164 mg Hg/kg. Para poder determinar el factor de emisión en este estudio, se empleó el valor de 1000 mg Hg/kg.

No hay información del contenido de Hg en cinabrio en la región de San Joaquín. Sin embargo, los valores remanentes de Hg en los jales encontrados en la región de San Joaquín (2.4 a 4164 mg/kg, Martínez-Trinidad *et al.,* 2013) son muy similares a los encontrados en la región de Guizhou en el suroeste de China (3.3 – 810 mg/kg; Li *et al.,* 2009); en consecuencia, se espera tener un porcentaje similar de Hg en el cinabrio en San Joaquín. Asimismo, el contenido de Hg en el cinabrio en Almadén, España, y en Idrija, Eslovenia, está reportado en 5-10%, valor considerablemente mayor que los de otras partes del mundo. Para este estudio se empleó un valor promedio de 0.86% de Hg en el cinabrio, que es consistente con los datos recopilados en campo. De acuerdo con lo observado en la visita, todas las minas usan cinabrio de calidad similar. Solamente la mina de San Juan Nepomucemo utiliza cinabrio de muy alta calidad dentro de su horno ecológico; considerando la cantidad de Hg producido en esta mina, la eficiencia reportada y el tamaño del horno, se estima que la cantidad de Hg en el cinabrio empleado es de alrededor de 8.1 por ciento. Con los datos anteriores, se determinó el siguiente factor de emisión (considerando la producción actual):

$$F_{Hg} = \frac{(0.86 \text{ x } 10^{4} - 1000 \text{ mg/kg})\ (728.6 \text{ kg x } 10^{-6}) - 3.6 \text{ kg}}{3.6 \text{ kg}} \text{ x } 100\%$$

$$F_{Hg} = 54\%$$

Con un promedio de 2.5 cargas de horno diarias, así como una producción promedio de 3.6 kg, se estima una emisión diaria actual de 4.81 kg/día, o 0.056 g/s de Hg. Multiplicando esta emisión por dos para el año 2011 (correspondiendo a 5 cargas diarias en promedio), se empleó una emisión estimada de 0.11 g/s en la modelación; esta se asignó a cada una de las fuentes conocidas, menos las que se visitaron. En estas últimas se empleó la emisión determinada con los datos obtenidos durante las visitas.

7.5.6 RESUMEN DE LAS EMISIONES EMPLEADAS EN EL MODELO CALPUFF

La **Tabla A07-3** resume los valores de emisión empleadas en el modelo.

Tabla A07-3 Características de las fuentes visitadas en San Joaquín, Qro.

	El Rosario	La Poza	Ototal	San Juan	Atenea	Maravillas	Barranca	Fuente genérica
Carga del horno (kg)	700	1000	700	700	700	400	900	728.6
Cantidad de cinabrio por semana (kg)	5600	10000	10500	10500	7000	6000	7200	7850
Concentración de Hg en jales (mg/kg)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Producción de Hg/horno (kg)	3.9	3.5	4.9	2.5	4.9	1.6	3.6	3.6
Factor de emisión (%)	41%	122%	11%	122%	11%	144%	144%	54%
Eficiencia (%)	68.8%	43.8%	87.5%	43.8%	87.5%	40%	40%	62%
Emisión Hg (g/s)	**0.0367**	**0.1975**	**0.0373**	**0.2074**	**0.0249**	**0.1602**	**0.2403**	**0.1114**
Emisión azufre (g/s)	**0.0117**	**0.0630**	**0.0119**	**0.0662**	**0.0079**	**0.1022**	**0.1533**	**0.0356**

Se observa que la eficiencia promedio estimada es de 62%. De acuerdo con su experiencia y conocimiento del proceso, los trabajadores de las minas estiman la eficiencia en 70%, sin proporcionar un método de estimación.

7.5.7 EMISIONES EMPLEADAS POR EL MODELO CALMET

Como resultado de la modelación con Calpuff para el periodo del 7 al 25 de marzo de 2015, se obtuvo la concentración de Hg para la ubicación dentro de San Joaquín, donde instaló una caseta de monitoreo, con el fin de comparar el modelo con los registros medidos. Si bien el modelo generalmente calcula concentraciones de Hg varias órdenes de magnitud mayor que las medidas, el 25% de los valores estimados son de la misma orden de magnitud, indicando que las emisiones y correspondientes concentraciones estimadas pronostican adecuadamente la posible concentración en la zona.

Para analizar la posible afectación de la ciudad de Querétaro por la presencia de las mineras en el estado, se revisaron los resultados de 7 días con posible afectación hacia Querétaro, entre un conjunto de 20 días al azar en 2012. Esos días fueron:

- 13 y 27 de enero 2012
- 17 de abril 2012
- 14 de mayo 2012
- 20 de julio 2012
- 12 de septiembre 2012
- 16 de noviembre 2012

Cabe mencionar que la escala empleada corresponde a los valores límite presentados en la **Tabla A07-1**. El valor azul corresponde a concentraciones horarias que exceden el límite para la inhalación crónica y que puede ser empleado para comparar la concentración promedio de 24 horas; el verde corresponde a concentraciones horarias que exceden el umbral promedio para inhalación durante 8-horas; el amarillo corresponde a un valor límite aproximado para una hora, y finalmente, el rojo corresponde al valor que no se debe sobrepasar para inhalación aguda.

En la serie de las **Figura A07-11a** hasta **11g** se observan los valores horarios de concentración de Hg estimados con Calpuff, en donde se observa que cuando la posible contaminación por Hg generada en la zona minera de San Joaquín llegue a Querétaro, las emisiones de Hg al llegar a la ciudad se han diluido. Las figuras corresponden a valores horarios. La áreas color azul deberían mantener esas concentraciones por 24 horas y las areas verdes por ocho horas para rebasar los umbrales indicados en la Tabla A07-1. Solamente las regiones rojas y amarillas pueden implicar problemas de salud. Por otro lado, se observa también que la contaminación por Hg es local, y que toda la zona minera presenta generalmente valores de concentración de Hg por encima del promedio permitido para 8 horas, así como se presentan regiones en color rojo, y que corresponden a zonas en donde el límite de exposición aguda se rebasa por horas completas.

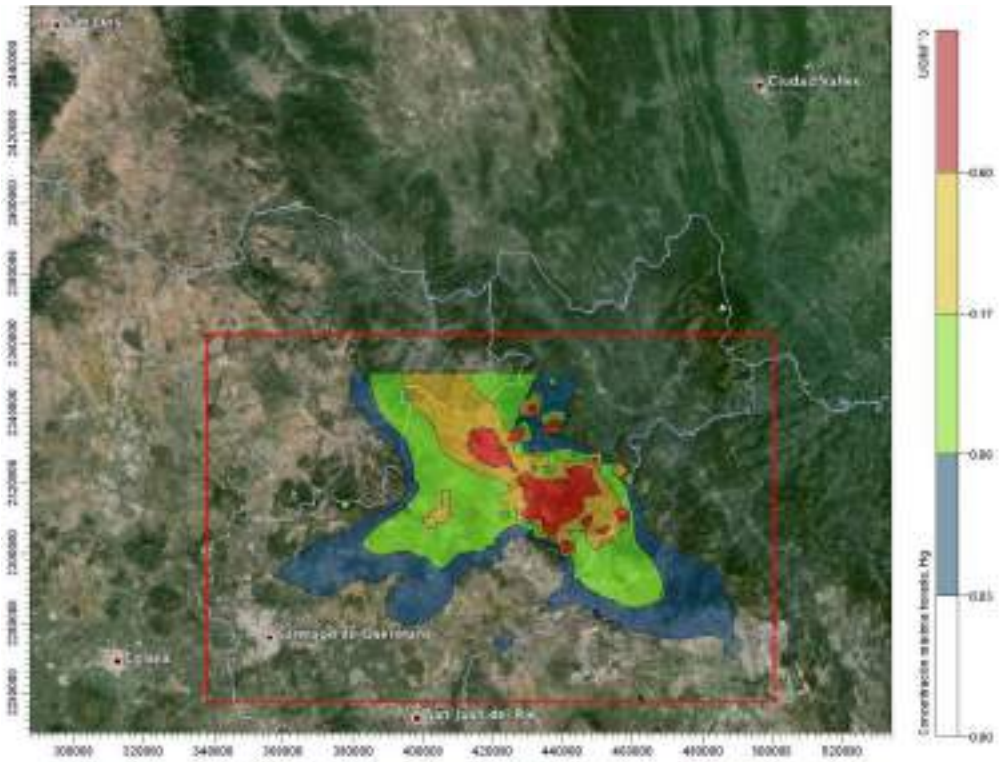


Figura A07-11a *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 13 de enero 2012.*

Figura A07-11b *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 27 de enero 2012.*

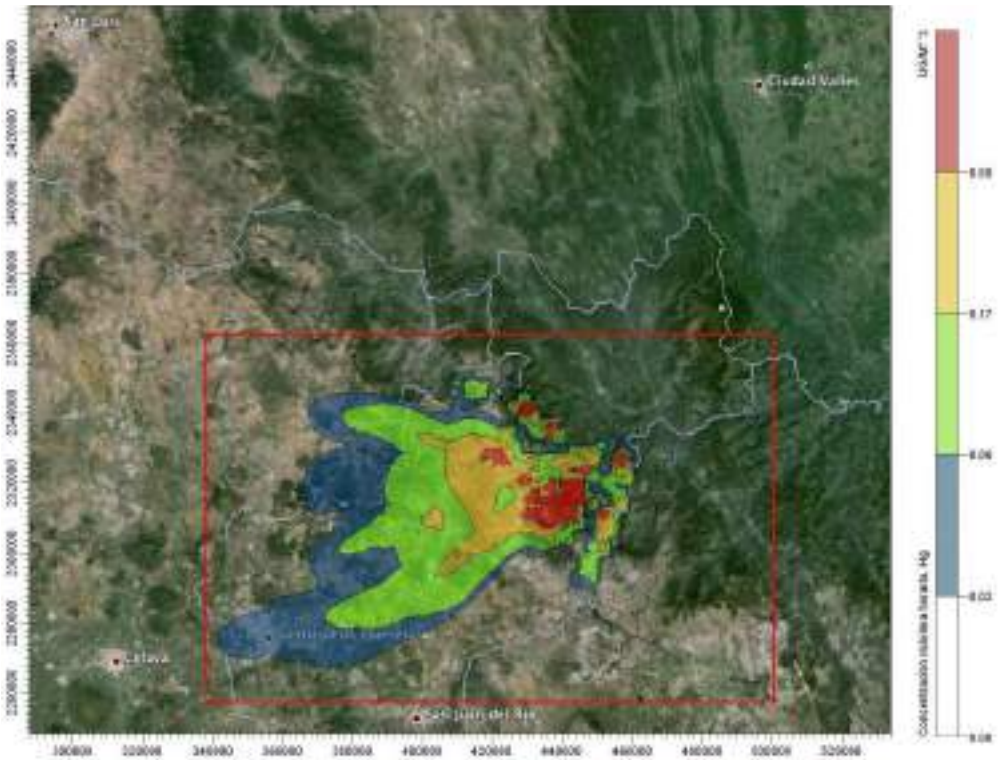


Figura A07-11c *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 17 de abril 2012.*

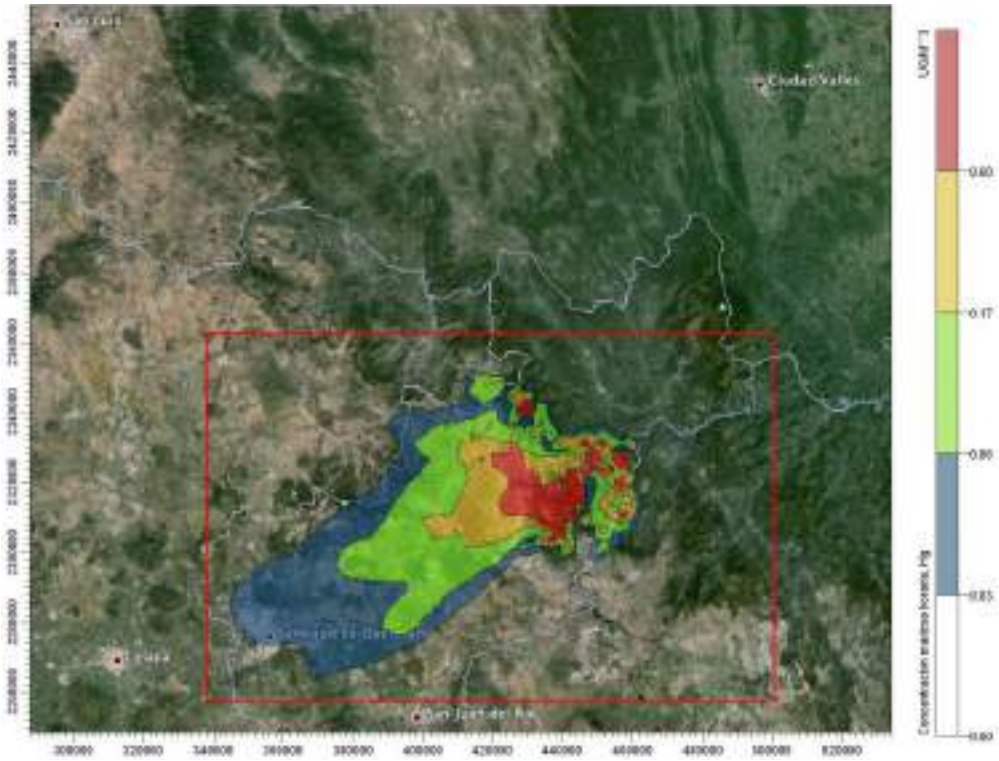


Figura A07-11d *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima e Hg, 14 de mayo 2012.*

Figura A07-11e *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 20 de julio 2012.*

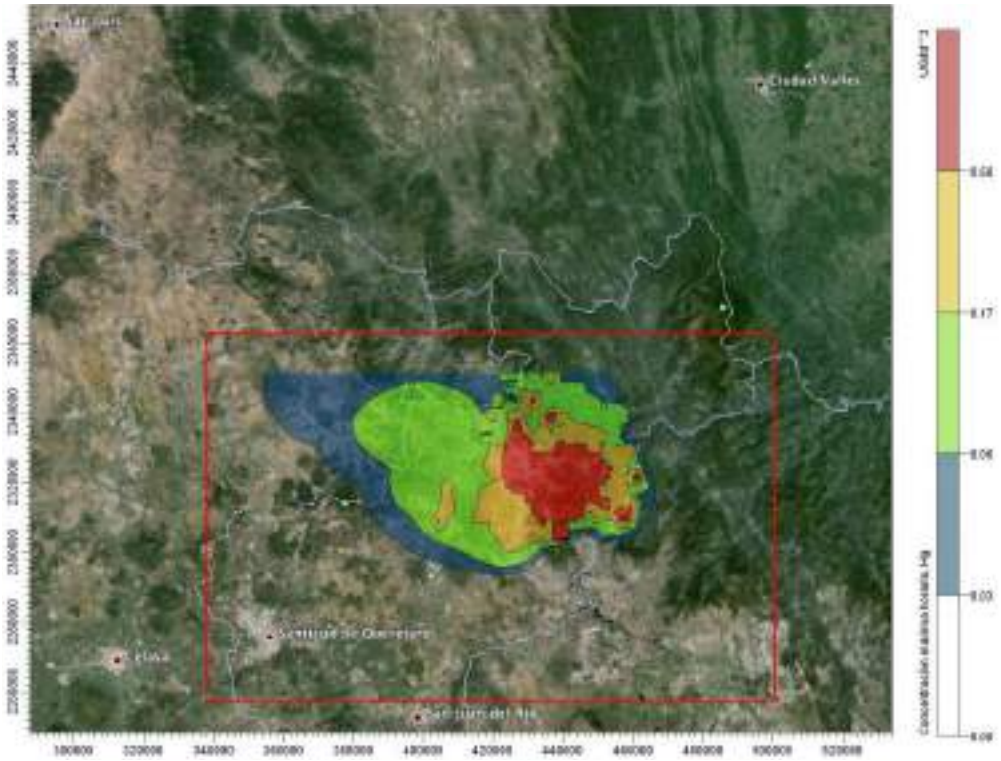


Figura A07-11f *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 12 de septiembre 2012.*

Figura A07-11g *Concentraciones máximas de Hg correspondientes a los días seleccionados: Concentración horaria máxima de Hg, 16 de noviembre 2012.*

7.5.8 MONITOREO DE MERCURIO ATMOSFÉRICO EN SAN JOAQUÍN

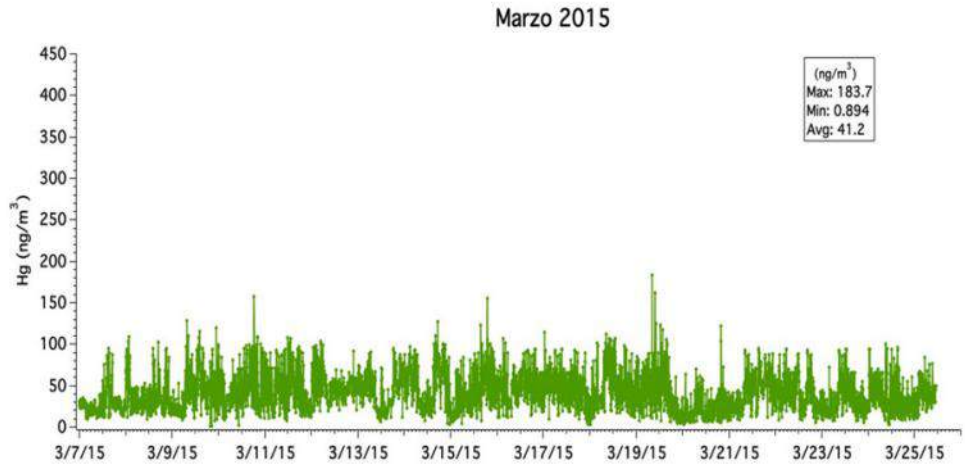
Los datos de monitoreo corresponden a los meses de marzo, abril y mayo de 2015 (Figura A07-12a, b y c). Los valores promedio observados se encuentran en un rango de 39.93 a 41.19 ng/m3 y concentraciones máximas de 183.75 a 235.00 ng/m3 durante los meses de marzo-abril. Si se comparan estas concentraciones reportadas en áreas remotas como los obtenidos en Sisal, Yucatan, en el año 2013, en donde se reportaron valores de mercurio en aire en un rango de 0.5 a 3.85 ng/m3. La concentración promedio anual registrada en Sisal fue de 1.163 ± 0.250 ng/m3. Las concentraciones más bajas (0.5 ng/m3) se registraron en los meses de febrero, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; en este último se registró la concentración promedio de mercurio más baja (0.936 ng/m3), mientras que en los demás meses se registraron valores promedio mayor de 1.0 ng/m3. El máximo valor de mercurio registrado fue de 3.859 ng/m3, determinado en el mes de diciembre, mientras que en los demás meses se registraron concentraciones máximas menores de 3.0 ng/m3. Esto indica que Sisal es un sitio de concentraciones de fondo sin impactos significativos de mercurio procedentes de fuentes antropogénicas.

Por otra parte, las concentraciones promedio de mercurio en aire reportados en el presente estudio están por arriba a los registrados en este sitio y otras áreas rurales como Puerto Ángel (costa de Oaxaca, en el Pacífico) y Huejutla (zona rural en el estado de Hidalgo), donde se determinaron valores promedio de 1.46 y 1.32 ng/m^3, respectivamente (De la Rosa *et al.,* 2004). Así mismo los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Hernández-Silva *et al*. 2012 en la misma región en donde se obtuvo un valor promedio 67 ng/m^3 obteniendo un máximo de 416.0 ng/m^3.

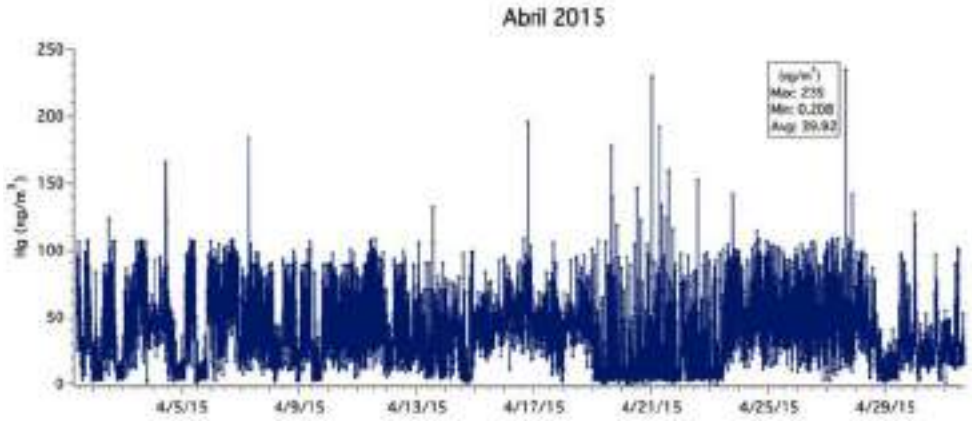
7.5.9 MONITOREO DE DEPOSITO HÚMEDO (LLUVIA)

La figura A07-3 muestra el colector de lluvia automático (Andersen, General Metal Works, Inc.) wet/dry Andersen modelo 78-100, utilizado para la colección de la precipitación pluvial. Para el muestreo se utilizaron cubetas de polietileno de alta densidad (HDPE), con capacidad de 20 litros.

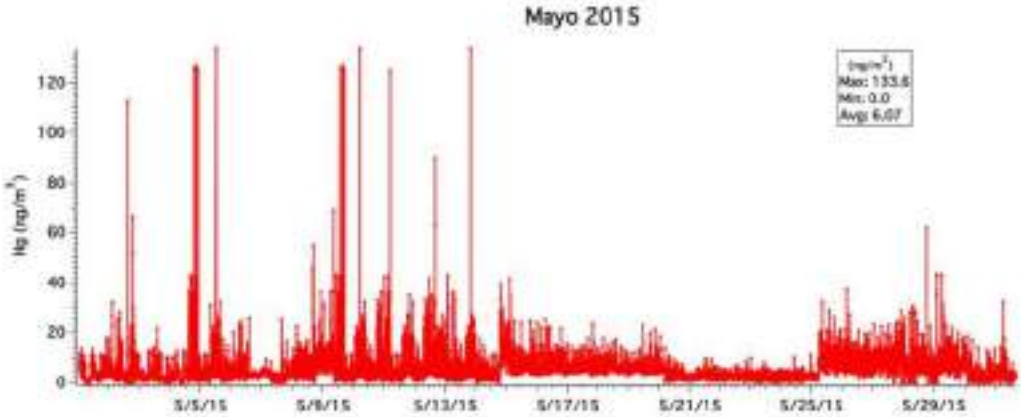
Después de la colección, las muestras de lluvia, se filtraron a través de una membrana de policarbonato de 0.4 µm. A la muestra de lluvia filtrada se le nombro fracción soluble (SOL), a los filtros obtenidos del proceso de filtración de las muestras de lluvia les llamamos fracción insoluble (INSOL), los cuales se prepararon de acuerdo a las técnicas de la U.S. EPA Digestion Procedure for Microwave Extraction for Ambient Filter Samples (1999), Method IO-3.1., con control de presión y temperatura, La determinación de Hg total es la sumatoria de ambas fracciones. El análisis de Hg en lluvia se realizo por la técnica de espectrometría de fluorescencia atómica por vapor frío (CVAFS).



(a)



(b)

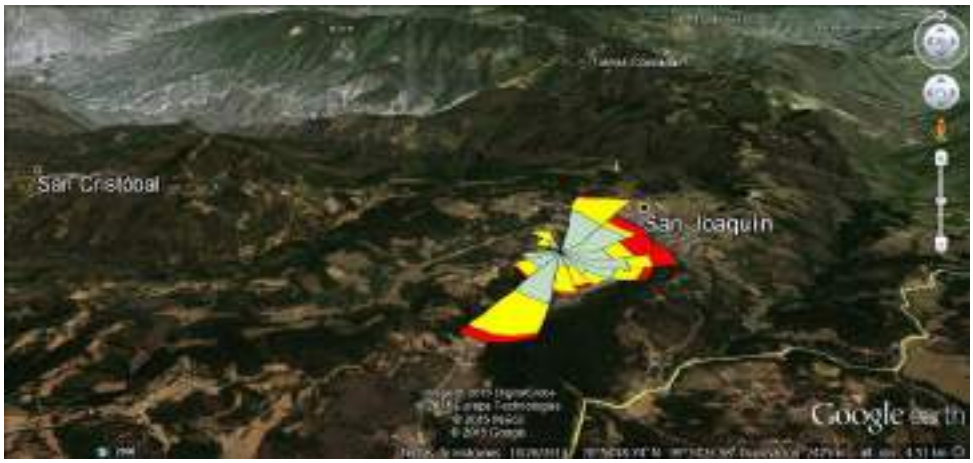


(c)

Figura A07-12 *a, b y c Concentraciones de mercurio atmosférico mensual (marzo, abril y mayo 2015.*

El cálculo de la concentración promedio ponderada (CPP) se realizó con base en la fórmula utilizada por Galloway *et al* (1984). En la **Tabla A07-4** se observan los valores máximos de concentración para Hg-insoluble y soluble, que fluctuaron entre (7.98 y 4.44 µg/litro), y los valores mínimos para ambas fracciones (Hg-insoluble y soluble fueron 0.64 y 0.52 µg/litro). La valoración del pH de la lluvia fue fundamental para estimar la especie química probable del mercurio disuelto. Se midieron asimismo los milímetros de lluvia colectados para cada evento.

Es evidente la importancia del proceso de lavado atmosférico, como se puede observar en los resultados obtenidos de mercurio en aire a inicios de la temporada de lluvias (mediados del mes de mayo), ya que, conforme la temporada de lluvia avanza, la concentración de mercurio disminuye. Al inicio de la temporada el pH es más ácido y conforme avanza la temporada el pH se neutraliza, lo que incrementa la remoción y dilución del mercurio atmosférico favorecido también por los vientos, como se puede observar en las rosas de viento (**Figuras A07-13a y b**).



(a)

(b)

Figura A07-13 *a y b Rosas de viento abril mayo 2015.*

Tabla A07-4 Concentración de mercurio en agua de lluvia colectadas en abril y mayo en San Joaquín, Qro.

MES	DIA	MUESTRA	INSOL	SOL	TOTAL		Lluvia
			Hg (µg/L)	Hg (µg/L)	Hg (µg/L)	pH	mm
4	2	SJ-1	1.511	0.962	2.473	4.53	13.9
4	3	SJ-2	2.574	0.603	3.177	4.77	3.6
4	4	SJ-3	6.784	1.653	8.437	4.13	0.7
4	9	SJ-4	7.980	0.527	8.507	4.21	1.3
4	16	SJ-5	1.101	0.700	1.801	4.77	0.8
4	18	SJ-6	1.740	0.802	2.542	4.60	1.1
4	24	SJ-7	4.320	4.447	8.767	4.12	0.2
4	25	SJ-8	6.650	1.448	8.098	4.49	0.7
4	26	SJ-9	1.504	3.959	5.463	4.38	2.0
4	30	SJ-10	1.759	1.286	3.045	4.48	1.2
5	1	SJ-11	0.640	0.600	1.240	4.35	8.5
5	4	SJ-12	0.653	0.692	1.345	4.47	2.3
5	5	SJ-13	1.570	3.193	4.763	5.23	3.4
5	9	SJ-14	1.640	0.785	2.425	4.01	2.8
5	10	SJ-15	1.693	1.414	3.107	4.10	7.0
5	12	SJ-16	5.099	4.338	9.437	5.61	4.0
5	17	SJ-17	2.550	0.624	3.174	4.48	15.4
5	21	SJ-18	4.750	0.880	5.630	4.20	11.2
5	22	SJ-19	3.988	2.115	6.103	5.00	9.2
5	23	SJ-20	0.990	1.549	2.539	6.73	10.2
5	26	SJ-21	4.055	1.833	5.888	5.35	17.8
5	27	SJ-22	3.878	2.995	6.873	5.08	13.2
			INSOL	SOL	TOTAL		Lluvia
			Hg (µg/L)	Hg (µg/L)	Hg (µg/L)	pH	mm
		N	22	22	22	22	22
		MIN	0.640	0.527	1.240	4.010	0.200
		MAX	7.980	4.447	9.437	6.730	17.800
		CCP	2.840	1.564	4.403	4.874	10.885
		DE-CPP	0.901	0.478	1.340	1.362	3.830

Concentración mínima (Min), máxima (Máx), concentración promedio ponderada (CPP) y desviación estándar de la concentración promedio ponderada (DE-CPP) en µg/litro.

7.6 Discusión

Las mediciones en el sitio muestran valores superiores a los de fondo. Los valores máximos alcanzan entre 183.75 y 235 ng/m^3, mientras que la concentración de fondo medida en México es de 1 ng/m^3. Esto indica que se tiene influencia de la actividad de producción de mercurio en el sitio. La emisión de mercurio en la región depende de las condiciones de operación de los hornos, el porcentaje de mercurio en el mineral y el control de fugas de vapores.

WRF, Calmet y Calpuff fueron acoplados para el desarrollo de un sistema, con la finalidad de modelar el transporte de mercurio cuyo origen son las minas que presentan actividad de explotación y extracción de cinabrio

(HgS), específicamente de los hornos que operan a cielo abierto. Esto permitió generar y conocer las principales fuentes de emisión, y saber dónde y cuándo se localizan las zonas más impactadas durante la ocurrencia de eventos de contaminación por este tipo de actividad.

Las trayectorias obtenidas a partir de la modelación meteorológica muestran que, dependiendo de las condiciones meteorológicas, las emisiones de la zona de San Joaquín pudieran influir en ciudades como Querétaro, Celaya, San Juan del Río, Morelia, San Luis Potosí y la ZMVM. Con las emisiones y condiciones meteorológicas, la dispersión de emisiones de mercurio muestra que podrían llegar concentraciones entre 30 y 60 ng/m^3 a algunas parte de la ciudad de Querétaro. Todo ello sugiere que es posible que emisiones en zonas remotas puedan influir en zonas con alta densidad de población, por lo que se requiere controlar todas las emisiones.

Los resultados obtenidos para depósito húmedo de Hg total en esta región se encuentran por arriba de lo reportado por varios autores para áreas urbanas en otras ciudades del mundo. De igual manera, estos valores están por arriba del estudio realizado en 2013, en la región de Sisal, Yucatán, México, considerado como sitio de fondo donde se reportaron valores que fluctuaron entre 1.03 y 2.51 µg /litro.

En lo que se refiere a regiones mineras, hay pocos estudios realizados en estos sitios; sin embargo, resulta interesante comparar los resultados del presente estudio con los reportados en otras áreas rurales del mundo. Los resultados obtenidos pueden indicar en alguna forma que los habitantes de San Joaquín están expuestos a respirar mercurio, lo que puede tener serias consecuencias en la salud. Este compendio de datos representa una de las escasas determinaciones de mercurio realizadas en nuestro país, en particular en una zona rural y minera.

7.7 Conclusión

En este reporte se presentan los resultados obtenidos en los meses de marzo a mayo de 2015, periodo durante el cual se observaron concentraciones promedio mayores que la obtenida en el Sisal, Yucatán (1.047 ± 0.271 ng/m^3) y en Puerto Ángel, Oaxaca (1.4 ng/m^3). Las concentraciones detectadas son significativamente más altas, por lo que se puede considerar que hay un riesgo potencial para la población expuesta, dado que, según la WHO-IPCS31, los niveles de mercurio en el aire deben estar en el rango de 2 a 10 ng/m^3.

En cuanto a la depositación húmeda, a pesar de tratarse de un sitio con características orográficas, geográficas y de desarrollo urbano distintos, las concentraciones de Hg-inso-sol (Hg-total) están afectadas probablemente por la composición mineralógica de los suelos y por la práctica de la minería informal detectada, o bien debido a la influencia de las condiciones meteorológicas que sugieren contribución de origen antropogénico.

Estudios realizados por Martínez, *et al.* (2013), muestran que los suelos de la región son mezclas complejas de minerales cristalinos y no cristalinos (vidrio volcánico, minerales de arcilla, ceniza volcánica y materia orgánica). Todos estos componentes son resultado de la erosión. Los componentes mineralógicos del subsuelo de San Joaquín se han determinado en varios trabajos, de los que se ha concluido que el subsuelo regional está contaminado por mercurio, como resultado de la explotación minera a lo largo de dos siglos.

Es fundamental poner énfasis sobre la presencia de mercurio en aire y agua de lluvia, pues tiene efectos directos y pone en riego la salud de la población en esta región, debido a su contante inhalación e incorporación de la lluvia en suelo y mantos friáticos.

A partir de la modelación de la meteorología, en el análisis de trayectorias de emisiones se observa que éstas pueden transportarse hacia el este, llegando a la ciudad de Querétaro y seguir hacia Celaya. En algunas ocasiones pueden viajar hacia el sureste llegando a Morelia, hacia el norte y alcanzar a San Luis Potosí, y en algunos casos viajar hacia el sur y con ello arribar al norte de la ZMVM. A partir de la modelación de la dispersión de emisiones de mercurio se llegó a encontrar que, para ciertas horas, podrían llegar concentraciones de entre 30 y 60 ng/m^3 a la ciudad de Querétaro.

Es importante observar que los resultados arrojados por los modelos muestran que el impacto de las emisiones por la producción minera de mercurio es principalmente local, además de que los sitios de aproximación a las minas presentan concentraciones claramente altas, lo que representa un riesgo de toxicidad para la población aledaña y para los mineros que laboran de manera formal e informal. El trabajo desarrollado hasta el momento permitió comparar resultados obtenidos en San Joaquín con los adquiridos en los sitios de fondo.

7.8 Recomendaciones

1. La mayor parte del mercurio presente en la atmósfera se encuentra como vapor de mercurio elemental, por lo que es necesario realizar la determinación de mercurio asociado a partículas como criterio adicional para establecer la concentración real de mercurio en aire ambiente.
2. Diseñar una red de monitoreo de mercurio que contemple una distribución espacial y un temporalidad que permita fundamentar las políticas de regulación para la explotación y uso de del mercurio.
3. Con el objeto de conocer y estimar las concentraciones de mercurio a largo, mediano y corto plazo, tanto en sitios de emisión como en sitios no impactados, crear y establecer una normatividad en política pública sobre las emisiones, exposición y producción minera de mercurio a nivel local, regional y global.

4. Emplear la modelación para la identificación de áreas de influencia de otros sitios de emisión de mercurio en México.
5. A corto plazo, implementar tecnologías que permitan la explotación y al mismo tiempo disminuyan la emisión de mercurio en la región.

Glosario

AFWA	Air Force Weather Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FSL	Forecast Systems Laboratory
GOMS	Global Mercury Observation System
NADP	National Atmospheric Depositon Program
NCAR	National Center of Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RUC	Rapid Update Cycle
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WRF	Weather Research and Forecasting
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Referencias

Air Resources Board de California en su Consolidated Table of OEHHA / ARB Approved Risk Assessment Health Values (OEHHA/ARB, 2014)

Álvarez A, Toscano O. (1997). Análisis de espacio urbano. Toluquilla. Tesis de Licenciatura en Arquitectura. Instituto Tecnológico de Querétaro. Querétaro. 1997.

De la Rosa, D.A., T. Volke-Sepúlveda, G. Solórzano, C. Green, R. Tordon, S. Beauchamp. (2004). Survey of Atmospheric Total Gaseous Mercury in Mexico. *Atmospheric Environment* 38, 4839-4846.

Gilberto Hernández-Silva, Rocío García-Martínez, Sara Solís-Valdez, Sergio Martínez-Trinidad, Italia Mercado-Sotelo, Martha Ramírez-Islas, Péter Scharek, Gregorio Solorio-Munguía. (2012). TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 15(1):5-15.

Li P., Feng X., Qiu G., Shang L., Wang S y Meng B. (2009). Atmospheric mercury emission from artisanal mercury mining in Guizhou Province, Southwestern China, *Atmospheric Environment* 43, 2247-2251.

Model 2537B Ambient Mercury Vapour Analyzer User Manual. Rev: 3.11, October 2008. Tekran Instruments Corporation.

National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/noaa/U.S. Department of Commerce. 2000, updated daily. ncep FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6/ ultima vez visitado28 abril 2015.

Sergio Martínez-Trinidad, Gilberto Hernández Silva, Martha Elena Ramírez Islas, Juventino, Martínez Reyes, Gregorio Solorio Munguía, Sara Solís Valdez and Rocío García Martínez. (2013). *Geofísica Internacional,* (52), Vol. 1: páginas 43-58.

Skamarock, W. C, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang y J. G. Powers: 2008. A description of the Advanced Research wrf Version 3. ncar Tech. Note. ncar/TN-475+STR, 113 pp.

WHO-IPCS. 2004. WHO Food Additives Series: 52. (2004) Safety evaluation of certain food additives and contaminants (World Health Organization, Geneva, Switzerland.

WHO Air Quality Guidelines 2005 disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/ última vez visitado 13 mayo 2015.