

Hacia la modelación del clima urbano y la contaminación atmosférica en el Valle de México: una visión a partir de mi relación profesional con el Dr. Ernesto Jauregui

Towards the modeling urban climate and air pollution in the Valley of Mexico: an perspective from my professional relationship with Dr. Ernesto Jauregui

Aron Jazcilevich Diamant*

Recibido: 23/01/2024. Aceptado: 22/04/2024. Publicado: 07/06/2024.

Resumen. Uno de los temas de mayor interés del Dr. Ernesto Jáuregui fue el de la interacción entre los usos del cambio de suelo derivados de los procesos de urbanización y los fenómenos atmosféricos. Sus trabajos en estos temas fueron pioneros en ciudades tropicales. Si bien temas como la observación objetiva de la Isla de Calor Urbana, así como cambios en los regímenes de lluvias y temperatura urbanos ocuparon la mayor parte de su trabajo, su interés de colaborar con grupos de modelación computacional del clima, tiempo y contaminación atmosférica fue también importante. Reconoció la gran valía de estos métodos para ampliar el conocimiento, y su gran experiencia ayudó a proponer temas como el efecto en la atmósfera por la desaparición de zonas lacustres en el Valle de México. A partir de esta experiencia, varios trabajos han seguido este camino que él promovió. Así tenemos estudios que aquí se presentan con cada vez con mayor resolución espacial y temporal, y con mejores parametrizaciones físicas, que describen los fenómenos de convergencias e interacciones valle-montaña que se dan en el Valle de México.

También se presentan trabajos que retoman el tema de las zonas lacustres, y la investigación de lo que sucede en la atmósfera cuando se les recupera, tema que llamó la atención de Ernesto.

En este trabajo incorporamos nuestras últimas investigaciones usando modelos altamente especializados en usos

de suelo urbano para seguir el camino trazado por el Dr. Ernesto Jáuregui, y dilucidar el efecto del cambio de coberturas superficiales en la atmósfera. Así mismo, se incluyen otros trabajos acerca de estas interacciones como el caso del transporte de partículas del suelo de zonas agrícolas, así como por la introducción masiva de techos naturados en una zona de la CDMX.

Me atreví a incorporar trabajos de mis alumnos en temas como el del efecto de emisiones vehiculares en microambientes. Como Ernesto fue un ciudadano usuario del automóvil, nos hubiera gustado conocer su opinión de estos aportes.

Palabras clave: cambios en el uso del suelo urbano, interacciones entre el uso del suelo y la atmósfera, atmósferas urbanas.

Abstract. One of the topics of greatest interest to Dr. Ernesto Jáuregui was the interaction between land-use change derived from urbanization processes and atmospheric phenomena. His work placed him as a pioneer on these issues in tropical cities. Although topics such as the objective observation of the Urban Heat Island, changes in urban rainfall and temperature regimes occupied most of his work, his interest in collaborating with groups of computational

*Departamento de Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Universidad Nacional Autónoma de México. Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán, 04510, Ciudad de México, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-6734>. Email: jazcilev@unam.mx

modeling of climate, weather and air pollution was also important. He recognized the great value of these methods to expand knowledge, and his great experience helped to propose topics such as the effect on the atmosphere of the disappearance of lake areas in the Valley of Mexico. From this experience, several works have followed this path that he instigated. Thus, we present here studies with increasingly greater spatial and temporal resolution and with better physical parameterizations, which describe the phenomena of convergences, and valley-mountain interactions that occur in the Valley of Mexico.

Coming back to works on the theme of lacustrine areas, investigations are presented on what happens to the atmosphere when lakes are reintroduced, a topic that caught Ernesto's attention. To follow the path traced by Dr. Ernesto

Jáuregui to elucidate the effect of surface cover changes and the atmosphere, we incorporate our latest research using highly specialized models in urban land use.

Likewise, other works on the interaction of land use with the atmosphere are included, such as the transport of soil particles from agricultural areas, as well as the massive introduction of natural roofs in an area of Mexico City.

I dared to incorporate the work of my students on topics such as the effect of vehicular emissions on microenvironments. Since Ernesto was a city dweller and a car user, we would have liked to know his opinion of these works.

Keywords: Urban land-use changes, land-use and atmospheric interactions, urban atmospheres.

INTRODUCCIÓN

El Valle de México es una región singular para el estudio del clima. Se trata de un valle donde han tenido lugar grandes cambios de cobertura superficial desde su formación geológica y a partir de la llegada de los primeros seres humanos. Actualmente, las condiciones geográficas son tales que se tiene un gradiente de precipitación media cercana a 1000 mm/año al sur, en el piedemonte del Ajusco, y de 600 mm/año en la parte de Texcoco, al norte (Jáuregui, 2000). Esto se debe al efecto Chinook. Así, tenemos que en este valle podemos transitar desde un clima tropical subhúmedo hasta uno semiárido en un recorrido de 30 km.

Los lagos de Texcoco, Xochimilco, Zumpango, Xaltocan y Chalco, que dominaban el paisaje cuando llegaron los primeros pobladores, se formaron hace más de 100 mil años cuando la actividad volcánica cerró el curso de los ríos que atravesaban el valle desde el sur hacia el norte. Las épocas glaciares e interglaciares, así como la precipitación, se encargaron de proveer el agua necesaria para formar un paisaje lacustre donde, durante el transcurso del tiempo, tuvieron lugar grandes variaciones de nivel del agua (Urrutia, 2019).

Un tema que despertó el interés del Dr. Jáuregui fue la presencia de estos lagos y la actividad humana que mayoritariamente los desecó para la construcción de la Ciudad de México. Estos cambios de suelo determinaron en forma importante la modificación del clima del Valle y de la Ciudad

de México (CDMX) en los últimos 500 años. Como veremos, esto se ha podido cuantificar utilizando la modelación computacional que incluye desde la recreación numérica de los fenómenos atmosféricos como su interacción con la cobertura de la superficie urbana. Este esfuerzo, promovido por el Dr. Jáuregui, quien fue pionero a nivel internacional en el estudio de las Islas de Calor, no solo ha servido para investigar fenómenos atmosféricos en el Valle de México, sino que también es útil para orientar políticas ambientales sobre urbanización, contaminación y cambio climático.

Si bien la mayor contribución del Dr. Jáuregui fue en el campo de la meteorología observacional, la actividad de modelación fue siempre de su aprecio. Gracias a esto, contamos con su colaboración directa y apoyo profesional en varios trabajos que aquí se presentan. Este escrito abarca en su mayor parte trabajos realizados en colaboración con el Dr. Ernesto Jáuregui y aquellos que considero continuaron su labor en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) sobre modelación del clima y contaminación atmosférica en el Valle de México. Recoge mis experiencias profesionales con él, su participación en mis clases y sus comentarios personales acerca de algunos temas aquí tratados. Me atrevo a incluir una sección acerca de nuevas tecnologías de sensores ambientales y modelos que, en mi opinión, hubieran sido del entusiasta interés de Ernesto.

PRIMERAS MODELACIONES PARA EXPLICAR ALGUNOS FORZANTES CLIMÁTICOS

En Jáuregui y Romales (1986) se determinó, mediante el rescate y análisis exhaustivo de observaciones históricas, que durante el siglo XX la temperatura media anual en el Valle de México aumentó 2.4°C . Este incremento es mucho mayor al que se podría adjudicar al cambio climático, ya que hasta la fecha se considera que el calentamiento promedio anual a nivel mundial es cercano a 1°C . Estos datos indicaban, entonces, que la causa del aumento se debe a forzantes locales.

Con el uso del modelo complejo de meteorología y calidad del aire, denominado MESOSCALE-MODEL (MEMO) (Flassak, 1990; Moussiopoulus, 1994), en el cual ya se podían incluir algunas

parametrizaciones de la física atmosférica correspondientes al suelo urbano y orografía compleja, se reprodujeron escenarios sugeridos por el Dr. Jáuregui para aislar los forzantes climáticos locales que dieron lugar al fenómeno del aumento de temperaturas promedio anual (Jazcilevich *et al.*, 2000). Usando mapas históricos (Figura 1), se introdujeron al modelo la cobertura del suelo urbano y lacustre como se encontraba en 1929, cuando todavía existían algunos cuerpos de agua significativos como el de Xochimilco, Texcoco y Zumpango. También se implementó un escenario con el mismo uso de suelo urbano de 1929, pero con los cuerpos de agua reducidos como se encuentran en la época actual. Este último escenario pudo reproducir el incremento térmico de 2.4°C observado por Jáuregui, en las estaciones que se eligieron de control: Minería y Tacubaya. Con este ejercicio

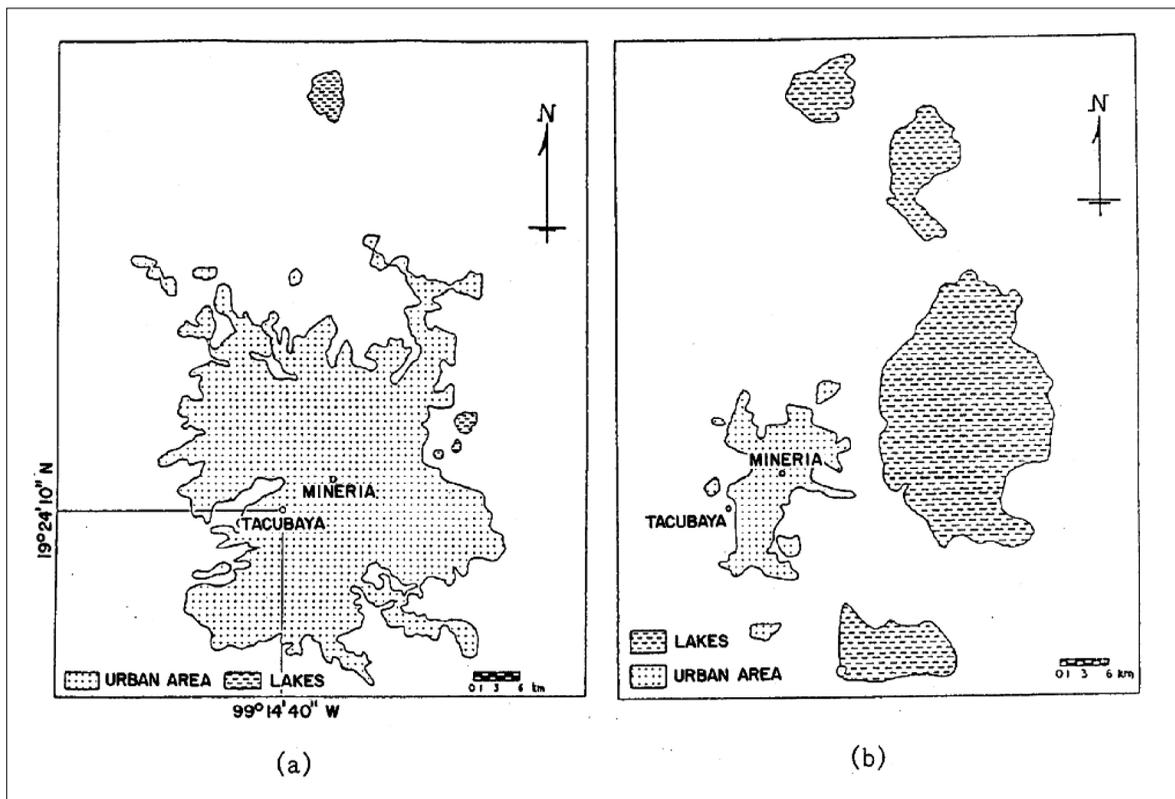


Figura 1. Escenarios de uso de suelo utilizados para la modelación del efecto climático por la desaparición de cuerpos de agua en el Valle de México. En (a) en 1991 y en (b) en 1929. Fuente: Jazcilevich et al. (2000), del original de los dibujos realizados por Alfonso Estrada para el Dr. Jáuregui.

se pudo aseverar que la desaparición de los cuerpos de agua registrada desde 1929 fue la principal causa del incremento térmico. Como se comenta en la revista *Nature*, (Gillon, 2000), gracias a este trabajo de modelación se pueden proponer posibles medidas de remediación, como la recuperación de cuerpos de agua, para reducir las ondas de calor en la CDMX, una preocupación en salud pública por el avance del cambio climático. La construcción del lago Nabor Carrillo, en la zona aledaña a Texcoco, muestra que es posible la recuperación de los lagos desde un punto de vista de ingeniería civil. La aportación del Dr. Jauregui en este trabajo fue de suma importancia para la adquisición de datos históricos e interpretación de resultados.

Trabajos con modelos más avanzados

Posteriormente, otras publicaciones utilizan modelos más avanzados para recrear el clima y el tiempo del Valle tomando en cuenta cambios de cobertura superficial, ampliando y mejorando las conclusiones ya obtenidas, aunado a que nuevas observaciones proporcionan mejores datos que auxilian y complementan los esfuerzos de modelación. Estos esfuerzos ahondaron en los temas de cambio de uso de suelo, clima y calidad del aire que tanto atrajeron la atención del Dr. Jauregui.

Vargas y Magaña (2020) muestran, mediante datos y análisis estadísticos, los efectos en la Isla de Calor Urbana (ICU) por el crecimiento e incremento de la densidad de la ciudad. La ICU se define como la diferencia entre la temperatura máxima en una zona urbana y un área rural. También en este trabajo se reporta el incremento de lluvias extremas dentro de la CDMX relacionados con los procesos convectivos influenciados por la actividad antropogénica. Nuevamente, Jáuregui los menciona en Jáuregui y Romales (1986).

Mediante la modelación se han podido reproducir fenómenos convectivos como el de confluencias (o convergencias) que tienen que ver con estas observaciones. En Jazcilevich et al. (2003) se muestra la formación de las convergencias y su migración por el Valle (Figura 2). Esto se obtuvo implementando el modelo MultiScale Climate Chemistry Model (MCCM) en el Valle de México (Grell et al., 2000; García et al., 2000).

La Figura 2 también muestra cómo fenómenos como las convergencias influyen en el transporte de contaminantes. Por cierto, el Dr. Jáuregui solía decir que la contaminación, así como la temperatura y la lluvia, son parte del tiempo y del clima, ya que podemos hablar de una ciudad contaminada, de épocas del año o de días de mayor o menor contaminación, tal y como lo hacemos de la lluvia y el calor.

Además de convergencias, se pueden reproducir procesos convectivos difíciles de observar numéricamente, lo que indica su existencia en el Valle de México. Tal es el caso de la interacción de procesos convectivos y las montañas mostrado en la Figura 3. Ahí podemos observar como una parcela en el Valle de México denotada por la concentración de monóxido de carbono es proyectada anabáticamente a la Sierra del Ajusco y, al ascender por convección mecánica, es devuelta al Valle al encontrarse con la atmósfera libre (Jazcilevich et al., 2003a). Las parcelas finalizan su recorrido en la superficie del Vaso de Texcoco, teniendo lugar un proceso de fumigación. Este fenómeno es difícil de observar. Gracias a la modelación, podemos inferir su existencia.

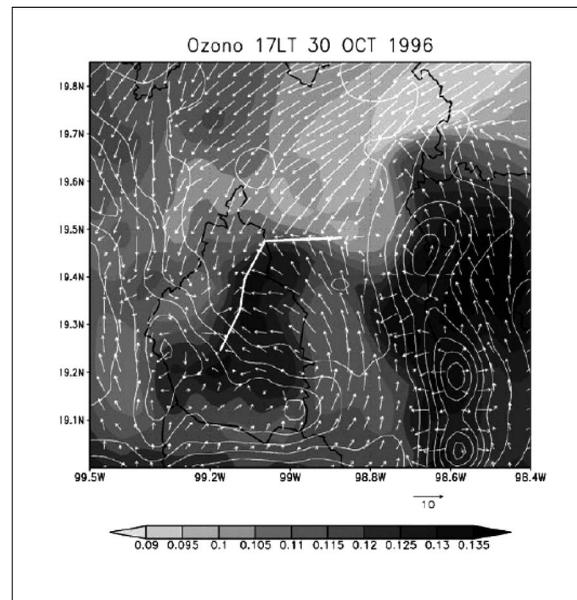


Figura 2. Velocidades del viento superficial y concentraciones de ozono mostrando con las líneas blancas la formación de convergencias en el Valle de México.

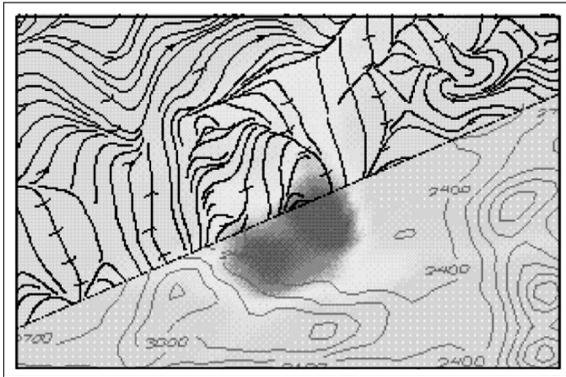


Figura 3. Corte vertical del noreste al suroeste sobre el Valle de México, mostrando un patrón circular de la dirección del viento, que transporte monóxido de carbono. Las parcelas de aire trazadas por el monóxido de carbono son proyectadas a la Sierra del Ajusco, son devueltas al Valle por la atmósfera libre, finalizando su recorrido en la superficie en las cercanías del Vaso de Texcoco mediante un proceso de fumigación. Fuente: Jazcilevich *et al.* (2003).

En Aquino-Martínez *et al.* (2021) se amplían estos resultados. Aquí se realiza un exhaustivo estudio de modelación usando el modelo Weather Research Forecasting (WRF) (NCAR-WRF, 2023), para estudiar las convergencias, la ICU y efectos de urbanización en los flujos atmosféricos por cambios de las coberturas del suelo.

Una de las aplicaciones más importantes de la modelación atmosférica es que permite predecir el efecto en la atmósfera que tienen las intervenciones y proyectos urbanos en el Valle en la calidad del aire. Por ejemplo, podemos predecir qué pasaría si se recupera la zona lacustre del lago de Texcoco (Jazcilevich *et al.*, 2002). Algunos de estos se muestran en la Figura 4. Nótese que se ha logrado modelar las concentraciones de ozono en zonas densamente pobladas de la CDMX por la presencia de un nuevo lago en Texcoco. Esto se debe a la generación de brisa agua-tierra, lo que produce la ventilación de contaminantes.

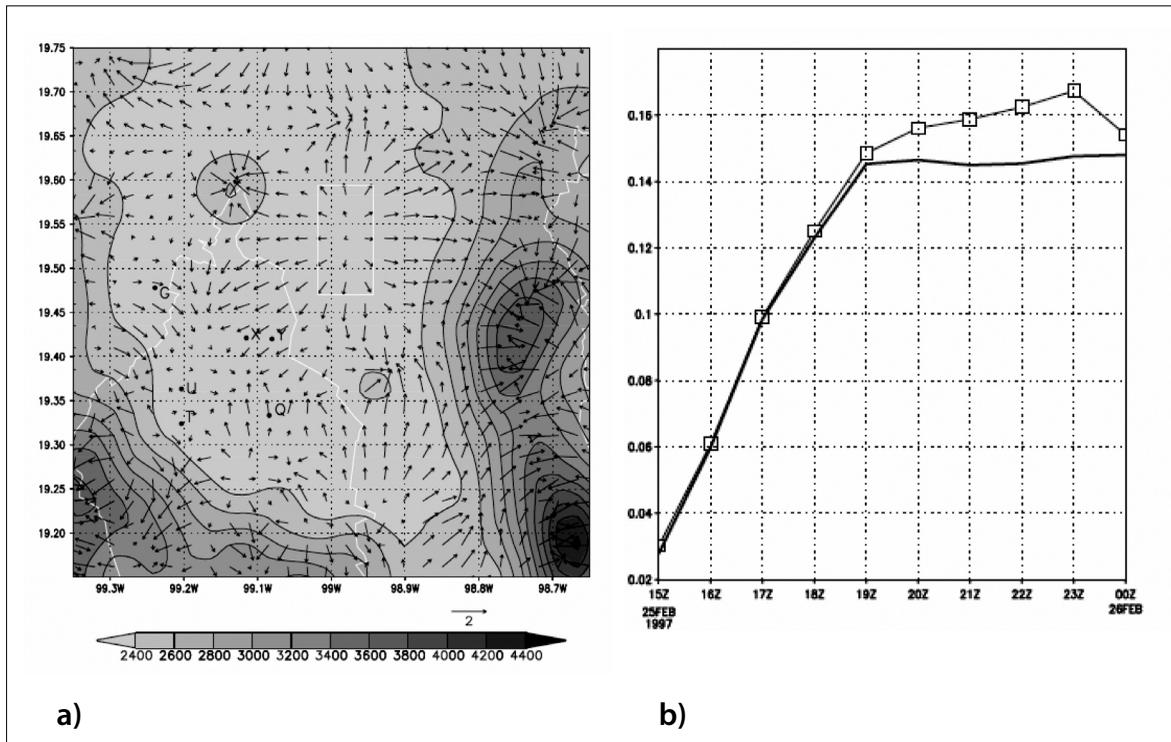


Figura 4. En (a) campo de vientos superficiales en ms^{-1} por la presencia del nuevo lago en el Valle. En (b), comparación de concentraciones en ppb de ozono con y sin nuevo lago en el Punto P2. Línea continua con lago, línea con cuadros, sin lago. Fuente: Jazcilevich *et al.* (2002).

Otro ejemplo de modelación aplicada al diseño urbano fue el de la evaluación ambiental de la propuesta del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en el lago de Texcoco, propuesto en el 2001. En las mesas de trabajo se contó con la presencia del Dr. Jauregui. En Jazcilevich et al. (2003b), se pudo predecir cuál sería el efecto en la contaminación de la atmósfera por la construcción de este aeropuerto, tomando en cuenta la urbanización inducida por dicha obra. Se consideraron dos posibles localizaciones: Texcoco y Tizayuca, Hidalgo. Este trabajo fue en conjunto con especialistas en geografía social del Instituto de Geografía de la UNAM. Se pudo observar que la contaminación atmosférica inducida era similar. Además, en Jazcilevich et al. (2003c), se probaron cuáles medidas para controlar posibles tolvaneras locales podrían implementarse en los alrededores de la propuesta de este aeropuerto en Texcoco.

Si bien gracias al Plan Texcoco, en la década de 1980 se redujeron las tormentas de arena provenientes del Vaso de Texcoco que incidían en la CDMX y que el Dr. Jáuregui reportó desde 1958, existen otras fuentes de emisiones de polvos. Tal es el caso del cañón montañoso formado entre las Sierras del Ajusco y de la Sierra Nevada, donde se encuentra la población de Tenango del Aire y zonas agrícolas generadoras de partículas en sus alrededores. En colaboración con el Departamento de Agricultura de los EE.UU., se ligó un modelo de calidad del aire y uno de erosión eólica (Díaz-Nigenda *et al.*, 2010). Este esfuerzo incluye un modelo de emisión dinámico, donde las emisiones de partículas varían según la velocidad el viento. Hasta dónde llega nuestra información, este es el primer resultado reportado por un sistema configurado por un modelo de calidad del aire y erosión. Algunos de los resultados se muestran en la Figura 4.

Los techos verdes o naturados han sido contemplados como una medida para beneficiar el ambiente urbano. Entre sus ventajas está modular cargas hidráulicas por precipitaciones, evitando inundaciones. Sin embargo, en Vázquez et al. (2016) se muestra que, bajo condiciones de sistemas de alta presión, la implantación de esta medida en una zona de la CDMX provocaría una inversión cercana a la superficie que podría disminuir la altura

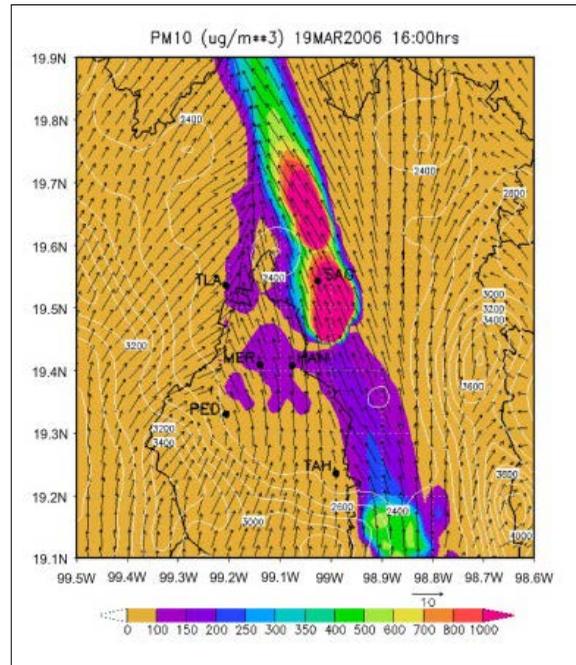


Figura 5. Concentraciones de partículas modeladas generadas en el área de Tenango del Aire y transportadas al Valle de México. Fuente: Díaz-Nigenda et al. (2010).

de la capa de mezcla. Esto es un efecto no deseado. Algunos resultados a las 0900 LST se muestran en la Figura 6.

Nuevas tecnologías y modelos, nuevas investigaciones

A medida que la tecnología computacional, los métodos numéricos y que el progreso en instrumentación avanza, la resolución temporal y espacial de la modelación del clima y el tiempo se incrementa. Esto, junto con la posibilidad de tener una mayor densidad de observaciones, permite el estudio y predicción de fenómenos atmosféricos con mayor resolución, por lo que se puede modelar el efecto en el tiempo y clima por edificaciones y zonas verdes como los jardines urbanos. Por ejemplo, tenemos que ahora se pueden reproducir fenómenos a 200 m de resolución usando modelos “urbanizados” como el u-WRF, (UCAR-2023), cuando antes el límite práctico era cuando mucho de un km. Para lograr este fin, se requieren parametrizaciones de la física

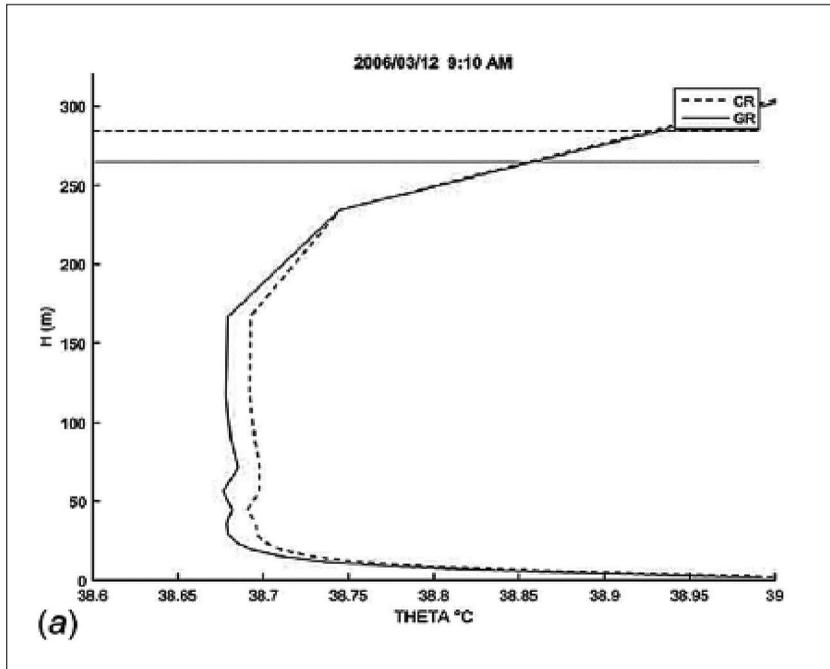


Figura 6. Efecto por naturación de azoteas en una zona de la CDMX. Las líneas puntuadas corresponden a techos convencionales y las continuas a techos verdes. Se aprecian los perfiles de temperaturas potenciales y la altura de capa de mezcla (líneas horizontales) calculada por WRF.

que corresponden a espacios urbanos específicos. Esto demanda nuevas definiciones de coberturas superficiales, como los propuestos en Oke *et al.* (2017). Los sistemas de información geográfica son imprescindibles para poder implementar

estos modelos, mostrando los nexos cada vez más estrechos entre la geografía física s nivel urbano y la modelación de la atmósfera.

En la Figura 7 se muestran resultados obtenidos en el Valle de México usando u-WRF. Estos mode-

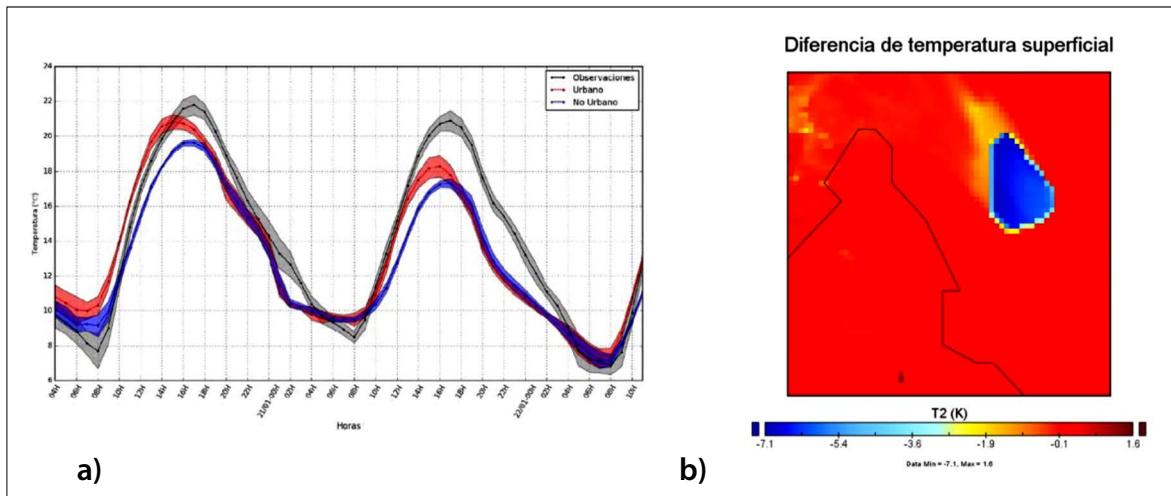


Figura 7. En (a) resultados obtenidos de temperatura potencial en la superficie urbana, mejorando los obtenidos por WRF. En rojo u-WRF, en azul WRF y en gris los medidos (Valdés Fernández, 2017). En (b) diferencia de las temperaturas superficiales con la situación actual y cuando se introduce un cuerpo de agua en el Vaso de Texcoco (Zavaleta, 2023, comunicación personal), usando el modelo u-WRF. Estos resultados son con una resolución de 500 m.

los permitirán una mejor predicción del clima y tiempo, incluyendo la contaminación atmosférica.

Son necesarias mayores resoluciones a escalas de centímetros para resolver flujos atmosféricos a nivel de cañón urbano. Este conocimiento es necesario si queremos obtener el efecto local en la atmósfera por edificios, mobiliario urbano como calles y banquetas, así como del tráfico vehicular, y actividad comercial e industrial. Después de todo, este es el ámbito urbano es donde los ciudadanos llevan a cabo sus actividades económicas y sociales. El uso de modelos basados en la Dinámica de Fluidos Computacionales (DFC) son necesarios para predecir el flujo atmosférico en estas escalas urbanas. En la Figura 8 se muestra la emisión debido al tráfico vehicular en un cañón urbano y las correspondientes concentraciones de monóxido de carbono usando DFC (Zavala-Reyes *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

Como se ha expuesto en este trabajo, la modelación del clima y la contaminación urbana en el Valle de México es una actividad que ha sido llevada a cabo desde los años 1990. Se ha mostrado el esfuerzo

realizado principalmente en la UNAM, que ha profundizado en los temas alentados por el Dr. Ernesto Jauregui, y en los que fue uno de sus precursores. Es por este motivo que su nombre aparece entre los pioneros del estudio del clima urbano a nivel internacional (Oke *et al.*, 2017).

La modelación computacional provee un proceso perfectible para investigar el comportamiento de la atmósfera en el Valle de México. Con este conocimiento hemos podido determinar el efecto en la atmósfera por forzantes antropogénicos y naturales estableciendo causa y efecto. Algunos de estos fenómenos, como la presencia de la urbanización y cuerpos de agua, fueron observados con datos históricos por el Dr. Jauregui.

Mediante la modelación se establece una base objetiva para la planeación urbana, que permite predecir los efectos cambios en las coberturas de suelo, de nuevas tecnologías de transporte, de la producción energética e industriales, y proponer políticas de adaptación al cambio climático. Gracias a estos esfuerzos, contamos con herramientas cada vez más útiles para orientar las políticas públicas en una sociedad participativa.

La modelación del clima y la contaminación atmosférica se ha vuelto un asunto de atención

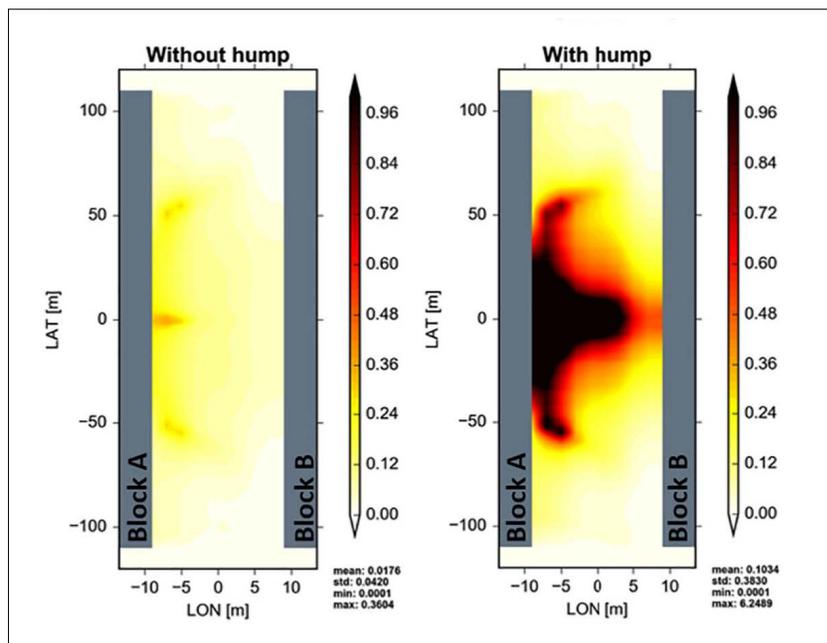


Figura 8. Vista de pájaro, de la concentración (μgm^{-3}) de partículas en un cañón urbano debido a dos escenarios de tráfico, usando un DFC, un modelo de tráfico y emisiones vehiculares. Fuente: Zavala-Reyes *et al.* (2019).

urgente ante una nueva revolución tecnológica en transporte y movilidad, y la adaptación ante el cambio climático. Es imprescindible ampliar el apoyo a esta actividad de investigación para que los esfuerzos pioneros del Dr. Ernesto Jauregui rindan aún mayores frutos a la sociedad.

REFERENCIAS

- Aquino-Martínez, L. P.; Quintanar, A. I.; Ochoa-Moya, C. A.; López-Espinoza, E. D.; Adams, D. K.; Jazcilevich-Diamant, A. (2021). Urban-Induced Changes on Local Circulation in Complex Terrain: Central Mexico Basin. *Atmosphere*, 12, 904. <https://doi.org/10.3390/atmos12070904>
- Bossert, J. E. (1997). An investigation of flow regimes affecting the Mexico City región. *Journal of Applied Meteorology*, 36(2), 119-140. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<0119:AIOFRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<0119:AIOFRA>2.0.CO;2)
- Castro, T., Mar, B., Longoria, R., Morales, L. y Ruiz-Suarez, L. G. (2001). Surface albedo measurements in Mexico City metropolitan área. *Atmosfera*, 14(2), 69-74.
- Díaz-Nigenda, E., Tatarko, J., Jazcilevich, A. D., García, A. R., Caetano, E. y Ruíz-Suárez, L. G. (2010). A modeling study of Aeolian erosion enhanced by surface wind confluences over Mexico City. *Aeolian Research*, 2(2-3), 143-157. DOI: 10.1016/j.aeolia.2010.04.004
- Fast, J. D. y Zhong, S. (1999). Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within Mexico City basin. *Journal of Geographical Research*, 103(D15), 18927-18946. <https://doi.org/10.1029/98JD01725>
- Fernández Valdés, A. C. (2017). Influencia del cambio de la cobertura de suelo urbano en la meteorología de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio.unam.mx/contenidos/influencia-del-cambio-de-la-cobertura-de-suelo-urbano-en-la-meteorologia-de-la-ciudad-de-mexico-72365?c=r60Ay2&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0
- Flassak, Th. (1990). Ein Nichtydrastatisches Mesokaliger Modell der Planetaren Grenzschicht. *Fortschr-Ver, VDI*, 15, 74, 203.
- García, R. A., Schoenemyer, T., Jazcilevich, A., Ruiz-Suarez, D. G., Fuentes-Gea, V. (2000). Implementation of the Multiscale Climate Chemistry Model (MCCM) for Central Mexico. *Advances in Air Pollution*, vol. 8, pp. 71-78). Eight International Conference on Air Pollution. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-2942546555&origin=inward&txGid=993385f70a1463093357552b655e51e1>
- Gillon, J. (2000). The water cooler. *Nature*, 404, 555. <https://doi.org/10.1038/35007172>
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Textos selectos de geografía de México. Instituto de Geografía.
- Jauregui, E. y Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City, *Atmospheric Environment*, 30(20), 3383-3389. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00041-6](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00041-6).
- Jazcilevich, A., Fuentes, V., Jauregui, E. y Luna, E. (2000). Simulated Urban Climate Response to Historical Land Use Modification in the Basin of Mexico. *Climatic Change*, (44), 515-536. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005588919627>
- Jazcilevich, A. D., García Agustín, R., Ruiz-Suarez, L. G. (2002). A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico. *Atmospheric Environment*, (36), 2297-2307. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00197-8)
- Jazcilevich, A., Gracia, A., Ruiz-Suarez, L. G. (2003a). A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. *Atmospheric Environment*, (37), 183-193. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00893-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00893-2)
- Jazcilevich, A. D., García, A. R., Ruiz-Suárez, L.G., Cruz-Núñez, X., Delgado, J. C., Tellez, C. y Chias, L. B. (2003b). An air quality modeling study comparing two possible sites for the new international airport for Mexico City. *Journal of Air Waste Management Association*, 53(3), 366-378. DOI: 10.1080/10473289.2003.10466159. PMID: 12661695.
- Jazcilevich, A. D., García, A. R. y Ruiz-Suárez, L. G. (2003c). An air pollution modeling study using three surface coverings near the New International Airport of Mexico City. *Journal of Air Waste Management Association*, 53(10), 1280-1287. DOI: 10.1080/10473289.2003.10466281. PMID: 14604339.
- Moussiopoulus, N. (1994). *The Eumac Zooming model: Model Structure and Applications*. Eurotrac International Scientific Secretariat, Garmisch-Partenkirchen.
- NCAR-WRF. (2023). <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>. Consultado el 30 de noviembre de 2023.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. y Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- UCAR. (2023). WRF-Urban Modeling. <https://ral.ucar.edu/model/wrf-urban-modeling>. Consultado el 30 de noviembre de 2023.

- Urrutia, J. (2019, 14 de octubre). Formación del Valle de México. Conferencia El Colegio Nacional. <https://colnal.mx/agenda/iv-encuentro-libertad-por-el-saber-1519-a-quinientos-anos-formacion-del-valle-de-mexico-geologia-volcanismo-clima-conferencia/>
- Vazquez Morales, W., Jazcilevich, A., García-Reynoso, A., Caetano, E., Bornstein, R. D. y Gómez, G. (2016). Influence of Green Roofs on Early Morning Mixing Layer Depths in Mexico City. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(6). <https://doi.org/10.1115/1.4034807>
- Zavala-Reyes, J. C., Jeanjean, A. P. R., Leigh, R. J., Hernández-Paniagua, I. Y., Rosas-Pérez, I. Y Jazcilevich, A. (2019). Studying human exposure to vehicular emissions using computational fluid dynamics and an urban mobility simulator: The effect of sidewalk residence time, vehicular technologies and a traffic-calming device. *Science of The Total Environment*, (687), 720-731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.422>