

ANÁLISIS ESPACIAL DEL BOSQUE URBANO DEL CAUDAL DEL RÍO ATOYAC. “SU MUERTE” DAÑO IRREVERSIBLE AL CICLO HIDROLÓGICO DE LA CD. DE PUEBLA.

SPATIAL ANALYSIS OF THE URBAN FOREST IN THE FLOW OF THE ATOYAC RIVER. "ITS DEATH" IRREVERSIBLE DAMAGE TO THE HYDROLOGICAL CYCLE OF THE CITY OF PUEBLA.

Cuitlahuac Alfonso Roviroso Madrazo D. en C.¹

Consejero y Secretario Técnico del Consejo de Cambio Climático-SEDEMA del Estado de Puebla. SNE-RECEA/CONAHCYT 34138, SIHCTIEP-CONCYTEP. Puebla, México; Evaluador internacional del Consejo de Ministros del Perú y CONCYTEC¹.

Estudio de Caso.

Línea de investigación: PM 2.5 (COVs) Río Atoyac vs. (PVs) Volcán Popocatepetl.

Apoyo del CONCYTEP-SEP

Tel. (52) 2311032976

Correo: cuitlahuacrovirosa@exalumno.unam.mx

Palabras Clave: Palabra 1; Atoyac Bosque-Ciclo Hidrológico/Popocatepetl, Palabra 2: Análisis espacial Atoyac Bosque-Hidrológico/Popocatepetl, Palabra 3: Índices de Vegetación Teledetección Atoyac-Popocatepetl Palabra 4: Cambio Climático Atoyac-Popocatepetl, Palabra 5: Efecto antropogénico-Fenómeno Atoyac- Popocatepetl.

Resumen

La complejidad ambiental para los habitantes y ecosistemas de la Cd. De Puebla (zona urbana y periurbana) por la presencia de Partículas Volcánicas Sedimentarias (PVs), Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) PM 2.5 y Gases Efecto Invernadero (GEI), se evidenció en los resultados del 1er Informe Estratégico. Cuenca Del Alto Atoyac I (Álvarez-Bulla, *et al* CONAHCYT, 2023). El CONCYTEP, factor determinante en avances de las investigaciones de la compleja problemática conjugada **Atoyac-Popocatepetl**. Dieron más claridad para la estrategia de mitigación ante este complejo problema de cambio climático. Por otro lado, a partir de las prospecciones realizadas *in situ* y el análisis espacial con el INAOE-CONAHCYT en 2019 y CONCYTEP en 2023, se demostró que la eficiencia de utilizar el bosque urbano como indicador de presencia de COVs y PVs para valorar concentraciones de PM 2.5 y factores de riesgo para **Cáncer, Enfermedad Renal Crónica**

(ERC) en adultos mayores y Leucemia infantil, en los habitantes de esa zona urbana por altas exposiciones a las concentraciones de éstos.

Al ser los árboles los primeros receptores con vida de estas partículas y reaccionar fisiológicamente en los procesos metabólicos de la fotosíntesis, nos permitieron detectar alteraciones ecosistémicas de alto impacto en la salud de los bosques y humana. **Objetivos:** Determinar con índices de teledetección en polígonos relacionados con el 1er Informe Estratégico de la Cuenca Del Alto Atoyac 2023, efectos de perturbación por **COVs y PVs** en especies forestales y vegetación de los caudales del río Atoyac por partículas conjugadas del Popocatepetl; Efectos del cambio climático (SEDEMA, Estrategia Estatal de Cambio Climático, 2021-2024, 2022) y actividad atmosférica de micropartículas sedimentables, mediante Índices *NDRE*, *MSAVI*, *RCEI*, *NDMI* y factores climatológicos asociados. **Metodología:** Teledetección con resolución espacial de 10 Mt.13 señales espectrales disponibles, captación de polígonos precisos, los cambios en vegetación/tiempo, superando los efectos atmosféricos, uso de datos satelitales multispectrales. **Resultados:** Valores de los índices *NDRE*, *MSAVI*, *RCEI*, *NDMI*, climatología y ubicación geográfica de perturbaciones.

1. Introducción

A partir de la contingencia atmosférica de mayo 13, 14 y 15 del año 2019, en la zona urbana de Puebla qué, fue muy grave, fundado en los análisis por estaciones de prospección fijas, semifijas y móviles, que operaron conjuntamente el Gobierno del Estado de Puebla y la Federación. En el presente estudio se mostraron pronósticos y monitoreos de concentraciones letales de exposición forestal y humana a la contaminación por gases efecto invernadero (GEI) en la zona- metropolitana de Puebla. Al determinar la concentración de contaminantes citotóxicas (Bravo *et al*, 2015), (Morales *et al*, 2015), (Sandoval Villasana *et*

al, 2009), (Saldaña y Gómez, 2006); Ozono (O₃), PVs y COVs (Figuras 1, 2 y 3), derivados del efecto antropogénico conjugado con fenómenos naturales (hidrometeorológicos, hidropedológicos, climáticos, geológicos) (Gas Guide Line, 2019) e incendios forestales (Salamanca Alfonso, 2019); Impactaron en la salud de las poblaciones y medio ambiente urbano de Puebla (medios físicos y bióticos). Cuando se presentan concentraciones de gases como el ozono (O₃) con partículas PM 10 y PM 2.5 (Blanco Jiménez, 2015) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) conjuntamente y epidemiológicamente (Epidemiología ambiental), ponen en riesgo la salud de animales, forestal y humana (Wasim, 2014), -en este contexto-, es necesario hacer énfasis en las responsabilidades de las dependencias, empresas, entidades y autoridades en la materia ambiental. La transversalidad, coherencia y concordancia con actuaciones oportunas entre la Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Morelos, Tlaxcala y Puebla ante fenómenos que impactan igual en todas las entidades en zonas fronterizas de forma ambiental, ecológica y atmosféricamente a los municipios de Puebla; Amozoc, Cuautlancingo, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula, San Martín Texmelucan, Huejotzingo, Coronango, San Miguel Xoxtla (INEGI, 2019).



Figura 1. Emisiones y columnas de humo con PM 2.5 y SO₂ del volcán Popocatepetl en Angelópolis, Puebla en el 2019 y 2023

1.1 Análisis RAMAN de partículas incrustadas en vegetación urbana de Angelópolis, Puebla

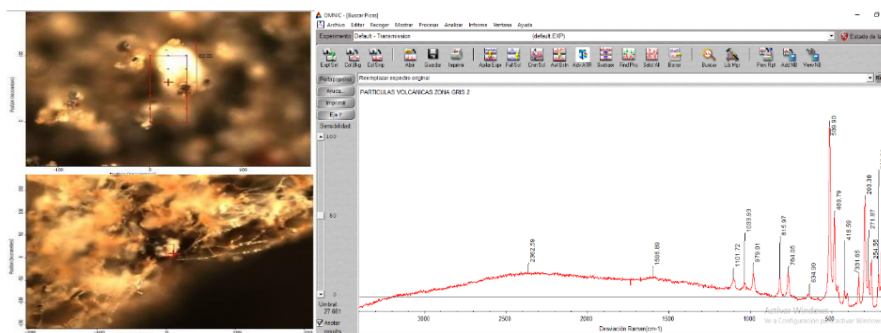


Figura 2. Micrografía RAMAN de Tejido forestal y espectro con la interfaz de la librería sistema OMNIcxi. Señales de los blancos en tejidos con incrustación de partículas de GEI, COVs y PVs, con detección de azufre volcánico (S), (SO₂), -en ramas y hojas-, muestreadas in situ. Imagen en microscopía Raman en x10.

Detección particulada al 50% de sensibilidad

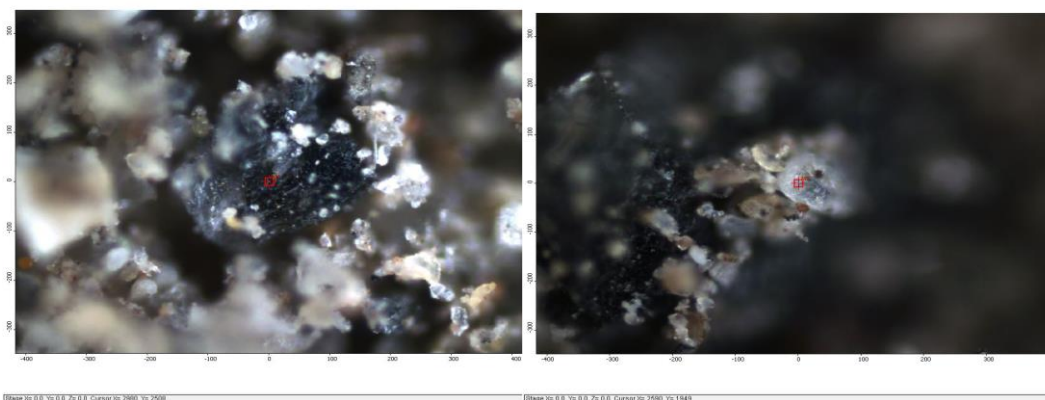


Figura 2 Bis. Micrografías RAMAN de estructuras de tejido forestal con la incrustación de PM 2.5 y detección de partículas como cristales de azufre volcánico de (S), (SO₂) en ramas y hojas

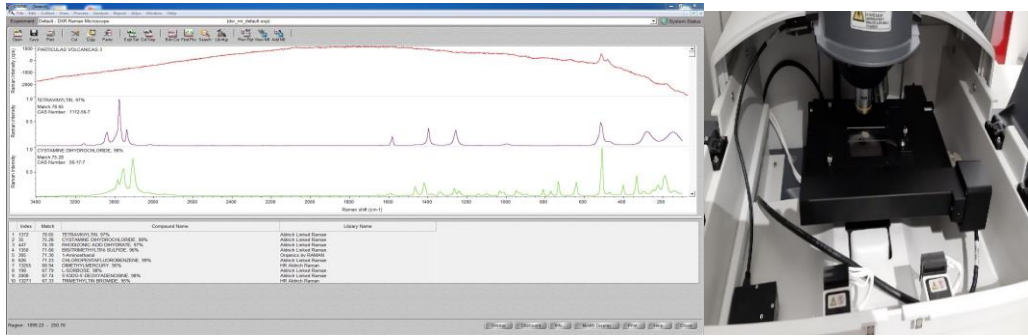


Figura 2 Bis¹ (Izq.) Espectro RAMAN de estructuras de tejido forestal con incrustación y detección de 10 moléculas de COVs y PM 2.5. con la interfaz de la librería sistema OMNIXi. Señales de los blancos en tejidos de la figura 2 Bis. (Der) Cámara del microscopio RAMAN con los polvos recolectados in situ que contienen partículas citotóxicas

1.2 Cuantificación de partículas PM 2.5 por sistema AccuSizer A7000, 2019.

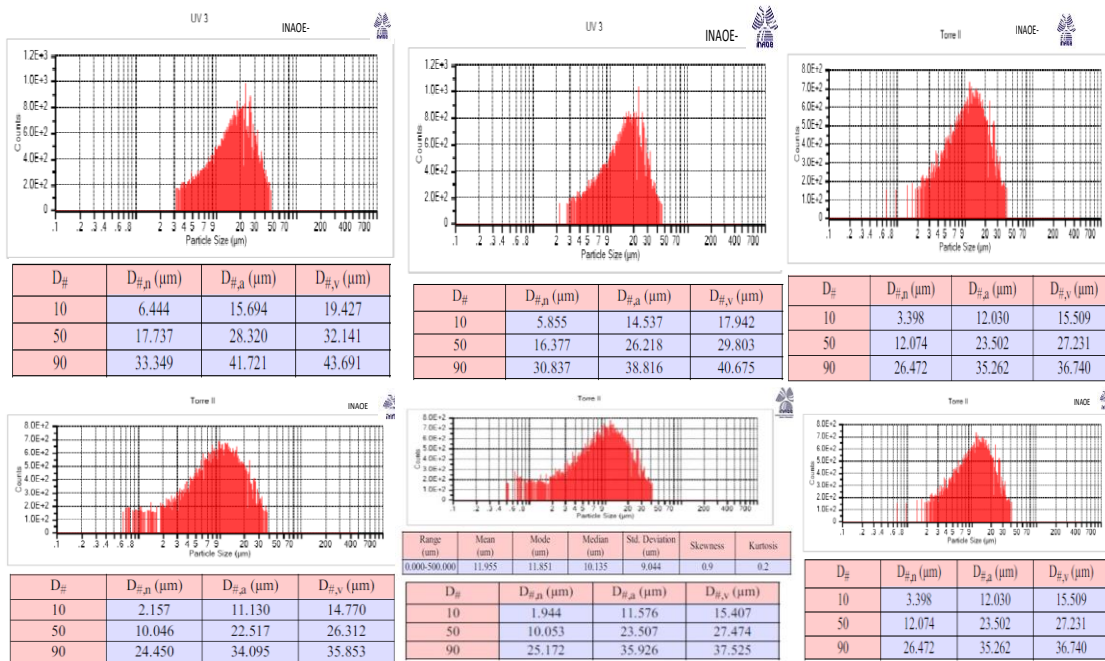


Figura 3. Cuantificación de cantidad, diámetro y tamaño de partículas citotóxicas PM 2.5 y $<0.5 \mu m$ generadas por GEI, COVs y PVs presentes en la zona de estudio (figura 1) las azoteas de las torres UV-3 y II en Angelópolis, Cd. De Puebla (INAOE-CONAHCYT, 2019)

1.3 Resultados concluyentes del conteo de partículas sedimentarias *in situ* por sistema AccuSizer A7000, 2019.



Figura 3 Bis. Gráfico de la cantidad de partículas sedimentarias detectadas por sensores del AccuSizer A7000 equivalentes a un muestreo 1,490,667/Q=15ml, de las cuales 184,807 menores 0.5 μm equivalentes al 12.39 % y 100,008 a $\geq 2.5 \mu\text{m}$ = al 6.70%.

1.4 Resultados estadísticos de la prospección electrónica y digital de micropartículas *in situ* PM 2.5.

Del 100% de partículas muestreadas y contadas entre las tres Torres (I, II y UV3), resultaron un total entre PVS y COVs: 1,987,334/Q15ml.15min, de las cuales fueron: PM $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 497,725, que, representan un 16.66%/15ml y 192,556 $\geq 2.5 \mu\text{m}$ representan 6.44%/15ml. Arrojando un total del 23.10% de partículas PM 2.5 (PVs y COVs) peligrosas para la salud forestal, hidrológica del Atoyac y humana, dentro del ecosistema de la Cd. De Puebla y sus zonas conurbadas.

En seguimiento a estos complejos fenómenos climáticos conjugados desde el año 2019 y su vínculo con el **Atoyac-Popocatepetl**, se estableció una estrategia conjunta con el **CONCYTEP en 2021**, para realizar análisis del caso, probables daños ambientales al ecosistema forestal urbano con las herramientas tecnológicas más avanzadas, (*Macrocosmo: Sensores Remotos-Teledetección. Microcosmos: Espectrografía RAMAN y MEB, MET con Rayos X y sensorización del AccuSizer A7000* (Contabilización y dimensionamiento óptico

de partículas individuales) para evaluar la dinámica de las partículas PM 2.5 y menores, en sedimentos pedológicos y caudales del río Atoyac, incrustados sobre la masa forestal y los sedimentos hidropedológicos, analizar la problemática y ofrecer alternativas de mitigación ante la complejidad de la problemática de cambio climático; Para poder contener daños a la salud de los habitantes y ecosistemas de la zona urbana y periurbana de la Cd. De Puebla.

Las emisiones volcánicas para contribuir a la carga de sulfato troposférico son mayores que la eficiencia de las emisiones antropogénicas, sobre todo porque la vida útil del SO₂ aumenta con la altitud y, por tanto, tiene un impacto durante periodos de tiempo más largos y en zonas más extensas (Lamotte, C., 2021) por lo tanto, mediante la transferencia del conocimiento científico a las autoridades y la sociedad se tomarán las mejores estrategias para la mitigación de este fenómeno conjugado.

La correlación entre micropartículas de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) y Partículas Volcánicas Sedimentarias (PVs) + Gases Efecto Invernadero (GEI) convertidas en PM 2.5 y menores, presentes en los ecosistemas urbanos del río Atoyac, para su determinación, nos llevaron a prospecciones por teledetección a partir del macrocosmos: Energía, climatología y estructuras químicas en la atmosfera sedimentables sobre tejidos forestales, reacciones hidrológicas y pedológicas,- para comprender los probables efectos en la salud humana y en los ecosistemas. Tomando como bases científicas los análisis epidemiológicos y geográficos preliminares del CONAHCYT en sus estudios del *1er Informe estratégico Cuenca Del Alto Atoyac Integral versión octubre de 2023*. El análisis espacial con la determinación de los índices de la vegetación nos permitió comprender el estado de salud del ecosistema y afectaciones consecuentes del fenómeno de cambio climático asociados a las conclusiones del CONAHCYT en su informe.

1.1.1 Objetivo: Determinar con índices de teledetección en polígonos relacionados con el 1er informe del CONAHCYT, efectos de perturbación atmosférica por COVs y PVs sobre especies forestales y vegetación en los caudales del río Atoyac por partículas de COVs vs. Micropartículas del Popocatepetl, efectos del cambio climático y actividad atmosférica sedimentables, mediante **Índices NDVI, NDRE, MSAVI, RCEI, NDMI**, y factores climatológicos asociados.

1.1.2 Comportamiento fisiológico de las hojas ante estrés oxidativo de partículas sedimentables PM 2.5 (PVs, COVs y GEI).

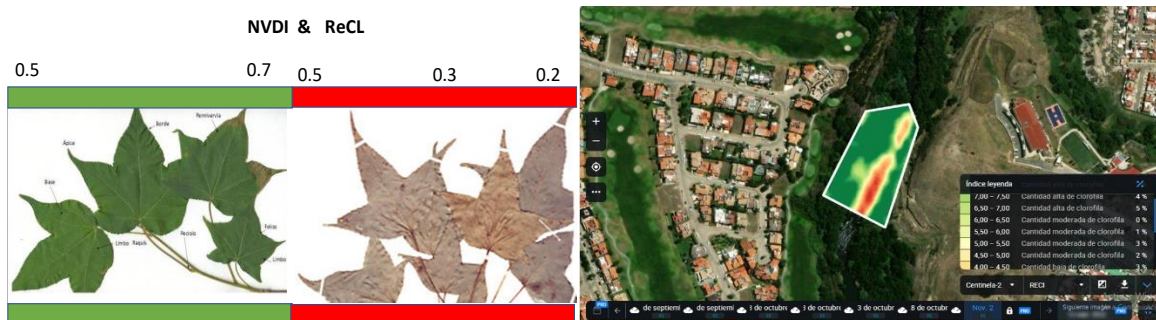


Figura 4. (Izq.) Visualización del estado fisiológico, sanidad y salud de las hojas de la vegetación expuesta a teledetección. Evaluadas con el satélite mediante análisis multispectral. (Der.) Aplicación de la visualización en imagen de satélite de la vegetación con los índices de clorofila (ReCL) en un polígono específico. Imagen (Rovirosa)

¿Que observan los instrumentos de los sensores remotos del satélite Sentinel 2 en el análisis espacial por teledetección?:

- Mediante la diferencia entre la reflectancia de las bandas 4 (infrarrojo cercano) y 3 (visible – rojo) dividido por la suma de estas dos bandas de reflectancia se obtienen:
 - I. Valores cercanos a 1: cuanto más intenso es el verde, más vigorosidad existe en la vegetación y la cubierta vegetal.

- II. Valores cercanos a 0: corresponden a zonas con muy poca vegetación, primeras fases del cultivo, suelos desnudos o zonas no productivas.
- III. Valores negativos: suele estar asociado a zonas de agua, nieve o nubes.

2. Metodología

En este estudio por medio del análisis espacial con teledetección, sensores remotos con los satélites de la NASA (análisis del fenómeno del volcán Popocatepetl) y de la ESA-Sentinel 2 y SIG se determinaron los índices de vegetación en el ecosistema y bosque del caudal del río Atoyac.

2.2 Fuentes de información

Se utilizaron los datos oficiales de la ESA y NASA (2022 y 2023), para valorar ecosistemas asociados al caudal del río Atoyac, en correlación con estudios pedológicos y de tejido forestal tomados en la ciudad de Puebla, durante fenómenos de cambio climático conjugados con erupciones del volcán Popocatepetl del año 2019 al 2023.

Los datos geográficos reportados por el CONAHCYT en su *1er Informe estratégico Cuenca Del Alto Atoyac Integral versión octubre de 2023* hasta el día 31 octubre 2023, con las defunciones reportadas oficialmente por **Cáncer, Enfermedad Renal Crónica en adultos mayores y Leucemia infantil** en habitantes en los caudales del río Atoyac; -Entonces-, se consideró estratégico y urgente la necesidad de valorar el ecosistema impactado por presencia de PM 2.5 y < 0.05 de COVs y PVs. Por lo qué, se determinó valorar el estado de salud, sanidad

del bosque y vegetación urbana del caudal del río Atoyac, como indicadores de riesgo a la salud de las zonas urbanas y periurbanas por presencia de COVs y PVs.

2.3 Los modelos utilizados al determinar los índices de vegetación por teledetección por *Crop Monitoring EOS, Land Viewer, y Geoinnova* para el análisis espacial de los polígonos estudiados con sensores remotos, teledetección y SIG se aplicaron las siguientes fórmulas:

Índice NDMI se calcula utilizando la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}).$$

-1 – -0.8 Suelo desnudo, -0.8 – -0.6 Cobertura del dosel casi inexistente, -0.6 – -0.4 Cobertura del dosel muy baja, -0.4 – -0.2 Cobertura del dosel baja y seca o muy baja y húmeda, -0.2 – 0 Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto o cobertura del dosel baja y estrés hídrico bajo

Índice NDRE (Diferencia normalizada de borde rojo) es un indicador de la actividad fotosintética de la cubierta vegetal utilizado para estimar las concentraciones de nitrógeno en las hojas de las plantas en la mitad y al final de una temporada. Permite detectar la vegetación oculta y envejecida y se utiliza para identificar enfermedades en las plantas. También permite optimizar el momento de la cosecha. El NDRE es útil en las fases finales del ciclo de cultivo. Un dosel muy denso puede provocar saturación en el índice NDVI, por eso se recomienda utilizar el índice NDRE. el espectro del Infrarrojo Cercano (NIR) y una banda que utiliza un estrecho rango espectral entre el Rojo visible y el NIR. El índice es muy similar al más comúnmente usado y poderoso análogo, el NDVI. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})$$

Índice MSAVI de vegetación que permite determinar la presencia de vegetación en las primeras etapas de desarrollo, cuando hay mucho suelo desnudo. El índice minimiza el efecto del suelo desnudo en la visualización de los mapas de vegetación. Basándose en el índice, se pueden construir mapas para la aplicación diferencial de fertilizantes en las primeras etapas del crecimiento de los cultivos. Evaluación de Daños en Cultivos, El método Índice de vegetación ajustada de suelo modificado (MSAVI2) minimiza el efecto del terreno desnudo en él, se utiliza en las áreas donde los índices como NDVI proporcionan datos no válidos, principalmente debido a una pequeña cantidad de vegetación o debido a la falta de clorofila en él, se utiliza en las áreas donde los índices como NDVI proporcionan datos no válidos, principalmente debido a una pequeña cantidad de vegetación o debido a la falta de clorofila en el que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{SAVI. MSAVI2} = (1 / 2) * (2 * (\text{NIR} + 1) - \text{sqrt} ((2 * \text{NIR} + 1)^2 - 8 (\text{NIR} - \text{Red})))$$

$$\text{MSAVI2} = (1 / 2) * (2 * (\text{NIR} + 1) - \text{sqrt} ((2 * \text{NIR} + 1)^2 - 8 (\text{NIR} - \text{Red}))),$$

Índice ReCI (Índice de clorofila de borde rojo) es un índice de la actividad fotosintética de la cubierta vegetal sensible al contenido de clorofila en las hojas. Dado que el nivel de clorofila está directamente relacionado con el nivel de nitrógeno en el cultivo, el índice permite identificar las áreas del campo que tienen hojas amarillas o descoloridas, que pueden requerir una aplicación adicional de fertilizantes. infrarrojo cercano muy específicas (681,25, 708,75 y 753,75 nm) $\text{MTCI} = (754\text{nm} - 709\text{nm}) / (709\text{nm} - 681\text{nm})$. Para el juego de bandas de Sentinel 2 es posible recurrir a una combinación específica de bandas dentro del red edge. Se puede obtener un índice específico de clorofila jugando con la relación de bandas 7 y 5. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Clorofila Red-Edge} = (\text{BANDA 7} / \text{BANDA 5}) - 1$$

Índice de Clorofila Verde (IGC) se usa para estimar el contenido de clorofila de las hojas en varias especies de plantas. El contenido de clorofila refleja el estado fisiológico de la vegetación; disminuye en plantas estresadas y, por lo tanto, puede usarse como un evaluador de la vigorosidad de las plantas. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$GCI = (NIR/Green)-1$$

Índice NDMI se calcula utilizando la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR).$$

- -1 – -0.8 Suelo desnudo, -0.8 – -0.6 Cobertura del dosel casi inexistente, -0.6 – -0.4 Cobertura del dosel muy baja, -0.4 – -0.2 Cobertura del dosel baja y seca o muy baja y húmeda, -0.2 – 0 Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto o cobertura del dosel baja y estrés hídrico bajo.

Cuadro 1. Lista de combinaciones de bandas del sensor especie Sentinel 2 de la agencia espacial ESA-UE

Nro.	Nombre de banda	Longitud de onda (nm)	Ancho de onda (nm)	Resolución (m)
1	Coastal aerosol	443.9	27	60
2	Blue	496.6	98	10
3	Green	560	45	10
4	Red	664.5	38	10
5	Vegetation Red Edge	703.9	19	20
6	Vegetation Red Edge	740.2	18	20
7	Vegetation Red Edge	782.5	28	20
8	NIR	835.1	145	10
8a	Narrow NIR	864.8	33	20
9	Water vapour	945	26	60
10	SWIR – Cirrus	1373.5	75	60
11	SWIR	1613.7	143	20
12	SWIR	2202.4	242	20

Fuente: ESA (2023)

2.2.1 Consideraciones sobre combinaciones de bandas

- La aplicación de los índices de teledetección con sensores remotos, permiten observar la huella ecológica y la inestabilidad ambiental funcional de la vegetación del ecosistema del caudal del río Atoyac, los riesgos para las zonas de las poblaciones dentro de ellos; Sean periurbanas o urbanas en la ciudad de Puebla.
- Los limitantes más frecuentes encontradas son la disponibilidad de las imágenes en las fechas requeridas y la presencia de nubes sobre los objetivos del estudio.

2.2.2 Determinación de las unidades de calor. La fórmula para calcular las UC es la siguiente

$$UC = ((T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}) / 2) - T_{\text{base}}$$

Donde:

$T_{\text{máx}}$ es la temperatura máxima registrada en un día determinado.

$T_{\text{mín}}$ es la temperatura mínima registrada en un día determinado.

T_{base} es la temperatura base, específica de cada especie.

2.4 Fuentes de información

En este estudio se utilizaron los datos oficiales de la *ESA*, *NASA*, *Land Viewer*, *Crop Monitoring EOS* y *GeoInnova* en conjunto con el Satélite Sentinel 2 y sistema de prospección atmosférica *Copernicus-ESA*. Modelo de análisis de distribución espacial, temporal y por tamaños de las partículas de Wasim Javed, 2015.

2.4 Áreas y polígonos de prospección urbana Cd. De Puebla vs. Río Atoyac.



Figura 5. Mapa del sistema topográfico del INEGI 2023. Con la ubicación geográfica de los polígonos de prospección satelital *ex situ-in situ* con la determinación de la correlación con el **Informe Estratégico de la Cuenca Alta del Atoyac** (esquina inferior derecha) (CONAHCYT., 2023) indica los sitios de mayor contaminación hídrica del Atoyac e índices de peligrosidad de **Cáncer, Enfermedad Renal Crónica** en adultos mayores y **Leucemia infantil**

3. Resultados



Figura 6. Imagen prototipo del satélite Sentinel 2 A. Utilizadas para diseño del análisis espacial por tramos en las zonas forestales urbanas y periurbanas del caudal con mayor riesgo poblacional

3.1 Modelo de prospección digital SIG, aplicado en el análisis espacial con sensores remotos para la determinación de longitudes y distancias del caso de estudio *ex situ-in situ*. Tramos y polígonos 1 al 4.

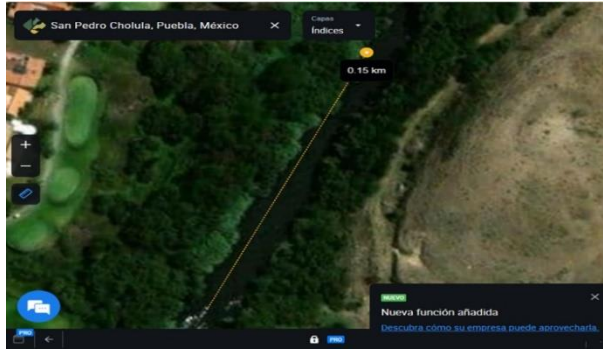


Figura 7. Imagen satelital multiespectral del satélite Sentinel 2 de la ESA. Se aprecian longitudes del trazo de zona de prospección forestal e hidropedológica en 150 Mts.

Coordenadas geográficas del polígono de estudio 19.0019° LN 98.2544° LW.

Se aprecia caudal del río Atoyac bajo línea amarilla y bosque urbano sobre sus laderas

3.1.1 Modelo general de construcción satelital de los polígonos de tramos 1 a 4 para prospección *ex situ-in situ* y análisis sobre río Atoyac, sus bosques en laderas (vegetación), corrientes (agua) y laderas (suelos desnudos).

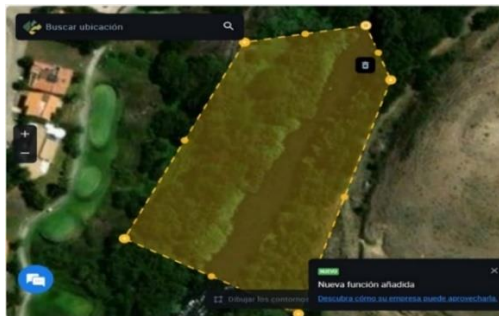


Figura 8. Imagen satelital multiespectral del satélite Sentinel 2 de la ESA de fecha noviembre del 2023. Con la determinación de la superficie del ecosistema integral. Se aprecia masa forestal como intercepto en una superficie de 1.3 Ha del polígono estudiado.

3.1.2 Modelo y ejercicio de prospección geográfica sobre caudal para todos los polígonos estudiados (1, 2, 3 y 4)



Figura 9. Imagen multispectral1 satelital del satélite Sentinel 2 del 17 de noviembre del 2023, para la determinación de las densidades y valores de la vegetación presentes en polígono 1 (flecha roja) sobre caudal del río Atoyac. Clasificación de vegetación: Densa, moderada y/o escasa. Imagen con apreciación y resolución de la ubicación urbana para estudio del índice MSAVI en una 1.2 Ha./0.37 Ha. Vegetación alta =29.74% del total estudiado.

3.2.1 Modelo de prospección del polígono 1 de Crop Monitoring EOS con análisis multispectral, utilizando el índice RCEI (clorofila presente en tejidos de hojas verdes y secas). Enero-Noviembre del 2023.



Figura 10. (Izq.) Imagen satelital multispectral del satélite Sentinel 2 de la ESA-UE de marzo del 2023. Aplicación del índice RCEI en verde claro vegetación presente. (Der.) Imagen de noviembre del 2023. En tonos rojos sobre polígono trayectoria de las corrientes de agua del río Atoyac y cambios estacionales entre marzo y noviembre.



Figura 11. (Izq.) Imagen satelital multispectral del satélite Sentinel 2 de la ESA-UE de enero 2023, (Der.) Imagen de noviembre 2023. Determinación de valores del índice RCEI. En tonos rojos oscuros sobre polígono caudal de las corrientes del río Atoyac, en verde ecosistema con densidades de vegetación forestal, pastos y suelos desnudos.

Cuadro 2: Clasificación de valores del índice **RCEI** de clorofila presente de forma foliar. **Inicial: 7.67.** Cambio ponderado estacional del **valor: 0.95.**

Tabla de clasificación										
Índice: RCEI										
grupo: Cultivos										
fecha del informe: nov. 20, 2023										
Campo	Ubicación	Coordenadas	Área	Grupo	Cultivos	Fecha de siembra	Valor del índice	Cambio de valor	Fecha de la imagen	Vista previa
Campo 9	México Puebla	19 0019°N 98 2544°W	1.2 ha				7.87	-9.93	nov. 17, 2023 Abierto	

Fuentes: *Crop Monitoring EOS & Sentinel 2 ESA (2023)*

3.3.1 Análisis estadísticos climáticos ciclo P-V/O-I 2023 de la relación: Clima-Índice RECI (contenido de clorofila en las hojas).

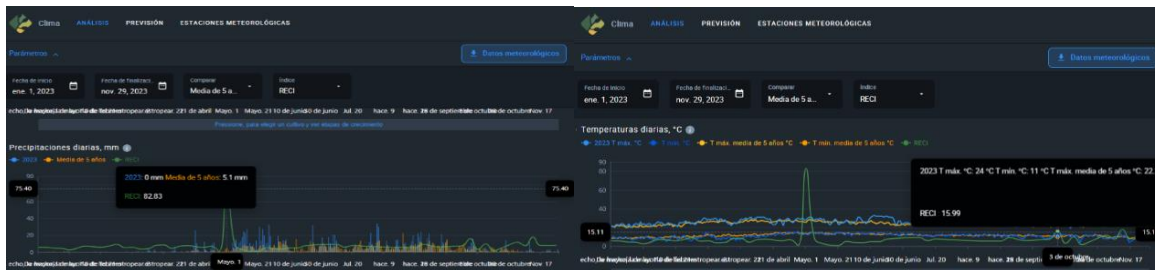


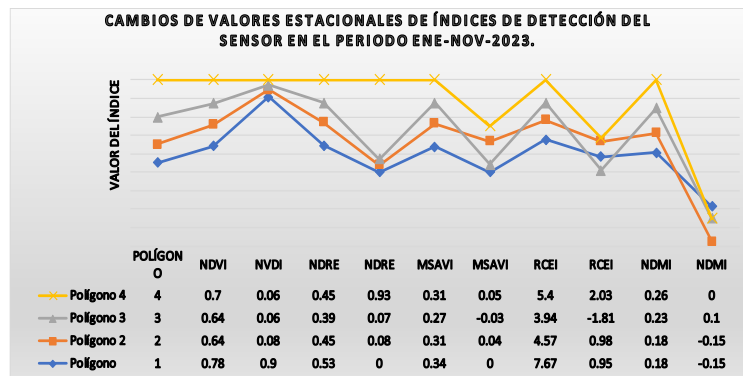
Figura 12. (Izq.) Gráfico de estadística de precipitaciones acumuladas de enero a noviembre del 2023. Arrojan un total de precipitaciones anualizadas 51 mm y diarias de 5.1 mm. Con un índice asociado al clima RCEI de 82.83/anual y 0.22 /día. (Der.) Temperaturas de 24 °C y 11 °C ponderadas Ene-Nov



Figura 13. Gráfico de estadística de temperaturas activas de enero a noviembre del 2023.

Arrojan un total de Temperatura de 949 °C acumulada como fuente de energía para fotosíntesis y una máxima de 28 °C con una mínima de 13 °C. Índice RCEI asociado al clima de 82.83.

Gráfico 1: Análisis de los cambios de valores obtenidos con los índices de teledetección aplicados en los tramos y polígonos 1 al 4 (Figura 5).



Fuente: Elaboración propia (2023)

3.3.2 Interpretación de los valores gráficos por árbol en cada polígono del bosque urbano sobre del caudal del río Atoyac.



Figura 14. Esquema del estado gráfico de fisiología vegetal, sanidad y salud forestal de un árbol con equivalencia al bosque del caudal del río Atoyac mediante análisis espacial con el sensor de la ESA-Sentinel 2 . Imagen Elaboración propia (2023).

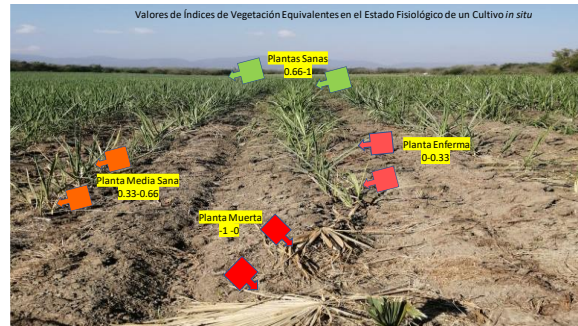


Figura 15. Modelo aplicado en el estado de sanidad de un cultivo (caña de azúcar) in situ con análisis de teledetección. La mayoría de los casos, los valores de NDVI entre 0.2 y 0.4 corresponden a áreas con vegetación escasa; la vegetación moderada tiende a variar entre 0.4 y 0.6; cualquier cosa por encima de 0.6 indica la mayor densidad posible de hojas verdes. Imagen. Elaboración propia (2023).

3.4.1 Modelo del análisis de las densidades vegetales presentes en caudal del río Atoyac por superficie de los polígonos 1 y 2. El 3 y 4 sin imágenes disponibles para ese análisis.



Figura 16. Imagen de satélite multispectral del Sentinel 2 zonificada con análisis de superficies vs. Densidades de vegetación

Valores forestales obtenidos: Se determinaron un total de vegetación alta (masa forestal disponible 0.37 Ha. Equivalentes al 29.74%, en la zona dos al centro en color verde 0.52 Ha. 42.01



Figura 17. Imagen de satélite multispectral del Sentinel 2 zonificada con análisis de superficies vs. Densidades de vegetación

Valores forestales obtenidos: Vegetación con porte alto 1.26 Ha Eq. Al 74.31% con un promedio de NDVI (zonas problemáticas enfermas y con plagas) promedio 0.75. De la Zona 2 0.27 Ha Eq. Al 16 % con un NVDI promedio de 0.56%. Vegetación baja 0.16Ha Eq. Al 0.69 con un NVDI promedio del 0.34.

3.5.1 Modelo de arrastres de sedimentos citotóxicos PM 2.5 de COVs y PVs sobre el caudal de agua del río Atoyac. Por pendientes clasificadas con teledetección del polígono en el tramo y polígono 2.



Figura 18: Imagen satelital multispectral del satélite Sentinel 2 de la ESA-UE de la zona urbana y periurbana (Izq.) Enero del 2023, (Der.) Noviembre del 2023. Sobre río Atoyac.

Señala pendientes con la ubicación de los puntos con mayor pendiente en color rojo hacia el rumbo ESE, para estudio de arrastres de COVs y PVs al caudal de agua.

En verde agua, en rojo pendientes de ladera.



Figura 19: Imagen satelital multiespectral del satélite Sentinel 2 de la ESA-UE de la zona urbana y periurbana (Izq.) Enero del 2023, (Der.) Noviembre del 2023. Señala **Pendiente en grados** con la ubicación de los puntos con mayor inclinación en color rojo rumbo ESE.

Los valores arrojan la menor pendiente entre 0° y 3°, la mayor de 7° a $\geq 9^\circ$.

Valores determinados de índice **NVDI** correspondiente al polígono 2: Vegetación densa enero 0.69 Ha. con un índice de 0.624 a 0.758, Vegetación densa noviembre 0.85 Ha. Con un índice 0.711 a 0.852. Vegetación media enero de 47 Ha. Con un índice de 0.49 a 0.624. Vegetación media noviembre 0.28 Ha. Con un índice de 0.428 a 0.57. Vegetación baja enero 0.21 Ha. Con un índice de 0.222 a 0.356. Vegetación baja noviembre 0.08 Ha. Con un índice 0.297 a 0.428. En rojo trayectoria y agua del río Atoyac.

Valores determinados de índice **NDRE**: Vegetación densa enero 0.47 Ha. con un índice de 0.467 a 0.581, Vegetación densa noviembre 0.56 Ha. Eq. Al 33% Con un índice 0.566 a 0.694. Vegetación media enero de 43 Ha Eq. Al 26%. Con un índice de 0.354 a 0.467. Vegetación media noviembre 0.2 Ha. Eq. Al 12%. Con un índice de 0.439 a 0.566. Vegetación baja enero 0.45 Ha. Eq. Al 27%. Con un índice de 0.24 a 0.354 a 0.356.

Vegetación baja noviembre 0.64 Ha. Eq. Al 38%. Con un índice 0.311 a 0.439. En rojo trayectoria y agua del río Atoyac.

Valores determinados de índice **MSAVI**: Vegetación densa enero 0.26 Ha. con un índice de 0.306 a 0.396, Vegetación densa noviembre 0.23 Ha. Eq. Al 14% Con un índice 0.482 a 0.587. Vegetación media enero de 34 Ha Eq. Al 20%. Con un índice de 0.306 a 0.396. Vegetación media noviembre 0.28 Ha. Eq. Al 17%. Con un índice de 0.376 a 0.482. Vegetación baja enero 0.43 Ha. Eq. Al 26%. Con un índice de 0.126 a 0.215. Vegetación baja noviembre 0.44 Ha. Eq. Al 27%. Con un índice 0.166 a 0.271. En rojo trayectoria y agua del río Atoyac.

Valores determinados de índice **RCEI**: Vegetación densa enero 0.12 Ha. Eq. Al 7% con un índice de 5.032 a 6.242, Vegetación densa noviembre 0.05 Ha. Eq. Al 3% Con un índice 9.303 a 11.543. Vegetación media enero de 0.39 Ha Eq. Al 23%. Con un índice de 3.822 a 5.032. Vegetación media noviembre 0.32 Ha. Eq. Al 19%. Con un índice de 7.063 a 9,303. Vegetación baja enero 0.36 Ha. Eq. Al 21%. Con un índice de 2.612 a 3.822. Vegetación baja noviembre 0.48 Ha. Eq. Al 29%. Con un índice 2.584 a 4.823. En naranja y rojo trayectoria y agua del río Atoyac.

3.5.2 Modelo del efecto toxicológico de la columna de humo y gases del volcán Popocatepetl sobre río Atoyac.

Indicadores del monitoreo Atmosférico de columnas de humo e impacto del volcán Popocatepetl (NASA & ESA., 2023). Antecedentes de contaminación atmosférica global del 2014.

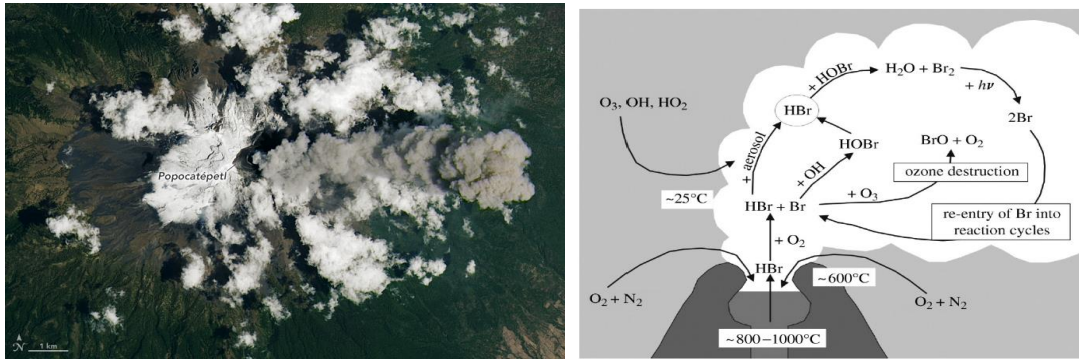


Figura 20. (Izq.) Imagen de satélite de la NOAA-NASA del año 2023 de la columna de humo del volcán Popocatépetl, muestra las altas concentraciones de emisiones de azufre y PM 2.5 citotóxicas. (Der.) Moléculas y componentes químicos de la columna de humo de un volcán en erupción de humos citotóxicos

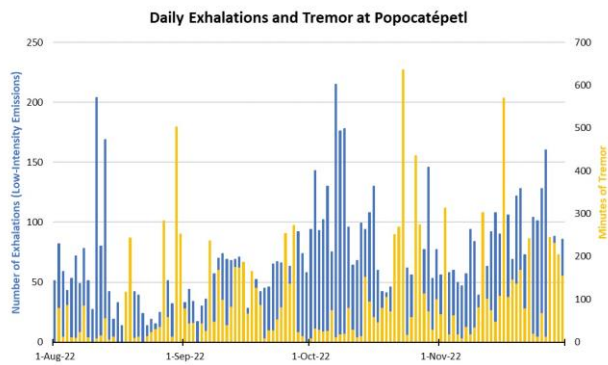


Figura 21. Estadística de exhalaciones y señales sísmicas por minuto del volcán Popocatépetl durante 2022 (CENAPRED., 2022)

3.5.3 Análisis espacial de la columna de azufre del volcán Popocatépetl generadora de PVs y PM 2.5. imagen del satélite Sentinel 2 A, Copernicus ESA-UE.

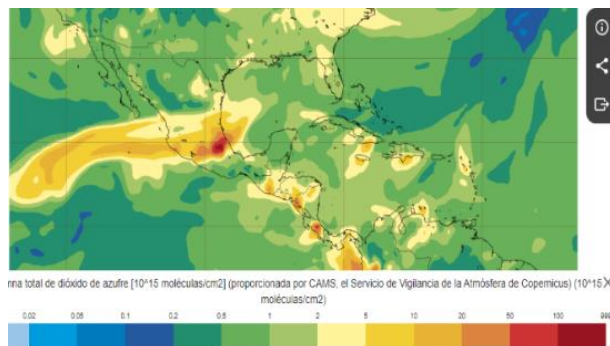


Figura 22. Imagen del satélite Sentinel 2A de noviembre del 2023. Emisión de humo de volcán Popocatépetl. Presencia de dióxido de azufre (SO₂). Columna total [10¹⁵ moléculas/cm²] (proporcionada por CAMS, el Servicio de Vigilancia de la Atmósfera de Copernicus) (10¹⁵ moléculas/cm²)

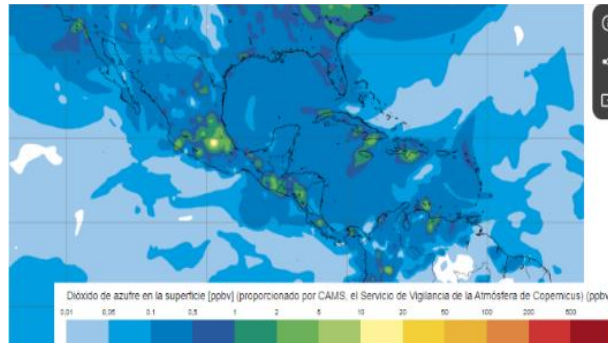


Figura 23. Emisión de humo de volcán Popocatépetl. Presencia de dióxido de azufre (SO₂) (superficie)

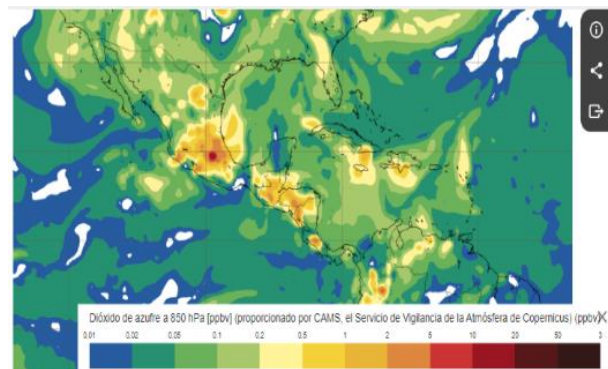


Figura 24. Emisión de humo de volcán Popocatépetl. Presencia de dióxido de azufre (SO₂) (850 hPa = 0.867 kgf/cm²)

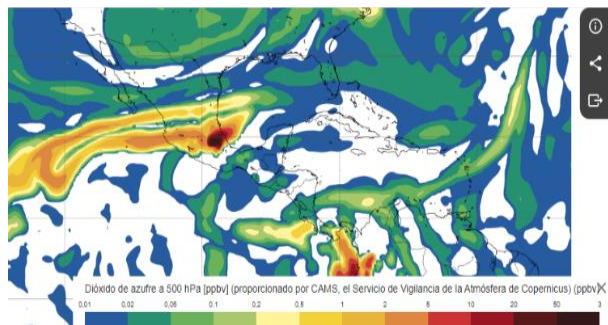


Figura 25. Presencia de dióxido de azufre (SO_2) ($500 \text{ hPa} = 0.51 \text{ kgf/cm}^2$). emisión volcán
Popocatépetl

- Nota: Kg/cm^2 - Kgf/cm^2 . Medida de presión, que equivale a un kilogramo-fuerza por centímetro cuadrado de superficie. $1 \text{ Kg/cm}^2 = 14.22 \text{ psi}$

3.5.4 Modelo de la OMM de emisiones de azufre volcánico:

- Las emisiones volcánicas están compuestas por varios gases, cuya composición química cambia de un volcán a otro, dependiendo del contexto geodinámico. Las especies de azufre emitidas por los volcanes son principalmente dióxido de azufre (SO_2) y ácido hidrosulfúrico (H_2S) en una cantidad mucho menor. Siendo, con mucho, la especie de azufre dominante, solo así que se menciona en los inventarios mundiales de emisiones volcánicas.

Conjugados PVs, COVs, PM 2.5 y GEL.

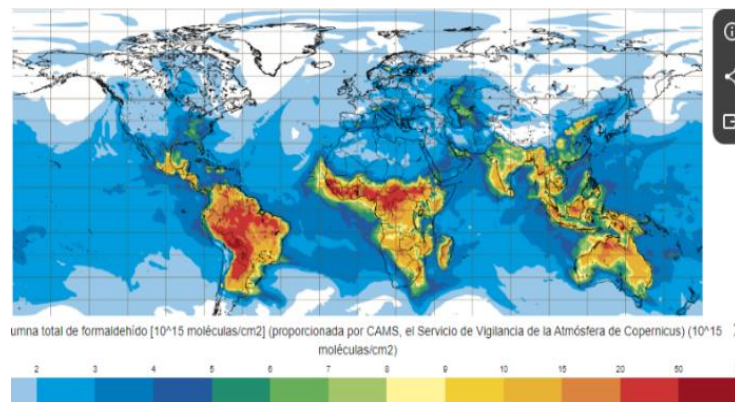


Figura 26. Presencia de formaldehído (CH_2O). Columna total de formaldehído [10^{15} moléculas/ cm^2] (proporcionada por CAMS, el Servicio de Vigilancia de la Atmósfera de Copernicus) (10^{15} moléculas/ cm^2)

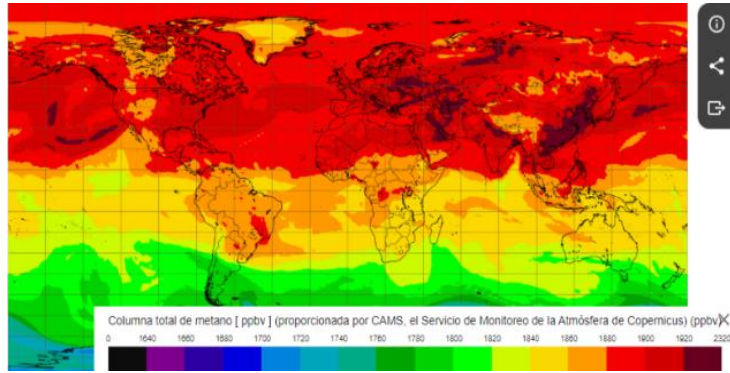


Figura 27. Presencia de metano (CH_4) Columna total de metano [ppbv] (proporcionada por CAMS, el Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus) (ppbv)

3.5.5 Modelo de la OMM

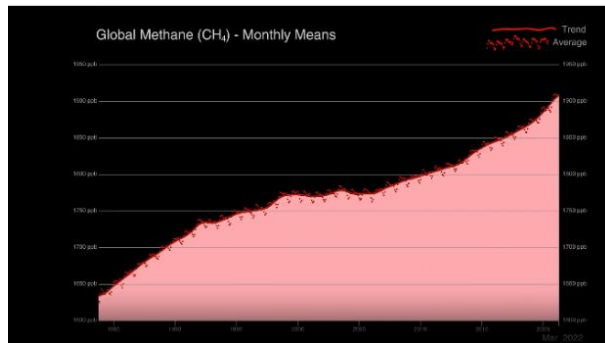


Figura 28. Gráfica temporal del metano (CH_4) atmosférico global que muestra el registro completo de la NOAA (septiembre de 1983 a marzo de 2022). Fuente: Trends in Global Atmospheric Methane, CH_4

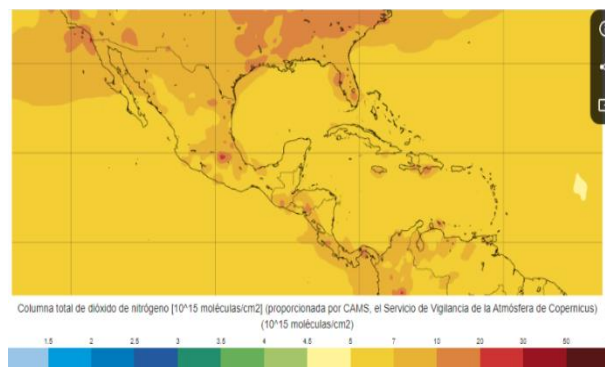


Figura 29. Presencia de dióxido de nitrógeno (NO_2). Columna total de dióxido de nitrógeno [10^{15} moléculas/cm²] (proporcionada por CAMS, el Servicio de Vigilancia de la Atmósfera de Copernicus) (10^{15} moléculas/cm²)

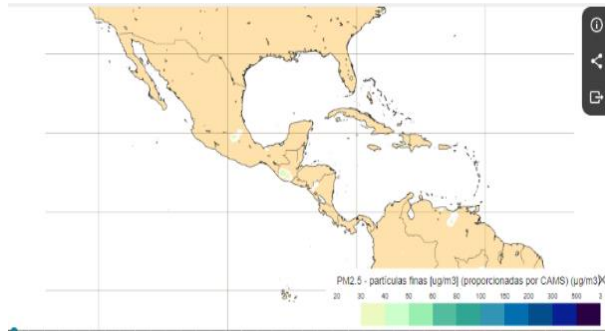


Figura 30. Presencia de partículas PM 2.5- partículas finas [µg/m³] (proporcionadas por CAMS) (µg/m³)

3.5.6 Efecto de estrés oxidativo en tejidos humanos y vegetales por la fuente de energía UV.

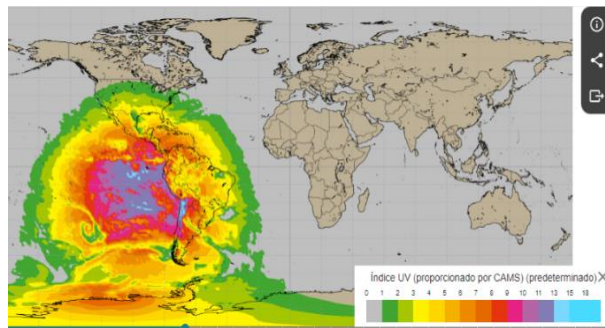


Figura 31. Previsiones del índice CAMS UV.

- Una lectura de **índice UV de 8 a 10 significa un riesgo muy alto de daño por exposición al sol** sin protección. Tome precauciones adicionales porque la piel y los ojos sin protección resultarán dañados y pueden quemarse rápidamente. (UV index forecasts-Copernicus Atmosphere Monitoring Service,2023).

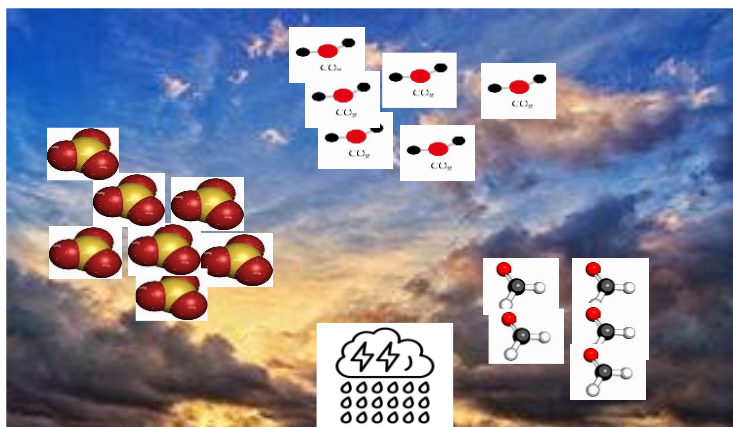


Figura 32. Representación gráfica de capas de partículas PM 2.5 citotóxicas de GEI, COVs y PVs sedimentables de forma conjunta, que conforman parte del fenómeno de cambio climático y con efectos de UV (Figura 24) se convierten en lluvia ácida. Imagen Elaboración propia (2023)

4. Discusión

Los efectos citotóxicos vía ingesta y respiratoria para humanos y vía tejido celular, por fragilidad celular a las PM 2.5 y <0.5 (figuras 1, 2, 3, 20 a 32), en la vegetación presente en el caudal del Atoyac, -qué en conjunto-, con las partículas sedimentables de GEI, COVs y PVs conjugadas en la atmosfera forman capas densas (figura 20 y 32), más el calor incremental- (figuras 31) aunado a la radiación excedente por rayos UV (Figura 31), la lluvia ácida acumulada (figura 32), son factores determinantes por estrés oxidativo y toxicidad coadyuvante en las muertes de humanos. Por **Cáncer, Enfermedad Renal Crónica y Leucemia infantil** (CONAHCYT, 2023) y en la muerte celular de tejidos vegetativos del bosque del caudal del río Atoyac (figuras 14 y15).

Los cambios de energía detectados por el sensor y análisis climatológico y las observaciones microscópicas nos dan la claridad necesaria para comprender el fenómeno e iniciar una estrategia de contención del problema.

No se colocaron todas las imágenes de los índices estudiados, ni las gráficas estadísticas de climatología por ser más de 40 imágenes. Pero están disponibles para consultas en el correo citado.

Las pendientes de los bordes de las laderas en el caudal del río Atoyac (figuras 18 y 19), significan un problema complejo de incrementos en las concentraciones tóxicas de COVs, PVs y PM 2.5 a las corrientes de agua y en consecuencia a la toxicidad de los sedimentos hidropedológicos, así como la transversalidad a otras cuencas hidrológicas.

Si las concentraciones determinadas por el satélite Sentinel 2 y sistema *Copernicus* del valor de (10^{15} moléculas/cm²) indicadas en las imágenes de la ESA (figura 22), se deben considerar letales para los ecosistemas, poblaciones de humanos y animales, -éstas-, equivaldrían a 100,000,000 de moléculas dispersas en las zonas urbanas de la Cd. De Puebla. Lo cual, pondría el tema ambiental y de cambio climático por COVs, PVs y GEI Atoyac-Popocatepetl en **semáforo rojo y prioridad estratégica**.

5. Conclusiones

Se revisaron 40 imágenes satelitales de los 4 polígonos determinados (mismas que no se pueden incluir en el presente artículo por su tamaño y peso) con el satélite Sentinel 2 A-ESA y con los modelos establecidos por *Crop Monitoring EOS, Land Viewer* y *GeoInnova*, lo que nos llevó a los resultados y valores de los índices en el gráfico 1 y las presentes conclusiones.

Los indicadores de vegetación obtenidos en los caudales del río Atoyac por teledetección con el sensor Sentinel 2, ponen en evidencia las alteraciones de pureza atmosférica, hidrológica y pedológica en la Cd. De Puebla por la presencia de GEI, COVs, PVs y PM 2.5, mismos que fueron corroborados con la información del *Servicio de Vigilancia de Atmósfera de Copernicus* y del Satélite Sentinel de la ESA (figura 30) ,

igualmente con las imágenes de la NOAA de la NASA (figuras 20, 21 y 28) y el análisis particulado del año 2019 (figuras 2 y 3).

Las alteraciones atmosféricas sedimentables y lluvia ácida (figura 32) que, en consecuencia, generan perturbaciones biológicas y ecológicas del bosque del caudal del río Atoyac ponen en riesgo la vida forestal e hídrica de ese ecosistema y *en consecuencia la estabilidad climática y ambiental del ciclo hidrológico de la urbe.*

Las partículas citotóxicas PM 2.5 a $<0.5 \mu\text{m}$ compuestas por COVs y PVs sedimentables, *-con concentraciones letales evidentes-* en las figuras 1, 2, 2 Bis, 2Bis¹, 3, 3Bis, y 20 a 29, demuestran que los sedimentos hidropedológicos estén saturados de toxicidad grave y en consecuencia: El ciclo de evapotranspiración hacen que se multipliquen y potencialicen su letalidad; Impactando los suelos de laderas, aguas superficiales y subterráneas, así como, los sistemas radiculares de la vegetación presente en laderas en sus funciones primarias de nutrición y fotosíntesis en hojas, a lo largo de todo el caudal del río.

Los bajos índices de clorofila RCEI y NVDI nos arrojaron impactos en la vegetación forestal por las presencias de COVs, PVs y PM 2.5 de origen volcánico y descargas industriales en el río Atoyac, tal como lo reportó CONAHCYT en su informe de la CAA; Las imágenes multiespectrales determinaron alteraciones fisiológicas y metabólicas de la vegetación presente en las laderas de los caudales del río estudiados (Figuras 9, 10 y 11).

Por último, acorde a la figura 31 de *Previsiones del índice CAMS UV*, *la intensidad de los rayos UV presentes, están en un factor energético del límite superior, con un factor de riesgo ionizante por la longitud de onda para las PM $<0.5 \mu\text{m}$, lo cual coadyuva en todas las enfermedades señaladas por el CONAHCYT en su informe de la CAA.*

6. Recomendaciones

Realizar la *Batimetría* hidropedológica con ecosondas y sensorización por teledetección de la trayectoria y direccionamiento urbano del caudal del río Atoyac, en zonas urbanas y periurbanas en la Cd. De Puebla y los municipios fronterizos conurbados de Tlaxcala. Esto permitirá determinar los volúmenes de sedimentos presentes para el cálculo del saneamiento y la determinación de la disposición final adecuada de todos estos lodos citotóxicos.

Reforestar todas las laderas del río Atoyac con especies frondosas resistentes a partículas citotóxicas que amortigüen el efecto particulado sobre el caudal de agua de río.

Referencias

AccuSizer A7000., 2019. Single Particle Optical Sizing. Accurate determination of particle size and counts at the tail end of your distributions. PSS. <https://www.entegris.com/en/home/resources/technical-information/particle-characterization-applications/contamination.html>.

Álvarez-Bulla María Elena, 2023. 1er Informe Estratégico Cuenca Del Alto Atoyac (Tlaxcala Y Puebla): Región De Emergencia Sanitaria Y Ambiental; Problemática Socioambiental Y Recomendaciones Para Su Atención Integral Versión octubre de 2023 (CONAHCYT/UNAM-IPN). p. 93 y 94

Annual Report Toxic Substances Portal. (ATSDR)., 2019. Agency for toxic substances and disease registry. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). [En línea] Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/index.asp> [fecha de consulta: mayo 2019] pp.7

Bello, O., Ortiz L., Samaniego J. 2014. Medio Ambiente y Desarrollo, “La estimación de los efectos de los desastres en América Latina, 1972-2010”, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Naciones Unidas CEPAL), ISSN 1564 -4189. Santiago de Chile, pp.19, 21, 308

Blanco Jiménez, S. 2015. Evaluación de Partículas Suspendidas PM 2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey, Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC-SEMARNT, México. D.F. <https://www.gob.mx/inecc>. [fecha de consulta: mayo 2019] pp. 7,8,15

Bravo Inclan L. A., Sánchez Ch., J. J., Izurieta D. J. L. y Tomasini O. A. C. 2015. Evaluación Toxicológica Del Río Atoyac, Pue.; Y su Relación con los Parámetros Físicoquímicos, (IMTA) Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México p.1

Calibración de datos de nubes de ceniza para los Volcanes Mexicanos. 3.1 Recopilación de publicaciones científicas. 2018. CENAPRED. Número de convenio 52769-1829-7-VI-18. UNAM, IG-UNAM, LAN. México

Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2019. Servicio de Monitoreo a la Atmosfera. Gráficos de pronóstico global [En línea] Disponible en: <https://www.copernicus.eu/es/servicios/vigilancia-atmosferica> [fecha de consulta: mayo 2019]

Crop Monitoring EOS.2023. <https://crop-monitoring.eos.com/login>

Elzinga, Caryl L., Salzer D. W. & Willoughby W. J., 1999. Measuring & Monitoring Plant Populations. Bureau of Land Management, National Business Center., Technical Reference BLM 1730-1, Denver, Colorado, USA. pp. 61, 66

Gas Guide Line., 2019, International volcanic health hazard network, Volcanic Gases And Aerosols Guide Lines, IVHNN <http://www.ivhnn.org/gas/guidelines.html>, Hawaii, USA. 20/05/2019. pp. 4, 5

Geoinnova. 2023. Formación y Consultoría Geoespacial. <https://geoinnova.org/quienes-somos/Territorial>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2019. Cuenca hidrológica Alto Atoyac. Humedales Informe técnico. México. INEGI. pp.79-553

Lamotte, C., Guth, J., Marécal, V., Cussac, M., Hamer, P. D., Theys, N., y Schneider, P.: Estudio de modelización del impacto de SO₂ emisiones pasivas volcánicas en el balance troposférico de azufre, Atmos. Chem. Phys., 21, 11379–11404, <https://doi.org/10.5194/acp-21-11379-2021>. Fecha de consulta 15-01-2023

INAOE-CONACYT/SEDEMA. 2019. Prospección, monitoreo y muestreo de las partículas sedimentarias presentes en las emisiones atmosféricas de gases producto de las erupciones y fumarolas que está emitiendo el volcán Popocatepetl sobre la ciudad de Puebla y zonas urbanas colindantes. para determinar niveles de toxicidad e impactos en sus habitantes. bajo sistemas de sensores in situ -ex situ. integrando en imágenes de satélites de la NASA Y ESA. Tonanzintla, Puebla, México.

Land Viewer EOS.2023. <https://eos.com/landviewer/?s=Sentinel2>

Sandoval Villasana, A. M.; Pulido-Flores, G.; Monks, S.; Gordillo Martínez A.J; Villegas V. E. C.; 2009. Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. Interciencia 34(12):880-887. ISSN: 0378-1844. pp.

880, 887

Salamanca Alfonso, 2019. Noticieros Televisa, Ecología, 31 por ciento de 5 mil incendios forestales en 2019 fueron intencionales: CONAFOR. [En línea] Disponible en: <https://noticieros.televisa.com/historia/31-incendios-forestales-2019-intencionales-conafor>
fecha de consulta: mayo 2019

SEDEMA, 2022. Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030, que emite la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. Puebla, Puebla. México.

OMNICxi, Thermo Scientific para Raman. Software y bibliotecas para sus necesidades de muestreo de espectroscopía Raman. 2019. Microscopio de adquisición de imágenes Raman Thermo Scientific DXR3xi, el software OMNICxi proporciona análisis y adquisición de imágenes químicas con control visual. También está disponible una opción para procesar imágenes en 3D de datos Raman confocales.

Wasim Javed, Anthony S. Wexler, Ghulam Murtaza, Hamaad R. Ahmad, Shahzad M.A. Basra. 2015. Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan, *Atmósfera*, Volume 28, Issue 2, Pages 99-116, ISSN 0187-6236. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(15\)30003-5](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(15)30003-5).