

¿POR QUÉ MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE?

**Apolonio
Juárez
Núñez**

**Érika
Annabel
Martínez
Mirón**

Durante la primavera de 1998 se vivió en México una contingencia atmosférica que afectó a gran parte del país. La carencia de una red de monitoreo del aire, en la mayoría de las ciudades del país, nos impidió conocer cuantitativamente los niveles de contaminación atmosférica alcanzados. Este fenómeno también afectó a la ciudad de Puebla. Dado que en la ciudad de México existe una especial y necesaria atención a los problemas de contaminación atmosférica, pudimos enterarnos que la contingencia atmosférica no sólo se presentó por las altas concentraciones de ozono (O_3), sino también por las altas concentraciones de partículas suspendidas en la atmósfera.

Las fuentes de partículas suspendidas son diversas y abarcan desde las naturales, como polvo volcánico y tolveneras, hasta las de origen antropogénico (provocadas por el humano) como la combustión de motores y las actividades industriales. Esta crisis atmosférica tuvo su origen en la excesiva concentración de partículas a nivel de la superficie, producto de las emisiones industriales, de la combustión de motores, de diversos factores climáticos y de los incendios que se presentaron en amplias zonas del país. Las partículas suspendidas con diámetro menor a 10 micras resultan peligrosas para el ser humano, debido a que se las puede inhalar. En la ciudad de México existe una norma para partículas menores a 10 y mayores a 2.5 micras. Sin embargo, la peligrosidad de estas últimas es mayor debido a su composición y a que por su tamaño penetran hasta los alveolos pulmonares.

Existen otros contaminantes atmosféricos que también afectan la salud del ser humano y que, en zonas urbanas, se encuentran en concentraciones por arriba de lo normal (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos y ozono).

Aquí exponemos una serie de consideraciones para medir la calidad del aire en una zona urbana, en especial en la ciudad de Puebla. Hacemos énfasis en la descripción y el origen de las partículas suspendidas por su peligrosidad, cuando se rebasan los índices permitidos en sus concentraciones, y porque se las relaciona con la reciente crisis atmosférica antes mencionada.

Contaminantes atmosféricos

Los agentes contaminantes del aire se encuentran en forma de gases y partículas y provienen de fuentes naturales y antropogénicas. Entre los denominados primarios, aquellos emitidos directamente al aire por las fuentes de emisión, podemos mencionar a los compuestos de azufre (SO_2 , H_2S), compuestos de nitrógeno (NO , NH_3), compuestos de carbono (hidrocarburos HC, CO), compuestos de halógeno (halocarbonos, fluorocarbonos, etcétera). Estos contaminantes se dispersan y son transportados a diferentes lugares de la zona urbana, sufriendo transformaciones físicas y químicas que dan origen a los contaminantes secundarios. Ejemplos de estos últimos son el ozono troposférico y las partículas de materia como los sulfatos.

Los contaminantes atmosféricos se remueven por precipitación y/o reacción, teniendo impacto negativo en diversos receptores (seres humanos, ecosistemas acuáticos, vegetación y materiales diversos).

Contaminantes atmosféricos de criterio

Los más abundantes y peligrosos para el ser humano reciben el nombre de contaminantes de criterio y sirven como referencia para la medición de la calidad del aire. Para ellos se han establecido normas que pueden variar de un país a otro y de una ciudad a otra.

El gobierno de México ha establecido criterios para la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México. Éstos reciben el nombre de Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA). En esta escala, valores de 100 corresponden a la norma permitida para cada contaminante; valores de 500 corresponden a concentraciones que producen daños en la salud de la población. El daño que puede causar un contaminante no sólo depende de su concentración, sino del tiempo de exposición y de la sensibilidad de cada persona (véase Tabla I).

Tabla I. Niveles de IMECA para los contaminantes

CONTAMINANTES	CONCENTRACIÓN	TIEMPO
CO	9.0 ppm*	8 h
	35 ppm	1h
SO ₂	0.03 ppm	Media anual
	0.14 ppm	24 h
O ₃	0.12 ppm	1 h
No _x	0.05 ppm	Media anual
Hidrocarburos no-metano	0.24 ppm	promedio (6 a 9 h)
Partículas suspendidas	75 mg m ⁻³	Media anual
	260 mg m ⁻³	

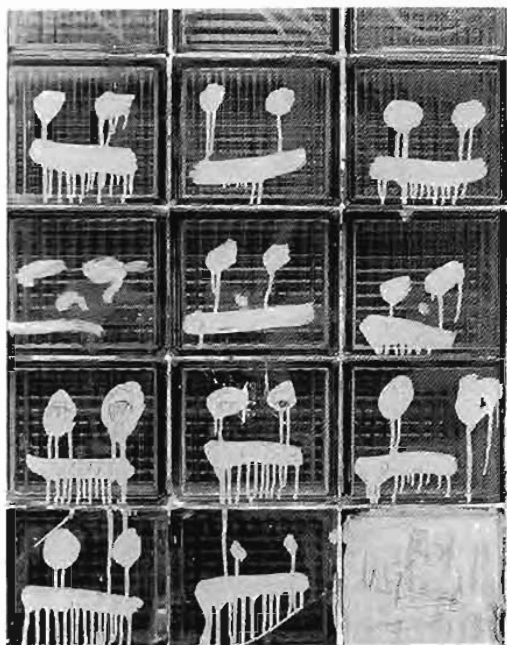
* Partes por millón



Características y origen de los contaminantes atmosféricos

Partículas. El tamaño de una partícula esférica está relacionado con su diámetro. Se clasifican en: 1) inhalables (o partículas de materia inhalable, PM₁₀), cuyo diámetro es menor a 10 micras; 2) ordinarias, con diámetro mayor a 2.5 micras y 3) finas (o partículas respirables, RPM), cuyo diámetro es menor a 2.5 micras.

Las partículas emitidas directamente por fuentes contaminantes se denominan primarias y son partículas entre 0.1 y 2.5 micras, provenientes de procesos naturales como incendios forestales y procesos de combustión industrial; partículas de materiales carbonosos incluyendo carbono elemental y compuestos orgánicos; partículas emitidas por los automotores, principalmente en forma de sulfatos y óxidos de nitrógeno, carbono y azufre; partículas con metales ligeros (sodio, magnesio, aluminio, silicio, potasio y calcio); partículas con metales pesados (titanio, vanadio, cromo, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, plomo, cadmio, arsénico y selenio); partículas grandes (polvo transportado por el viento); partículas emitidas a partir de actividades industriales; partículas de polen, microorganismos e insectos; partículas eléctricamente cargadas, con diámetros menores a 0.1 micras,



formadas por efecto de la radiación solar y cósmica, material radioactivo y procesos de combustión.

Estas partículas provienen, entre otras fuentes, de incendios forestales o de pastizales, de emisiones antropogénicas derivadas de la combustión de diversos materiales, de la suspensión del polvo por la acción del viento o de los vehículos, de erupciones volcánicas, de emanaciones de sal del océano generadas por el rompimiento de las olas.

Las partículas generadas a partir de reacciones químicas en la atmósfera se denominan secundarias y se producen principalmente por la transformación de dióxido de azufre en sulfatos (SO_2 a SO_4^{2-}); por la transformación de NO_2 en nitratos (NO_3^-) y por la transformación de componentes orgánicos en partículas orgánicas. Adicionalmente, las partículas reflejan hacia el espacio exterior una parte de la radiación solar, la otra parte la absorben y reemiten a todas direcciones.

Dióxido de azufre (SO_2). El dióxido de azufre se forma por la oxidación de azufre contenido en los combustibles fósiles y por procesos industriales. Algunas fuentes generadoras son la industria eléctrica, que quema carbón o residuos del petróleo que contienen azufre; refinerías, fundidoras, productoras de carbón industrial, fábricas de ácido sulfúrico e incineradores.

Monóxido de carbono (CO). El monóxido de carbono

es un producto de la combustión incompleta de combustibles carbónicos cuando no hay suficiente oxígeno para que se convierta completamente en dióxido de carbono. Las principales fuentes de este contaminante en zonas urbanas son los motores de combustión interna usados para el transporte. Otras fuentes importantes de contaminación por CO son las industrias fundidoras, las refinerías de petróleo, los molinos para pulpa de papel, las fábricas de acero y la incineración de la basura.

Dióxido de carbono (CO_2). El dióxido de carbono es un producto de la combustión completa de combustibles carbónicos. Su concentración global ha aumentado constantemente debido a la combustión de carbón y de petróleo. A mayor número de moléculas de CO_2 , mayor absorción de calor, provocando el calentamiento global y el cambio climático del planeta. Las fuentes naturales del dióxido de carbono son la descomposición de materia orgánica, la respiración y todos los procesos que incluyen la combustión de materiales orgánicos.

Hidrocarburos volátiles (HC's). Los hidrocarburos incluyen a los compuestos orgánicos, disolventes clorados y no clorados, gas natural y gasolinas entre otros. Estos compuestos son emitidos principalmente por los procesos industriales (químicos y petroquímicos) y por actividades en las que se emplean disolventes orgánicos (pintura y emisión residual en la combustión de gasolinas).

Óxidos de nitrógeno (NO_x). El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) son gases tóxicos que se producen durante los incendios o por la combustión de las gasolinas oxigenadas a altas temperaturas. El dióxido de nitrógeno es producido por las bacterias a partir de los fertilizantes nitrogenados artificiales con los que se abonan los cultivos.

Ozono troposférico (O_3). El ozono troposférico se puede producir por descargas eléctricas, por oxidación de CO y CH_4 y por difusión desde la estratosfera. Su fuente principal es la mezcla de gases (óxidos de nitrógeno e hidrocarburos) que reaccionan en presencia de luz. La formación del ozono troposférico es acompañada, además, por contaminantes fotoquímicos que incluyen aldehídos, ácido nítrico y peróxido de hidrógeno, entre otros.

Clorofluorocarbonos. Los clorofluorocarbonos son los principales responsables de la destrucción de la capa de ozono y no existen de manera natural en la atmósfera, sino que son emitidos por aerosoles, espumas plásticas, refrigerantes, etcétera.

Los clorofluorocarbonos se descomponen por acción de la radiación ultravioleta solar a una altura superior a 40 km. El cloro liberado



reacciona con el ozono originando monóxido de cloro (ClO) que puede reaccionar tanto con átomos de oxígeno, como con monóxido de nitrógeno. Después de la reacción, el átomo de cloro queda nuevamente libre e inicia otro ciclo de destrucción de ozono. Cálculos recientes muestran que un átomo de cloro en la estratosfera puede destruir hasta cien mil moléculas de ozono antes de desaparecer por condensación en forma de lluvia ácida.

Además de estos compuestos, existen otros llamados halocarbonados (yodocarbonos y bromocarbonos) que, al igual que los clorofluorocarbonos, sufren una disociación por acción de la radiación ultravioleta, liberando átomos de yodo y bromo que destruyen (en menor proporción que el cloro) la capa de ozono.

Metano. Aunque no está considerado como un contaminante, el metano que se produce por los procesos de descomposición anaerobia (sin participación del aire) en los cultivos de arroz, así como por la digestión intestinal del ganado, contribuye al incremento del efecto invernadero. De hecho, el metano es mucho más eficiente que el dióxido de carbono para incrementar el efecto invernadero, aunque este último gas se emite en mayores cantidades que el metano.

Efectos sobre la salud

El impacto de los contaminantes sobre la salud depende de las condiciones climáticas, geográficas y de la sensibilidad de cada organismo. En la Ciudad de México, los altos índices de contaminación atmosférica incrementan la incidencia de las enfermedades respiratorias.

El monóxido de carbono es un contaminante atmosférico peligroso y abundante en las grandes ciudades industriales; afecta en diversos grados la función neuronal; sus efectos sobre el sistema nervioso central son asfixia, dolor de cabeza, mareos, zumbido en los oídos y somnolencia. El ozono aumenta la incidencia de asma y produce trastornos

respiratorios, ocasiona depresión, náuseas, cianosis, dolor de cabeza, lesiones cutáneas e irritación en los ojos. Las partículas suspendidas, principalmente las de plomo, causan anemia, lesión en los riñones y en el sistema nervioso central (véase Tabla II).

Criterios para medir la calidad del aire

Para medir la calidad del aire, sobre todo en áreas muy pobladas, es necesario realizar un inventario considerando el número, los tipos (puntuales, lineales, superficiales) y las características (tasas de emisión, localización y los parámetros mecánicos, termodinámicos y geométricos) de las fuentes contaminantes y los contaminantes involucrados; contar con los datos de emisiones y la contaminación de fondo; poseer información sobre las escalas temporales (instantáneas, corto plazo, largo plazo) y espaciales (local, regional, nacional, global) del problema; tener información sobre el tipo de zona (rural, urbana, semiurbana, costera) y las características del terreno (plano, complejo, semi-complejo, obstáculos importantes, existencia de lagos o ríos, etcétera); conocer el tipo, la cantidad, la calidad y la disponibilidad de la información meteorológica y

Tabla II. Efectos sobre la salud debido a los principales contaminantes atmosféricos

CONTAMINANTES	EFFECTOS SOBRE LA SALUD
Anhidrido sulfuroso	Irritación y espasmos bronquiales
Partículas	Irritación de los bronquios, factor cancerígeno
Ácido clorhídrico	Irritación de ojos y bronquios
Óxidos de nitrógeno	Irritación de los bronquios
Ozono	Irritación de los bronquios, asma
Aldehídos	Irritación de los bronquios, efecto cancerígeno
Monóxido de carbono	Trastornos respiratorios y sensoriales
Plomo	Saturnismo
Hidrocarburos	Efecto cancerígeno, irritación de los bronquios



micrometeorológica de la zona; contar con recursos de cómputo para la realización de las corridas del modelo o modelos necesarios.

Con base en el tipo de impacto que toman en cuenta, los modelos de calidad del aire pueden clasificarse en:

- Impacto local de emisiones de rutina de contaminantes no reactivos (o que se suponen químicamente no reactivos).
- Impacto local de emisiones de rutina de contaminantes químicamente reactivos.
- Impacto local sobre la visibilidad atmosférica debido a emisiones rutinarias.
- Impacto local de grandes descargas accidentales de contaminantes.
- Impacto regional de emisiones de rutina (por ejemplo, ozono, lluvia ácida, etcétera).

Los modelos de impacto regional no consideran, en general, el impacto de una sola fuente emisora de contaminantes. A tales modelos conciernen los efectos sobre la calidad del aire debidos a varias categorías de fuentes de emisión ubicadas todas dentro de un área regional o urbana.

Técnicas para medir contaminantes atmosféricos

Estas técnicas, en general complejas, y que se basan en fenómenos físico-químicos que se presentan en la atmósfera, han contribuido al entendimiento de los procesos que ocurren en la atmósfera. Una de las más usuales se fundamenta en el hecho de que los átomos y las moléculas absorben y emiten energía electromagnética de manera discreta y en regiones bien definidas del espectro. Así, para la mayor parte de los contaminantes involucrados en el efecto invernadero se usa la propiedad que tienen tales contaminantes de absorber y emitir energía en la región infrarroja del espectro electromagnético.

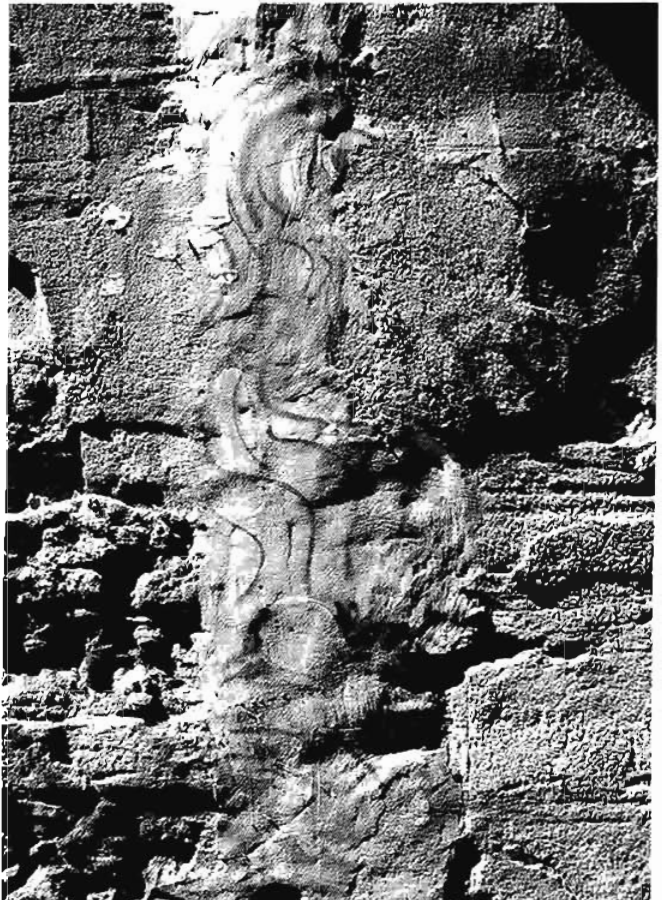
Los cinco contaminantes de criterio que se utilizan como estándares en el estudio de la calidad del aire son CO , NO_2 , O_3 , SO_2 y los hidrocarburos no-metano (NMHC). En la tabla III se mencionan algunas de las técnicas usadas para medirlos.

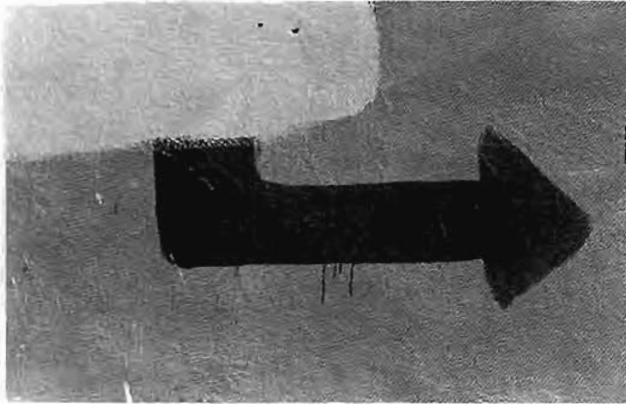
Plan de acción para mejorar la calidad del aire

Una vez instalada una red de monitoreo atmosférico y que exista acuerdo en la norma que regirá para la ciudad de Puebla, será necesario desarrollar medidas preventivas para mejorar la calidad del aire. A partir de la experiencia existente en otras ciudades del país con relación a la prevención de contaminantes atmosféricos, es necesario atender los siguientes aspectos:

Parque vehicular. (casi las tres cuartas partes de la contaminación atmosférica proviene de los automotores y del transporte con placas federales, que no está sujeto a verificación vehicular):

- Promover la renovación de la flota de transporte público y de taxis mediante incentivos de carácter fiscal.
- Instalar sistemas para controlar y agilizar el tráfico de vehículos incorporando adelantos tecnológicos que hagan fluido y eficiente el transporte por automotores.
- Promover la planeación y reorganización de las rutas de autobuses para reducir el uso de vehículos privados.





- Reforzar el programa de verificación vehicular, incluyendo su renovación técnica y administrativa.
- Implantar un programa permanente para la detección de vehículos altamente contaminantes.
- Diseñar e instrumentar campañas de monitoreo de emisiones vehiculares con técnicas de medición remota.

Industria y servicios

- Desarrollar una campaña de capacitación y de certificación de personal para el manejo adecuado de equipos de combustión.
- Promover el otorgamiento de incentivos fiscales y sistemas de financiamiento en la adquisición de equipo de control de partículas y de conversión de combustibles de gasolina a gas natural.

Tabla III

TÉCNICA	LÍMITE DE DETECCIÓN	
CO	Espectrometría infrarroja no dispersiva	1 ppm
	Cromatografía de gases	0.02 ppm
	Sensores electroquímicos	1 ppm
	Análisis colorimétrico	≈ 1 ppm
NMHC	Cromatografía con detección de ionización de flama	0.1ppmC
	Fotolonización	> 0.1
NO₂	Quimiluminiscencia (O ₃)	10 ppt
O₃	Quimiluminiscencia	2 ppb
	Absorción UV	1 ppb
	Método de Potasio Yodo (KI)	3 ppb
SO₂	Fluorescencia	5 ppb
	Cromatografía de gases	2-10 ppb
	Conductométrica	5-40 ppb
	Colorimetría	2-10 ppb



- Establecer convenios con la industria para controlar y reducir las emisiones de partículas, de precursores de ozono y de dióxido de azufre.
- Reforzar las labores de inspección y vigilancia.
- Desarrollar esquemas de participación voluntaria de autorregulación.

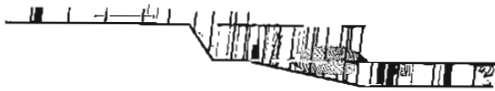
Disminución de la emisión de partículas

- Forestar las áreas urbanas y las zonas periféricas a la ciudad de Puebla.
- Desarrollar una campaña intensiva de pavimentación de las calles.

Reordenamiento urbano

- Instalar la red automática de monitoreo de la calidad del aire y realizar un estudio de evaluación, expansión y reforzamiento de la misma.
- Involucrar a las Instituciones de educación superior en actividades de capacitación, investigación e intercambio de información.
- Actualizar el inventario de emisiones de fuentes fijas.
- Desarrollar una campaña de educación sobre la contaminación del aire.





- Gestionar apoyos para la obtención de recursos económicos y asistencia técnica para la instrumentación del programa.
- Estudiar las posibilidades de desarrollar un sistema de transporte colectivo eléctrico.
- Diseñar e instrumentar el programa de respuesta a contingencias ambientales.
- Impulsar la realización de estudios de monitoreo ambiental y exposición a contaminantes.
- Diseñar y desarrollar un programa de aseguramiento de la calidad de combustibles, tanto para la industria como para los vehículos.
- Diseñar e instrumentar un programa de reconocimiento público para la promoción y ejecución de acciones de mejoramiento de la calidad del aire.

Discusión y conclusiones

Las principales ciudades del país requieren de manera urgente la instalación de un sistema de monitoreo atmosférico, permanente y automático porque su parque vehicular, sus miles de industrias y establecimientos comerciales y de servicios, contribuyen permanente-

mente a la contaminación atmosférica. Además, el continuo crecimiento urbano exige una creciente demanda de transporte, energía y actividad industrial, lo que a su vez incrementa dicha contaminación.

En un trabajo anterior (*Medición de la calidad del aire en la ciudad de Puebla*, A. Juárez *et. al.*), se mencionaron las características geográficas y climáticas de la ciudad de Puebla y su influencia en los problemas de contaminación atmosférica, así como las mediciones parciales de la calidad del aire en tiempo y espacio. De tales mediciones se puede concluir que en las horas pico de flujo vehicular (aproximadamente 400,000 vehículos), en algunas regiones con intenso tráfico, se rebasa la norma oficial mexicana establecida para el ozono y para las partículas suspendidas.

A pesar de la indiferencia de ciertos sectores de la población, existen datos parciales que indican que el problema es serio y tiende a agravarse. De ahí la necesidad de saber con certeza cuál es la calidad del aire en la ciudad de Puebla.

Para enfrentar de manera efectiva el problema de la contaminación atmosférica es necesario conocer cuantitativamente las concentraciones de los contaminantes de criterio y desarrollar e implementar un programa integral que se encamine a la reducción progresiva de las emisiones contaminantes provenientes de los vehículos, de la industria, así como atacar las causas de la erosión y los incendios forestales.

La calidad de vida en un país y/o en una ciudad, depende también de la calidad del aire que se respira y Puebla requiere con urgencia que se conozca y mida sistemáticamente la calidad del aire que respiramos los que aquí vivimos.

Bibliografía

- Juárez, A., Miranda, A., *Medición de la calidad del aire en la ciudad de Puebla*, Ediciones UAP, 1997.
- Zannetti, P., *Air Pollution Modeling. Theories computational methods and available software*, Edit. Computational Mechanics Publications, 1986.
- Finlayson-Pitts, B., Pitts, Jr. J. N., *Atmospheric Chemistry: Fundamental and experimental techniques*, Edit. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- Legorreta, J., "La grave contaminación atmosférica de la ciudad de México", *Ciencias*, 22, 1996.
- Ingersoll, A., *La atmósfera, libros de investigación y ciencia*, Edit. Prensa Científica, 1987.
- De la Garza Castro, J., "Gestión de calidad del aire en el área metropolitana de Monterrey", *Calidad ambiental*, vol.3 número 6, 1997.

Apolonio Juárez Núñez y Érika Annabel Martínez Mirón son profesores de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la UAP.

