

Modelación de trayectorias y estimación de dosis en la Ciudad de México por una emisión nointencionada de material radioactivo desde la Planta Nucleoeléctrica Laguna Verde

Trajectory modeling and dose estimation in Mexico City due to an unintentional release of radioactive material from the Laguna Nuclear Power Plant

Agustín García-Reynoso*¹, Lina Merino-Salgado¹, Mayra Vera-Sanchez¹, Iván Hernández-Paniagua¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera o Atmósfera y Cambio Climático. Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México. Correo-e (*e-mail*): agustin@atmosfera.unam.mx*

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Author to whom correspondence should be addressed*

Recibido / *Received*: Septiembre / *September* 13, 2024

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 30, 2024 (Número 1, enero-junio 2025 / *Number 1, January-June* 2025)

Resumen

Se estimó la dosis de radiación teórica en la Ciudad de México (CDMX) de una posible emisión no intencional de material radioactivo a la atmósfera. Para la identificación de la posible dosis se computaron trayectorias iniciando en la Central Nuclear Laguna Verde con un recorrido de 12 horas para un conjunto de días de los años 2019-2020, empleando el modelo híbrido Lagrangiano integrado de trayectoria de partícula única (*por sus siglas en inglés*) *Hysplit* y la información del pronóstico meteorológico. De las trayectorias generadas para cada año, se seleccionaron las del mes donde se observaron trayectorias que llegarían a la ciudad de México (CDMX) y se computaron todas las trayectorias de todas las horas de ese mes. De este conjunto de trayectorias se seleccionó la que llegaría a la CDMX y se realizó la modelación de dispersión para conocer la concentración que podría generar en el ambiente y con ello calcular la dosis. Para estimar la dosis se consideró una emisión similar a la de Fukushima y la trayectoria tendría hasta 24 horas de desplazamiento. Se observó que la mayoría de las trayectorias se agrupaban al este de la Sierra Madre Oriental pudiendo alcanzar Poza Rica de Hidalgo, Xalapa de Enríquez y el Puerto de Veracruz. Si se considera una emisión hipotética de 5 PBq durante una hora en el mes de octubre de 2019 y en agosto de 2020 se observa que la dispersión llega a la CDMX representaría una dosis en 24 horas de 0.01 a 1 mSv.

Palabras clave: *Hysplit*, dosis, trayectorias, escenario, Xalapa de Enríquez, Puerto de Veracruz

Abstract

The theoretical radiation dose in Mexico City (CDMX) from a possible unintentional release of radioactive material into the atmosphere was estimated. To identify the possible dose, trajectories were computed starting at the Laguna Verde Nuclear Power Plant with a 12-hour journey for a set of days in the years 2019-2020, using the integrated hybrid Lagrangian single-particle trajectory model (Hysplit) and weather forecast information. From the trajectories generated for each year, those from the month where trajectories were observed that would reach Mexico City (CDMX) were selected and all the trajectories for all hours of that month were computed. From this set of trajectories, the one that would reach CDMX was selected and dispersion modeling was performed to determine the concentration it could generate in the environment and thereby calculate the dose. To estimate the dose, an emission similar to that of Fukushima was considered and the trajectory would have a displacement of up to 24 hours. It was observed that most of the trajectories were grouped to the east of the Sierra Madre Oriental and could reach Poza Rica de Hidalgo, Xalapa de Enríquez and the Port of Veracruz. If a hypothetical emission of 5 PBq for one hour is considered in the month of October 2019 and in August 2020, it is observed that the dispersion reaches Mexico City, which would represent a dose of 0.01 to 1 mSv in 24 hours.

Keywords *Hysplit, dose, trajectories, scenario, Xalapa, Port of Veracruz*

Introducción

Se considera que un contaminante es toda sustancia o energía que al estar en el ambiente lo modifica de forma negativa (DOF, 1988). Así, la radiación ionizante es una fuente de energía y a partir de un valor umbral de emisión se puede considerar como un tipo de contaminación. Los compuestos radiactivos, los equipos de rayos X y los combustibles de los reactores nucleares pueden emitir radiación ionizante. La radiación ionizante incluye tanto partículas como radiación electromagnética. Para el caso de la partículas se tiene la radiación alfa y beta que son esencialmente fragmentos de átomos, en el caso de la radiación electromagnética se tienen a los rayos X y gamma (CDC, 2016).

Las fuentes de radiación pueden ser naturales (CNSC, 2020) o de origen antrópico debido a liberaciones continuas o no intencionales como en los accidentes de Chernóbil (Chirikova et al., 2022) y Fukushima (Nishiyama et al., 2022). Dependiendo de la dosis de radiación, se pueden ocasionar efectos adversos a la salud que pueden manifestarse como quemaduras de la piel, defectos de nacimiento, caída del cabello, cáncer e incluso provocar la muerte (CDC, 2016). La dosis media de radiación por una persona en los EE. UU. es de 6,200 mSv (EPA, 2022).

A diferencia de las plantas termoeléctricas convencionales que usan petróleo, gas natural o carbón en una central nuclear el principio básico es la obtención de energía calorífica por medio de la fisión de los átomos. Esta energía calorífica convierte el agua líquida en forma de vapor la que se convierte en energía mecánica al mover una turbina y mediante un generador se convierte en energía eléctrica (SGM, 2017).

La Central Nuclear Laguna Verde (CNLV) en Veracruz México tiene una operación a la fecha de 30 años, su licencia de operación ha sido renovada hasta el año 2050 (CFE, 2020). El combustible usado en la CNLV contiene uranio enriquecido en alrededor del 4% y no podría causar una explosión atómica ya que para ello se requiere de una proporción superior al 95% (García-Díaz, 2020; Imparcial, 2020). La CNLV se ubica en Veracruz, México, a 60 km al noreste de la ciudad de Xalapa, a 70 km del Puerto de Veracruz y a 290 km de la Ciudad de México (Sánchez-Yáñez, 2007) y aporta el 4.7% de la energía eléctrica del país. Originalmente la central tenía una capacidad de 654 MW por unidad, pero en el 2010 se aumentó a 805 MW para la Unidad 1 y 803 MW para la Unidad 2, actualmente tiene una capacidad de 1640 MW.

Desde hace tiempo, en el desarrollo de los planes de respuesta a emergencias y en las evaluaciones de riesgo se emplean modelos de dispersión con los que se puede conocer la concentración y la exposición a emisiones ionizantes mediante los resultados de dispersión (Maryon y Best, 1995).

En México, solo se tiene conocimiento público de un estudio que analiza el área de influencia de las emisiones en caso de un evento extraordinario en la Central Nuclear (Hernández-Garcés et al., 2024). Este trabajo se centra en el impacto de una liberación en las ciudades cercanas a la planta nuclear, pero no aborda los efectos en poblaciones más distantes, como la Ciudad de México. En este trabajo se presenta el procedimiento utilizado para identificar las posibles zonas de influencia de una emisión de materia ionizante debido a una liberación no intencional, con el objeto de identificar si existe una posible trayectoria que surja desde la Central Nuclear Laguna Verde y cuyo destino llegue a la Ciudad de México. Para este trabajo se emplearon datos de meteorología para los años 2019 y 2020.

Datos y métodos

Datos meteorológicos

La información meteorológica provino del pronóstico meteorológico elaborado por el grupo de Interacción Océano Atmósfera del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Este pronóstico se elaboró utilizando el modelo Weather Research and Forecasting Model (WRF) en su

versión 3.9 (GIOA, 2017). El pronóstico contemplaba dos dominios de modelación: El dominio 1 cubriendo toda la República Mexicana y el dominio 2 el centro de México. Se recopiló información a partir del 2017 a la fecha. Se emplearon los resultados de los años 2019 y 2020, utilizando el dominio 2 que incluyó el área de latitud sur, 14.5 a 21.6 grados al norte, y de longitud -106.1 a -93.1, con celdas de 5x5 km. Cada pronóstico diario generó un archivo que contenía 5 días de pronóstico (120 horas) y, para la selección de los episodios y en la generación de trayectorias, solamente se emplearon las primeras 55 horas de cada archivo como se describe posteriormente. Las variables que se extrajeron de este pronóstico y fueron empleadas por el modelo híbrido lagrangiano de trayectoria integrada de partícula única (por sus siglas en inglés *HYSPLIT*) fueron presión, temperatura, campo de vientos, viento a 10 m, la razón de mezcla de vapor de agua, la altura de capa de mezclado, la altura de terreno y la precipitación. Este sistema de pronóstico meteorológico se evaluó con observaciones en superficie y en el mar mediante boyas. Los resultados de la evaluación mostraron un desempeño aceptable para reproducir la temperatura y el viento en la zona (Zavala-Hidalgo et al., 2017).

Modelo de trayectorias y de dispersión *HYSPLIT*

Para determinar la dirección en la que viajarían las emisiones y las zonas afectadas se utilizaron trayectorias calculadas mediante el modelo híbrido lagrangiano integrado de trayectoria de partícula única – *HYSPLIT* (Stein et al., 2015). El método de cálculo del modelo fue un híbrido entre el enfoque lagrangiano, que usa un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y de difusión a medida que las trayectorias o paquetes de aire se mueven desde su ubicación inicial y la metodología euleriana, que emplea una cuadrícula tridimensional fija como un marco de referencia para calcular las concentraciones de contaminantes en el aire. En el *HYSPLIT*, el cálculo básico de la trayectoria constó de tres pasos: Configuración, ejecución y visualización. Una trayectoria representa la integración del vector de posición en el espacio y el tiempo, a través de un campo de viento que varía tanto en el tiempo como en el espacio. En la atmósfera, la dirección y velocidad del viento fue un campo continuo, pero la representación numérica utilizada en estos cálculos fue “discreta” en el espacio y el tiempo. La precisión con la que los datos meteorológicos cuadrículados representaban las condiciones atmosféricas reales podía variar de un día a otro y dependía de la ubicación de las regiones con gradientes pronunciados con respecto de los puntos de la cuadrícula.

En este trabajo se empleó el sistema que trabaja en un ambiente GNU/Linux con el que se pueden elaborar programas auxiliares en BASH para emplear la información generada por el pronóstico meteorológico para la región y, al mismo tiempo, generar las trayectorias y los productos de visualización.

Cálculo de trayectorias

Para identificar la trayectoria que pudiera llegar a la Ciudad de México, se empleó el siguiente procedimiento: i) Se seleccionaron los meses con vientos que produjeran trayectorias hacia la CDMX. Para ello, se analizaron cuatro episodios por mes durante los años 2019 y 2020, lo que resultó en un total de 96 días por año. Los episodios seleccionados correspondieron a los días 1-2, 6-7, 15-16 y 24-25 de cada mes, asegurando así una muestra representativa anual. Para estos episodios, se calcularon las trayectorias, las zonas de paso más frecuentes y se agruparon en conjuntos mensuales y anuales. A partir de estos resultados, se identificó el mes en el que alguna trayectoria se dirigiera hacia la CDMX. Durante ese mes, se generaron todas las trayectorias horarias, seleccionándose aquella que se aproximara más a la ciudad. Posteriormente, ii) Se realizó la modelación de dispersión para la trayectoria seleccionada de ese mes con el fin de estimar la dosis máxima que podría alcanzarse.

En el cálculo de las trayectorias para los episodios seleccionados se emplearon los datos meteorológicos del pronóstico empleando 55 horas para cada episodio. Se consideró la ubicación de la CNLV: Latitud=19.7208, longitud= -96.406 y la altura de liberación de la emisión fue de 100 m sobre el nivel piso. El cálculo de las trayectorias inició a las 06:00 UTC (ver Glosario) del día seleccionado, se calculó una trayectoria para cada hora hasta las 12:00 UTC del segundo día, obteniendo así 36

trayectorias por cada día seleccionado del mes, la distancia recorrida por la trayectoria fue la correspondiente a 12h de desplazamiento.

Para el mes en el que se identificaron trayectorias que pudieran llegar a la CDMX, se siguió el mismo procedimiento, pero en este caso se generaron trayectorias para cada hora del mes, obteniendo un total de 744 trayectorias con un desplazamiento de 24 horas. De estas 744 trayectorias, se seleccionó aquella cuyo destino fuera la CDMX, identificándose una trayectoria correspondiente al año 2019 y otra al 2020.

Con el fin de evaluar las emisiones potenciales, se utilizó como punto de referencia un escenario análogo al incidente de Fukushima, pero considerando la capacidad de generación de energía de la planta propuesta. En concreto, se consideraron los reactores de la planta de Fukushima Daiichi, que produjeron 2.719 MW de potencia. En este contexto, se estimó que la emisión durante el incidente de Fukushima ascendió a 940 petabecquerelios (PBq) de yodo-131 en un lapso de 4 a 6 días (WNA, 2022). Estos supuestos formaron una base para evaluar el impacto ambiental potencial y las consideraciones de seguridad de la planta de energía nuclear propuesta ubicada en México. Extrapolando esta información al contexto de la CNLV, que cuenta con una capacidad de 1640 MW, el escenario de emisión proyectado implica una liberación calculada de 5.3 PBq/h de I-131 en un lapso de 5 días.

La dosis se estimó con base en la concentración y los factores de conversión de dosis de la Agencia de Protección al Ambiente de EE. UU. (Eckerman et al., 1988). En este caso, el I-131 se consideró un factor de conversión a dosis por inhalación de $6.08E-09$ (REM/hr)/(Bq/m³). Este valor se empleó considerando que se inhalara durante 24 horas la concentración obtenida por el modelo. El tiempo de vida media supuesto para el I-131 fue de 8.04 día^{-1} que se empleó durante el tiempo de traslado durante la dispersión.

Resultados y discusión

Para identificar el área de influencia potencial de dispersión de las emisiones se emplearon los resultados de las frecuencias de las trayectorias que se muestran en la Figura 1. Estas consideran trayectorias de 12 horas de duración y que pueden llegar a una altura de 5000 m.s.n.m.

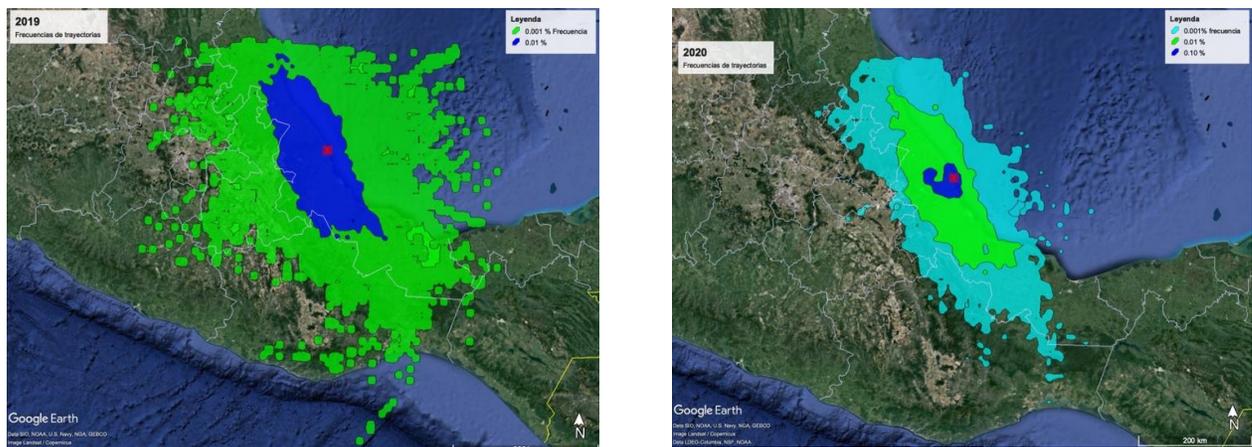


Figura 1. Porcentaje de frecuencias de las trayectorias para el año 2019 (izq.) y 2020 (der.)

Las frecuencias mostradas en las Figura 1 se calcularon con 1,728 trayectorias para cada año. El valor mínimo de 0.001% representaría que solamente una trayectoria pasó por esa celda y el máximo de 0.1% alrededor de 170. De las trayectorias agrupadas por mes, se identificó que en octubre de 2019 y en agosto de 2020 habrían trayectorias llegando a la Ciudad de México, CDMX, por lo que para esos

meses se realizaron las trayectorias horarias de los 31 días del mes obteniéndose 744 trayectorias para cada uno (Figura 2).

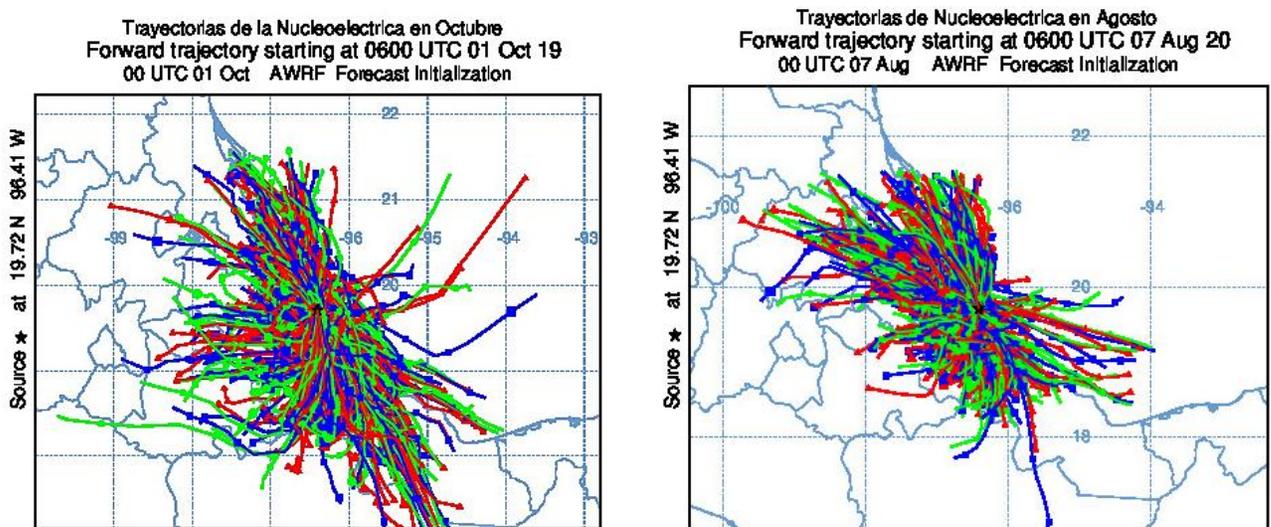


Figura 2. Trayectorias para el mes de octubre 2019 (izq) y agosto 2020 (der)

La Figura 3 muestra las frecuencias de las trayectorias y en la Figura 4 los conjuntos, utilizando las 744 trayectorias y se emplearon 712 trayectorias para agruparse en siete conjuntos. Para octubre de 2019 y para agosto del año 2020 se utilizaron 682 trayectorias en los seis conjuntos mostrados. Existirían trayectorias no incluidas debido a que no se pueden agrupar en alguno de los conjuntos existentes ni tampoco pueden emplearse para hacer otro conjunto adicional.

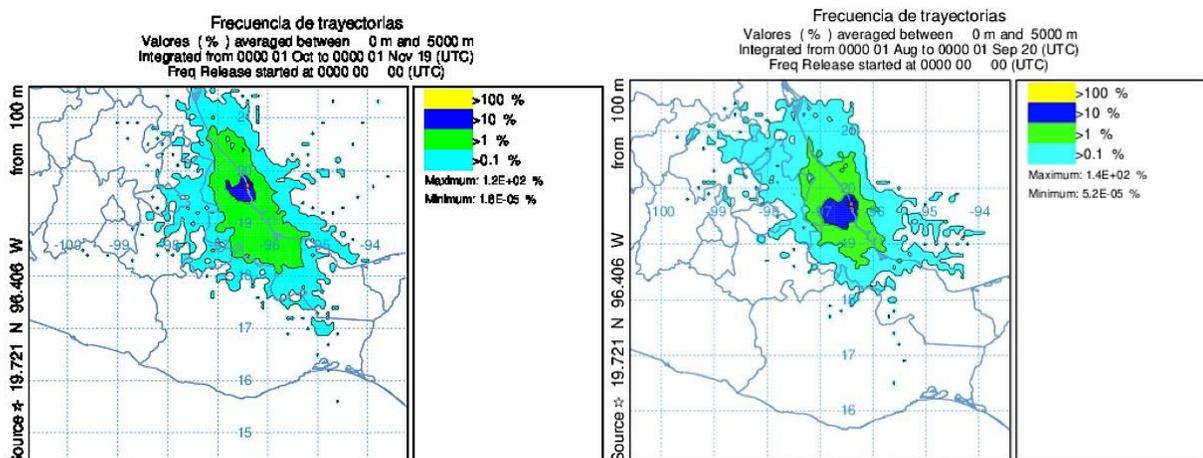


Figura 3. Frecuencias de trayectorias para octubre 2019 (izq.) y agosto 2020 (der):

La Figura 5 muestra la concentración integrada durante seis horas que se tendría de una emisión de una unidad de masa liberada durante una hora iniciando a las 03:00 UTC del día 15 de octubre. A este valor también se le conoce como factor de dilución que convierte la emisión (masa/tiempo) en concentración (masa/volumen) y se aprecia que valores de $1E-14$ se pueden tener en zonas de la CDMX.

La Figura 6 muestra las concentraciones para el mes de agosto de 2020 donde se aprecia que concentraciones de $1E-14$ pueden llegar al valle de México y concentraciones de $1E-16$ a la CDMX.

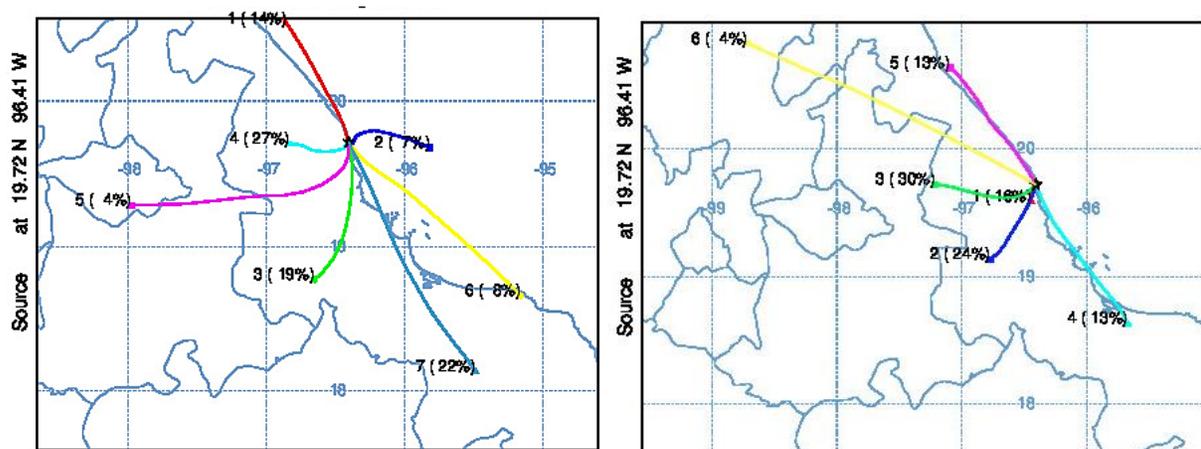


Figura 4. Conjuntos de trayectorias para octubre 2019 (izq) que consideran 712 trayectorias y agosto 2020 considerando 682 trayectorias (der)

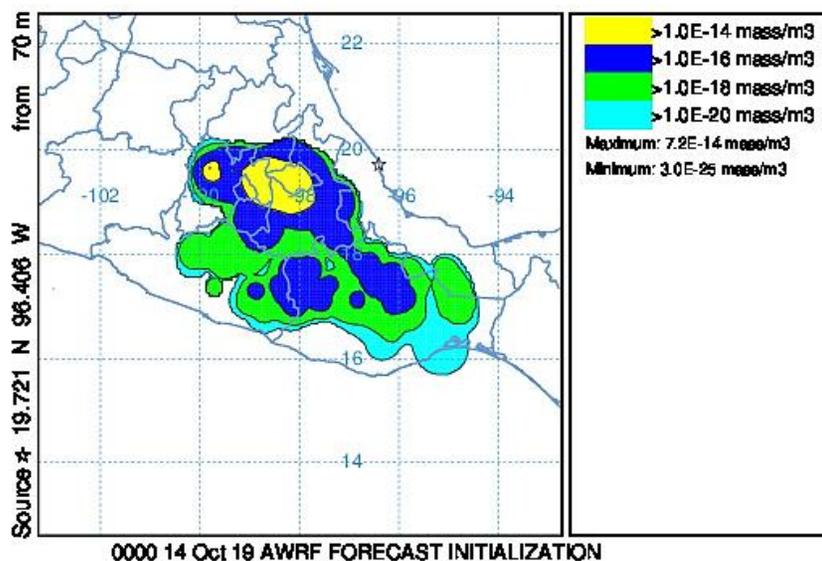


Figura 5. Concentraciones (masa/m³) promedio entre 0 m a 100 m, integradas desde el día 15 de octubre del 2019 a las 21:00 hrs TUC (Tiempo Universal Coordinado) al 16 de octubre 03:00 TUC. La emisión inició a las 3:00 TUC del 15 de octubre

Con base en la emisión de 5.3 PBq se estimó que la dosis equivalente en 24 horas que se podría alcanzar considerando las condiciones de octubre del 2019 podría ser de 0.1 mRem (1 mSv) y para agosto del 2020 de 0.001 mRem (0.01 mSv).

Discusión final

La Figura 1 muestra que las zonas con mayores frecuencias se encuentran al este de la Sierra Madre Oriental, mientras que solamente algunas trayectorias llegarían a sobrepasarla y de éstas, todavía serían menos las que superaran la Sierra Nevada para llegar al Valle de México en ambos años. Las trayectorias podrían viajar al oeste alcanzando Xalapa, al sur llegando al Puerto de Veracruz y la norte a Poza Rica de Hidalgo. Con lo anterior se observa que el alcance de una trayectoria que partiera de la CNLV y viajara durante 12 horas podría cubrir una distancia de aproximadamente 430 km, siendo los meses de octubre del 2019 y agosto del 2020 donde la emisión llegaría a la CMX y a otros estados

como Puebla y Tlaxcala. Con base en los resultados de dispersión se observa que el tiempo de arribo a la CDMX es de 21 horas para el caso de la liberación en octubre 2019 y de 9 horas en agosto del 2020. Las diferencias en los tiempos de viaje y arribo de las masas de aire están impactadas por las condiciones meteorológicas regionales.

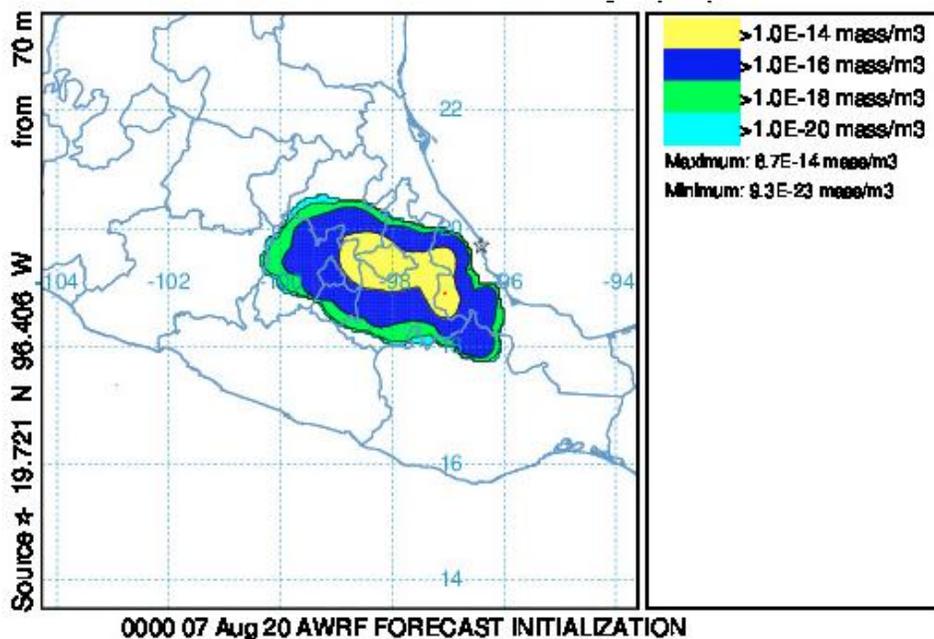


Figura 6. Concentraciones (masa/m³) promedio entre 0 m a 100m, integradas desde el día 8 de agosto del 2020 a las 20:00 hrs TUC (Tiempo Universal Coordinado) al 9 de agosto 2:00 TUC. La emisión inicia a las 8:00 TUC del 8 de agosto 2020

Comparando la dosis externa debida a la liberación de I-131 se obtuvo que la dosis en 24 horas sería de hasta 1 mSv que es similar a los 1.45 mSv de radiación cósmica diaria a 2200 m.s.n.m y menor a los 17 mSv/día de radiación de la radiación media por una persona en los EE. UU.

Conclusiones

Mediante el uso de modelos de meteorología y trayectorias, se identificaron las zonas donde podría transportarse una emisión no intencional de la CNLV para los años 2019 y 2020. Se observó que la mayoría de las trayectorias finalizan al este de la Sierra Madre Oriental, mientras que algunas pueden pasar por las ciudades de Xalapa, Puerto de Veracruz y Poza Rica de Hidalgo. A partir de las trayectorias computadas, se determinó que, durante octubre de 2019 y agosto de 2020, existieron trayectorias que, tras 12 horas, pudieron tener como destino la CDMX.

Considerando una emisión hipotética de 5.3 PBq con duración de una hora, se podría alcanzar una dosis de hasta 1 mSv en la Zona Metropolitana del Valle de México.

La presente investigación conjunta herramientas de cómputo de trayectorias y modelación de dispersiones para realizar estudios de exposición y determinación de dosis a radiación por una liberación continua o no intencional de material en la CNLV. Esta información puede ser útil para el plan de emergencia radiológica externo (PERE) de la CNLV.

Glosario

Siglas y términos	Significado
CNLV	Central Nuclear Laguna Verde
CDMX	Ciudad de México
<i>HYSPLIT</i>	Siglas en inglés para Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única. Es un modelo informático que se utiliza para calcular la trayectoria de las masas de aire y los contaminantes. Este modelo es ampliamente utilizado en meteorología y es un servicio del Laboratorio de Recursos Atmosféricos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (<i>NOAA</i>) de Estados Unidos
m. s. n. m.	Abreviatura para metros sobre el nivel del mar
mSv	Los milisieverts son una unidad de medida de la dosis de radiación absorbida por el cuerpo humano
MW	Los megavatios, una unidad de medida de potencia eléctrica que equivale a un millón de vatios
REM/h	Rem es la abreviatura de Röntgen equivalent man, una unidad de medida de la peligrosidad de la radiación. Unidad de medida de radiación por hora
PBq	Petabecquerelios
PERE	Plan de emergencia radiológica externo
TUC	Siglas para Tiempo Universal Coordinado. Es una escala de tiempo que es mantenida por los laboratorios de tiempo de todo el mundo y es determinada por relojes atómicos de alta precisión
<i>WRF</i>	Weather Research and Forecasting Model

Reconocimientos

A la unidad de cómputo y supercómputo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por su apoyo para la instalación de los códigos empleados en este trabajo, así como al grupo de Interacción Océano Atmósfera por el acceso a los datos de pronóstico meteorológico.

Referencias bibliográficas

- CDC. 2016. Radiación ionizante (Ionizing Radiation). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Retrieved 7/01/2022 de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts149.html
- CFE. 2020, 4/sep/2020. 30 años de operación segura: Laguna Verde. Comisión Federal de Electricidad. Retrieved 08/06/2022 de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2101>
- Chirikova, E., McConnell, R.J., O'Kane, P., Yauseyenko, V., Little, M.P., Minenko, V., Drozdovitch, V., Veyalkin, I., Hatch, M., Chan, J.M., Huang, C.Y., Mabuchi, K., Cahoon, E.K., Rozhko, A., Zablotska, L. B. 2022. Association between exposure to radioactive iodine after the Chernobyl accident and thyroid volume in Belarus 10-15 years later. *Environmental Health*. 21(5):1-10. doi.org/10.1186/s12940-021-00820-0
- CNSC. 2020. Natural background radiation. Canadian Nuclear Safety Commission. Retrieved 08/06/2022 de <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/natural-background-radiation.cfm>
- DOF 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Eckerman, K.F., Wolbarst, A.B., Richardson, A.C.B. 1988. Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion: Derived Guides for Control of Occupational Exposure and Exposure-to-dose Conversion Factors for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance. Oak Ridge National Laboratory. P.p. 234. <https://www.osti.gov/servlets/purl/6294233>
- EPA. 2022. Cálculo de sus dosis de radiación. Environmental Protection Agency. Retrieved 13 dic 2022 de <https://espanol.epa.gov/espanol/calculo-de-sus-dosis-de-radiacion>
- García-Díaz, R. 2020. Análisis de Dispersión de la Pluma Térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde Mediante Teledetección. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del agua. Toluca, México. P.p. 156.

-
- GIOA. 2017. Pronóstico Meteorológico. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Retrieved 9/06/2022 de <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf>
- Hernández-Garcés, A., García- Reynoso, J.A., Morera-Gómez, Y. 2024. Impact of radioactive emissions de the Laguna Verde nuclear power plant using CALPUFF. *Annals of Nuclear Energy*. 205, 110603. doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110603
- Imparcial. 2020. ¿Es posible que la central nuclear de Laguna Verde en México explote como una bomba u ocurra un incidente como el de Chernobyl? *El Imparcial*. <https://www.elimparcial.com/mexico/Es-posible-que-la-central-nuclear-de-Laguna-Verde-en-Mexico-explote-como-una-bomba-u-ocurra-un-incidente-como-el-de-Chernobyl-20201230-0051.html>
- Maryon, R.H., Best, M.J. 1995. Estimating the emissions de a nuclear accident using observations of radioactivity with dispersion model products. *Atmospheric Environment*. 29(15):1853-1869. doi: doi.org/10.1016/1352-2310(95)00042-W
- Nishiyama, H., Kamida, S., Moriizumi, J., Yamazawa, H. 2022. Analysis of volatile nuclides' behavior in the atmosphere released due to the FDNPP accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 249:C7-106894. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106894
- Sánchez-Yáñez, M. 2007. Evaluación y expresión de incertidumbre en los procesos de seguridad, eficiencia y medio ambiente de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana. México. <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/47532>
- SGM. 2017. 24/05/2022. Energía Nuclear. Servicio Geológico Mexicano. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Energia-nuclear.html
- Stein, A., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J., Cohen, M., Ngan, F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 96(12):2059-2077.
- WNA. 2022. Fukushima Daiichi Accident. World Nuclear Association. <https://www.world-nuclear.org/focus/fukushima-daiichi-accident/fukushima-daiichi-accident.aspx>
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Gómez-Ramos, O., Zavala-Romero, O., López-Espinosa, E., Pedraza-Díaz, A., Arellano-Guerrero, F. 2017. Actividad 3. Evaluación del desempeño de los pronósticos, determinación de incertidumbres e implementación del sistema de visualización. Desarrollo de un sistema de pronóstico operacional de eventos extremos basados en modelos numéricos de predicción de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta, incluyendo la evaluación del desempeño de modelo y la determinación de incertidumbres, con fines de alertamiento. Informe interno del Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.