

# Impacto del ozono troposférico en el cultivo de papa bajo situaciones sinópticas típicas en Cuba

## Impact of tropospheric ozone on potato crop under typical synoptic situations in Cuba



<https://cu-id.com/2377/v30n4e04>

 Rachel Martínez Rodríguez\*,  Arnaldo E. Collazo Aranda,  Rosemary López Lee

Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera. Instituto de Meteorología (INSMET). Carretera del Asilo S/N. Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba.

**RESUMEN:** En la investigación se evaluó el impacto del ozono troposférico ( $O_3$ ) en el cultivo de la papa en San José de las Lajas bajo la influencia de condiciones meteorológicas tipo. La información sobre las concentraciones de  $O_3$  se obtuvo de las salidas del modelo *SILAM*. La clasificación de los tipos de situaciones sinópticas se obtuvo a partir de los mapas del estado general del tiempo del Instituto de Meteorología. Para evaluar el impacto del  $O_3$  en el cultivo de la papa se utilizó el índice AOT40. El estudio se realizó para el período comprendido desde enero de 2021 hasta marzo de 2022. Se obtuvo el comportamiento diario y estacional de las concentraciones de  $O_3$ , así como la variación de estas bajo la influencia de los distintos tipos de situaciones sinópticas. Los meses con mayores concentraciones diarias promedio de  $O_3$  coincidieron con el período poco lluvioso. Predominó la influencia de los anticiclones continentales migratorios durante más del 50% de los días analizados. Se observó un aumento de las concentraciones horarias de  $O_3$  en los días posteriores al paso de zonas frontales, lo cual evidenció el transporte transfronterizo de contaminantes desde Estados Unidos. La correlación obtenida entre los tipos de situaciones sinópticas y las concentraciones de  $O_3$  fue de moderada a baja. Las pérdidas estimadas en la producción de papa debido a la exposición al  $O_3$  fueron de 15 a 14 toneladas (4138-3999 USD).

**Palabras clave:** AOT40, cultivo de la papa, ozono troposférico, San José de las Lajas, tipo de situación sinóptica.

**ABSTRACT:** In the research, the influence of tropospheric ozone concentrations on potato crop under types of synoptic situations in San José de las Lajas was evaluated. The ozone concentrations data was obtained from the *SILAM* Model outputs. The classification of the typical synoptic situations was carried out from the synoptic maps of the Institute of Meteorology. For impact assessment of ozone exposure on potato crop AOT40 index was used. The study covered the period between January 2021 and March 2022. The daily and annual progress of the concentrations of ozone and their behavior under the influence of the typical synoptic situations were obtained. Months with the highest daily average ozone concentrations belonged to the season of lesser rains. The influence of continental migratory anticyclones predominated for the 50% of the total days analyzed. The highest daily ozone average concentrations were assigned to these typical synoptic situations. An increase of the ozone hourly concentrations was observed after frontal zones passed, evidencing transboundary transport of pollutants from US. The obtained correlation between tropospheric ozone concentrations and synoptic situations was from low to moderated level. The estimated potato crop losses for tropospheric ozone exposure were from 14 to 15 ton (4138-3999 USD).

**Keywords:** AOT40, potato crop, tropospheric ozone, San José de las Lajas, type of synoptic situation.

\*Autor para correspondencia: Rachel Martínez Rodríguez. E-mail: [victoria20plus@gmail.com](mailto:victoria20plus@gmail.com)

Recibido: 06/03/2024

Aceptado: 03/06/2024

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización del estudio.

**Contribución de los autores:** Todos los autores contribuyeron al estudio. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final. **Conceptualización y supervisión:** Arnaldo E. Collazo y Rosemary López. **Procesamiento de datos:** Rachel Martínez. **Investigación:** Rachel Martínez y Arnaldo E. Collazo. **Metodología:** Rachel Martínez y Arnaldo E. Collazo. **Redacción y edición:** Rachel Martínez

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

El ozono troposférico (O<sub>3</sub>) es un contaminante secundario, procedente de las reacciones fotoquímicas de sus precursores o contaminantes primarios (óxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles). La naturaleza altamente oxidante de este gas, provoca daños a las especies arbóreas en términos de superficie forestal afectada y su extensión, así como en pérdidas de biodiversidad en los pastizales naturales. El estrés oxidativo del O<sub>3</sub> también afecta los cultivos comerciales, debido a que produce una reducción en la cosecha y calidad de estos (Jiménez-Montenegro *et al.*, 2021).

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es el cuarto alimento básico en el mundo y una importante fuente de energía, debido a su alto contenido de carbohidratos (principalmente almidón). Pero la exposición a largo plazo a altas concentraciones de O<sub>3</sub> puede causar una caída en su contenido de almidón, lo que conduce a importantes pérdidas de rendimiento (Jiménez *et al.*, 2021).

Desde la década de los 70 del siglo pasado, ya se tiene una gran experiencia acumulada y antecedentes por las investigaciones realizadas por Ramírez (1989, 1992), acerca de los procesos meteorológicos y ambientales, que favorecen el incremento de las concentraciones del ozono troposférico en Cuba. Se tienen estudios más recientes como López *et al.* (2018) y su evaluación del riesgo por el impacto del O<sub>3</sub> sobre la salud y la vegetación.

Sin embargo, en la actualidad no se cuenta en el país con una red de monitoreo continuo para la medición sistemática de este contaminante y sus precursores. Por tanto, se utiliza, como paliativo, la información que se encuentra disponible con libre acceso de las salidas de los modelos globales, tal es el caso del modelo Global: *System Integrated for ModelIng of Atmospheric CoMposition (SILAM)*, de utilidad para la vigilancia de la composición química de la atmósfera nacional.

*SILAM* (Sistema Integrado para el Modelación de la Composición Atmosférica) es un modelo de dispersión atmosférica de escala global a meso desarrollado por el Instituto Meteorológico de Finlandia (*FMI, siglas en inglés*). Proporciona información sobre la composición atmosférica, la calidad del aire y el humo de los incendios forestales (PM<sub>2.5</sub>) y también puede resolver el problema de la dispersión inversa. El *FMI* proporciona mediante *SILAM* un pronóstico de contaminantes atmosféricos globales con 5 días de antelación (SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) basado en *TNO-MACC* (emisión global) e *IS4FIRES* (incendios forestales) (FMI, 2022).

En la legislación ambiental de Cuba se encuentra vigente la NC 1020:2014 que establece las concentraciones máximas admisibles (CMA) de

contaminantes en el aire en zonas habitables, así como los valores guías (VG) de calidad del aire (ONN, 2014; OMS, 2021). Esta norma establece 100 µg/m<sup>3</sup> como CMA de O<sub>3</sub> en 8 horas. En el país no existen normas de calidad del aire para los ecosistemas. Sin embargo, otros autores (López *et al.*, 2018) han usado como referencia los valores guías secundarios recomendados por la OMS (Calderón, 2011), que sugiere 80 µg/m<sup>3</sup> como CMA de O<sub>3</sub> en 1 hora.

El índice AOT40, se utiliza para cuantificar la superación de los valores de O<sub>3</sub> por encima del fondo natural (por encima de 40 ppb) durante el periodo de crecimiento de un cultivo (estandarizado a 3 meses). El AOT40 se ha utilizado tanto en Europa (Sánchez, 2021) como en Estados Unidos y en el caso de Cuba este índice fue utilizado por López *et al.* (2018) para un análisis de riesgo en La Habana.

La clasificación de los tipos de situaciones sinópticas (TSS) constituye una necesidad para poder realizar la climatología de los procesos atmosféricos que influyen sobre una región o país. La forma más simple para clasificar los TSS es mediante la agrupación de patrones isobáricos similares que aparecen en los mapas del tiempo, conformando grupos con los mapas donde predominan situaciones sinópticas con estructuras y distribuciones semejantes (Torres *et al.*, 2020). Lapinel (1988) utilizó un criterio subjetivo de clasificación de los tipos de situaciones sinópticas influyentes sobre Cuba (tabla 1), que tenían una relación definida con la ocurrencia o no de precipitaciones en el territorio nacional. Lapinel(1988) clasificó los TSS para Cuba de la siguiente forma:

**Tabla 1.** TSS que influyen sobre Cuba (Lapinel, 1988)

I	Anticiclón del Atlántico
II	Anticiclón Extendido
III	Gradiente débil
IV	Situaciones ciclónicas
V	Zonas de Convergencia
VI	Baja Extratropical
VII	Zonas Frontales
VIII	Anticiclones Migratorios
IX	Otras situaciones

En Cuba la papa representa uno de los principales tubérculos consumidos en el país (Martín, 2019), y Mayabeque constituye la principal provincia productora de papa en Cuba (ONEI, 2021). San José ocupa el tercer lugar en la producción de papa de dicha provincia occidental, y es el municipio más poblado de la misma (ONEI, 2021).

El nivel de calidad del aire en San José de las Lajas puede considerarse deficiente. Con 7 fuentes de contaminación, es el municipio más contaminado de la provincia de Mayabeque (Cuesta *et al.*, 2019). Sin embargo, son escasos los estudios que relacionan las concentraciones de O<sub>3</sub> con el rendimiento agrícola

del cultivo de la papa, así como con la salud de la población residente en dicho municipio, los cuales podrían contribuir a la elevación de la calidad de vida de la población residente en este municipio, así como un mejor rendimiento de la producción agrícola.

Por otro lado, el objetivo general de la investigación fue evaluar el impacto del  $O_3$  en la producción de papa en San José de las Lajas bajo la influencia de condiciones meteorológicas tipo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área del estudio

La base de datos utilizada abarca el período desde enero de 2021 hasta marzo de 2022. Se seleccionó como área de interés el municipio de San José de las Lajas, en la provincia de Mayabeque (figura 1), ubicado en los  $22^{\circ}58'05''$  latitud norte y los  $82^{\circ}09'21''$  longitud oeste.



(Fuente: [satellites.pro/mapa\\_de\\_San\\_José\\_de\\_las\\_Lajas.República\\_de\\_Cuba](https://satellites.pro/mapa_de_San_José_de_las_Lajas.República_de_Cuba))

Figura 1. Localización del área de estudio

### Procesamiento de las salidas del modelo global de Calidad del Aire (SILAM)

Se descargaron los archivos (en formato *NetCDF*), provenientes del modelo global de Calidad del Aire (*SILAM*). Luego, se procedió a extraer los valores de las concentraciones del ozono troposférico (promedio diario **cnc\_mean\_day\_O3** y máximo en 8 horas **cnc\_max\_day\_O3**) en el área de estudio (territorio nacional) y se obtuvo la serie diaria de las concentraciones de  $O_3$  para el área y período del estudio.

### Método de obtención de los datos de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS)

Se confeccionó una base de datos sobre los TSS (Catálogo que comprende 9 tipos principales y 20 subtipos), a partir de los Estados Generales del Tiempo (EGT) y los mapas sinópticos que se confeccionan con el software *Digital Atmosphere*,

emitidos por el Centro Nacional de Pronóstico del tiempo del Instituto Nacional de Meteorología de Cuba. Con esta base de datos se pudo identificar y clasificar el TSS para cada día del período que abarcó el estudio, utilizando las clasificaciones hechas Lapinel (1988).

### Estimación del impacto de la exposición al ozono en las plantas

Para estimar el impacto de la exposición al  $O_3$  en las plantas se utilizó el índice AOT40 (1) (Sánchez, 2021; Mills *et al.*, 2007; Hollaway *et al.*, 2012). El AOT40 se obtuvo mediante la suma de la diferencia entre la media horaria de las concentraciones de  $O_3$  y 40 ppb, para cada hora con luz solar (8 a.m.- 8 p.m.) donde las concentraciones sobrepasaron los 40 ppb, durante un período de tres meses:

$$AOT40 = \sum_{i=1}^n ([O_3] - 40) * i, \quad (1)$$

$[O_3] > 40 \text{ ppb}$

Donde  $n$  es el número de horas ( $i$ ) en las cuales las concentraciones de ozono fueron superiores a 40 ppb.

El rendimiento relativo del cultivo ( $RY$ ) (2) se obtuvo utilizando las funciones exposición-respuesta a la exposición al  $O_3$  para el caso de la papa. Se emplearon las funciones obtenidas para países europeos (Mills *et al.*, 2007; Hollaway *et al.*, 2012), las cuales dan una relación exposición-respuesta lineal como función del AOT40.

$$RY = -0.0057 * AOT40 + 0.99 \quad (2)$$

Donde  $RY$  es el rendimiento relativo.

Para la estimación de la reducción del rendimiento relativo del cultivo ( $RYL$ ) (3) teórico, sin tener en cuenta las afectaciones debido al  $O_3$  se utilizó la siguiente ecuación:

$$RYL = 1 - RY \quad (3)$$

La estimación de la pérdida relativa en el rendimiento de la producción del cultivo ( $CPL$ ) (4) se calculó de la siguiente forma:

$$CPL = \frac{RYL}{1 - RYL} * CP \quad (4)$$

Donde  $CP$  es el rendimiento del cultivo en la producción del mismo.

Para estimar la pérdida económica promedio ( $EL$ ) (5) debido a los daños provocados por el  $O_3$  se utilizó la siguiente ecuación:

$$EL = CPL * MSP \quad (5)$$

Donde *MSP* es el precio medio de la tonelada del cultivo en dólares y *CPL* está expresado en toneladas.

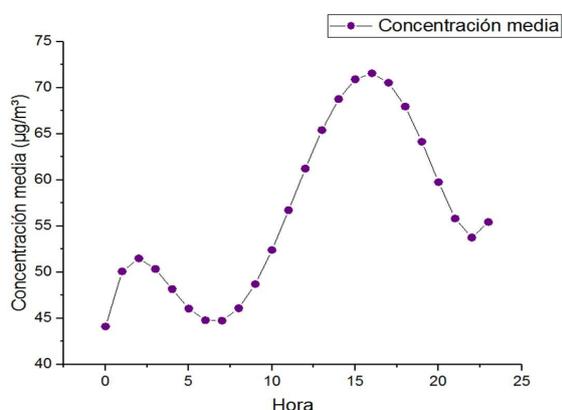
### Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software *OriginPro* (2016). Se asumió la no normalidad de los datos. Por tal motivo, se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney (Wayne, 1991) para analizar las diferencias de las concentraciones de O<sub>3</sub> entre el período lluvioso (mayo - octubre) y el poco lluvioso (noviembre-abril). El coeficiente de correlación de rangos de Spearman (Jolliffe & Stephenson, 2003), se aplicó para determinar la correlación entre los TSS y las concentraciones de O<sub>3</sub>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento diario de las concentraciones de O<sub>3</sub>

Se estimaron las concentraciones horarias promedio de O<sub>3</sub>. Se muestran en la [figura 2](#).



**Figura 2.** Comportamiento diario de las concentraciones de O<sub>3</sub> en San José de las Lajas (enero 2021-marzo 2022)

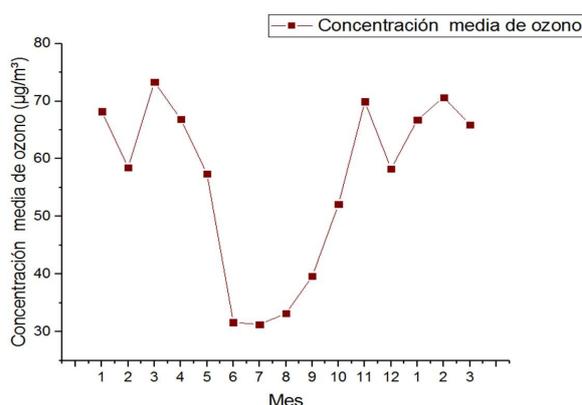
El comportamiento de las concentraciones de O<sub>3</sub> es semejante al obtenido por López *et al.* (2018) y Ramírez (1989), el cual evidencia la marcada relación entre las concentraciones de O<sub>3</sub> y la radiación solar. Se observaron valores mínimos a las 12:00 a.m. y también a las 7 a.m. y a partir de ese horario, las concentraciones comenzaron a aumentar. Esto se debe al incremento de la radiación solar, que es un factor determinante en la formación de O<sub>3</sub> troposférico a partir de los precursores NO<sub>x</sub> (NO y NO<sub>2</sub>) y COVs (Seinfeld & Pandis, 2006; Lou *et al.*, 2015).

El valor máximo estuvo como promedio cerca de las 4 p.m., momento a partir del cual las

concentraciones comenzaron a descender, siguiendo la declinación solar. Sin embargo, los valores máximos están desplazados una hora con respecto al promedio de las observaciones de las fuentes tomadas como referencia (López *et al.*, 2018; Ramírez, 1989). Esto puede deberse a la diferencia de los períodos de tiempo y localidades que se tuvieron en cuenta para cada estudio.

### Comportamiento estacional del O<sub>3</sub>

Se determinó la concentración media mensual de O<sub>3</sub> para todos los meses estudiados ([figura 3](#)).



**Figura 3.** Concentración media mensual de O<sub>3</sub> San José de las Lajas (enero 2021-marzo 2022)

Las concentraciones promedio más altas se presentaron durante el período de noviembre a abril. Estos meses coinciden con la etapa poco lluviosa del año en Cuba. Los valores medios mensuales más bajos se exhibieron en los meses desde mayo a octubre, meses que corresponden al período lluvioso. Este comportamiento estacional de las concentraciones de O<sub>3</sub> también ha sido obtenido por otros autores, en la Florida y en África (Ramírez, 1989) y en Cuba (López *et al.*, 2018). El comportamiento descrito del O<sub>3</sub> troposférico pudo ser resultado del aporte local de sus precursores y la permanencia de las masas de aire procedentes de Norteamérica que favorecen el incremento de O<sub>3</sub>; además por las condiciones de buen tiempo asociadas, con días secos y cielo despejado que provocan la destrucción acelerada de NO<sub>2</sub> (Ramírez, 1989; Collazo, 2011; López *et al.*, 2018).

La prueba no paramétrica U de Mann-Whitney sugirió que las muestras correspondientes al período poco lluvioso y lluvioso presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. Esto significa que las concentraciones de O<sub>3</sub> variaron en un período respecto al otro.

El valor máximo de concentración de ozono que se obtuvo fue de 125,55 µg/m<sup>3</sup>, el cual se presentó durante el mes de marzo de 2021.

Este período se caracterizó por la influencia de anticiclones continentales migratorios. Varios días durante los meses invernales se caracterizaron por concentraciones horarias superiores a los 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto puede deberse al predominio de las altas presiones continentales migratorias, que favorece el transporte transfronterizo (Collazo, 2011).

La figura 4 muestra la distribución de frecuencia de las concentraciones de  $\text{O}_3$  para las horas que se analizaron. Puede apreciarse que predominaron las bajas concentraciones, las cuales representan el 89% del total de horas analizadas.

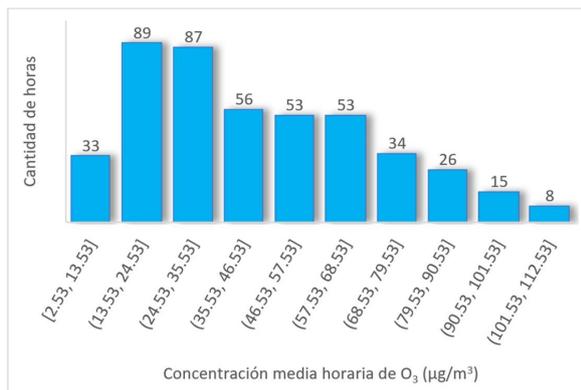


Figura 4. Frecuencia de las concentraciones de  $\text{O}_3$

Las concentraciones superiores a los 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  representan el 10% y las superiores a 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  representan el 8%. Las concentraciones mínimas, que son inferiores a 13.53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  representan el 7% de los datos del estudio.

Los meses que presentaron más horas con concentraciones de  $\text{O}_3$  que superaron la CMA para la vegetación fueron, en orden descendente, marzo, enero y noviembre de 2021. Durante estos meses se presentaron más de 245 horas en las cuales las concentraciones de  $\text{O}_3$  superaron los 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabla 2). Cabe resaltar que tanto el mes de enero como el de marzo se corresponden con el cultivo tardío de la papa (Martín, 2019). Se contabilizaron 1942 horas donde las concentraciones superaron los 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabla 2. Cantidad de horas en las que se superó la CMA

Mes	Horas concentraciones > 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ene-21	259
feb-21	120
mar-21	317
abr-21	220
may-21	92
jun-21	0
jul-21	3
ago-21	0
sep-21	39
oct-21	109
nov-21	249
dic-21	81
ene-22	248
feb-22	205
mar-22	0
Total	1942

### Análisis de los TSS

Se analizaron los mapas de EGT y se obtuvo el TSS para los días desde el primero de enero de 2021 hasta al 31 de marzo de 2022 (figura 5).

El TSS que con mayor frecuencia influyó en la mitad occidental del país durante el período que abarcó el estudio fue el TSS VIII, situación que se presentó durante 246 días. El TSS VIII se caracteriza por la presencia de altas típicas polares continentales de Norteamérica, asociadas a una masa de aire polar subsidente, que tienden por lo general, a desplazarse hacia el sudeste y luego al este, hacia el Atlántico (Lapinel, 1988).

Cuando las altas continentales migratorias irrumpen activamente hacia bajas latitudes, entonces Cuba puede quedar bajo la influencia de temperaturas bajas y vientos de región norte. En su progresivo avance, al internarse estos anticiclones en zonas marítimas, ya sea por el golfo de México o por la costa atlántica de los Estados Unidos, presentan un rápido proceso de transformación debido a la fuerte humectación, pudiendo tener lugar una fusión con el anticiclón del atlántico o bien un desplazamiento del mismo (Torres et al., 2020).

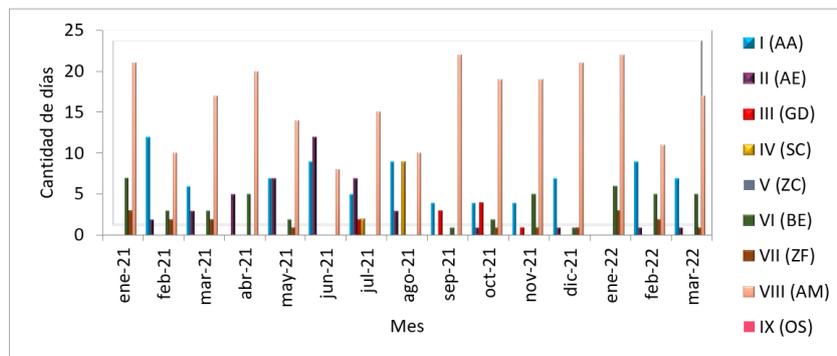


Figura 5. Comportamiento promedio de los TSS

El comportamiento anual de los TSS observado en 2021 fue atípico en comparación con el comportamiento climático que caracteriza a la mitad occidental de Cuba. Durante los meses correspondientes al período poco lluvioso, la mitad occidental del país es mayormente influenciada por anticiclones migratorios continentales (Torres *et al.*, 2020). Sin embargo, en 2021 esta situación predominó durante 10 meses del año. Esto provocó que durante los meses del período lluvioso no predominara la influencia del anticiclón del Atlántico, excepto en el mes de junio.

Se calculó el porcentaje que representó cada TSS del total de días de 2021 que se analizaron (figura 6a). Se realizó el mismo procedimiento para el primer trimestre del 2022 (figura 6b).

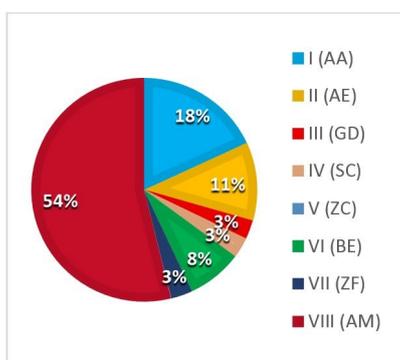


Figura 6a. Por ciento que representa cada TSS de los 364 días analizados en 2021

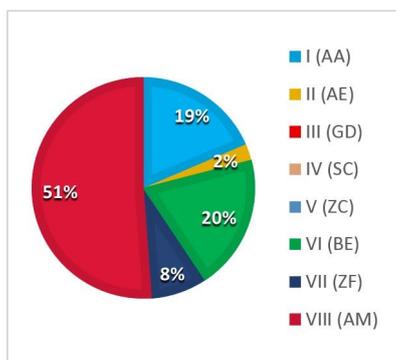


Figura 6b. Por ciento que representa cada TSS de los 90 días analizados en 2022

Las diferencias del comportamiento de los TSS en el 2021 con respecto al 2022 mostradas en la figura 6a y figura 6b están asociadas principalmente al período que abarcó el estudio. Los TSS V y IX no se presentaron en ninguno de los días estudiados.

El TSS V corresponde a la influencia de zonas de convergencia. Este TSS suele afectar la mitad occidental del país principalmente en los meses correspondientes al período lluvioso, pero con baja frecuencia. La ausencia de días con el TSS IX

pudo deberse a que los pocos casos de difícil comprensión fueron reexaminados y asignados a un subtipo específico (Torres *et al.*, 2020).

### Correlación entre los TSS y las concentraciones de O<sub>3</sub>

Los meses durante los cuales se presentaron mayores concentraciones horarias de O<sub>3</sub> se caracterizaron por la influencia de masas de aire continental, ya sea por la presencia de anticiclones migratorios continentales, bajas extratropicales o frentes fríos. Además, las mayores concentraciones de O<sub>3</sub> correspondieron a los meses del período poco lluvioso.

También se analizó la distribución de las concentraciones medias diarias (figura 7) de O<sub>3</sub> según el TSS. Las concentraciones medias diarias de O<sub>3</sub> más elevadas correspondieron al TSS VIII, seguida la VII y I. Las mayores dispersiones también se obtuvieron para el TSS VIII. Este resultado puede deberse a la prevalencia de dicho TSS durante el período estudio. El TSS al cual estuvieron asociados los valores más bajos de concentraciones de O<sub>3</sub>, así como las menores desviaciones fue el III.

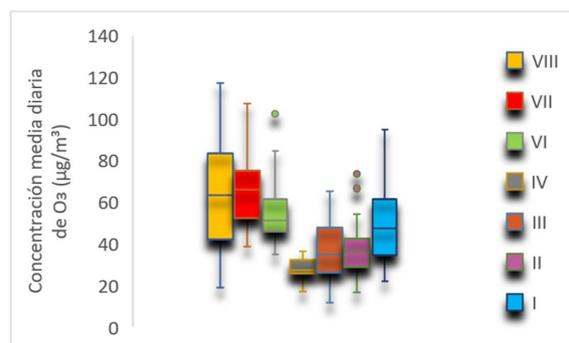
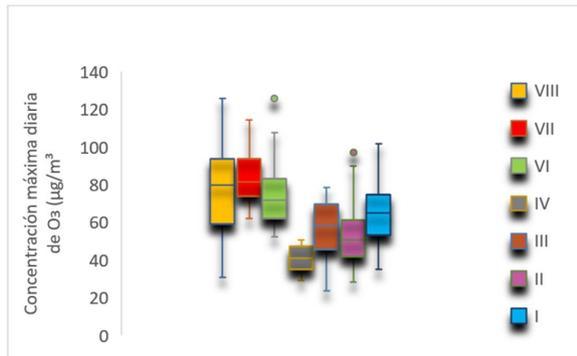


Figura 7. Comportamiento de las concentraciones medias diarias de O<sub>3</sub> según el TSS

Las concentraciones máximas diarias (figura 8) más altas correspondieron al TSS VIII, así como las mayores desviaciones. Este resultado puede deberse a la prevalencia de dicho TSS durante el período estudio. Al igual que en el caso de las concentraciones medias diarias, los valores mínimos correspondieron al débil gradiente bórico. Este TSS también presentó las menores desviaciones.

El valor de los coeficientes obtenidos sugiere una correlación (tabla 3) que va de baja a moderada entre las concentraciones de O<sub>3</sub> y los TSS. Los valores de los coeficientes obtenidos pueden ser explicados debido al corto período de tiempo que abarcó el estudio, lo que no permite que sea representativo del comportamiento de las condiciones climáticas en la mitad occidental del país. La prevalencia de la influencia anticiclónica continental durante casi todo

el período analizado es también una de las causas por las cuales no se pudo establecer una alta correlación entre las concentraciones de O<sub>3</sub> y los TSS.



**Figura 8.** Comportamiento de las concentraciones máximas de O<sub>3</sub> según el TSS

De forma general las concentraciones de O<sub>3</sub> aumentaron durante los días posteriores al paso de una zona frontal, lo cual se corresponde con lo planteado por Ramírez (1989), Collazo (2011) y López *et al.* (2018). El aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> se debe a la contaminación transfronteriza, evidenciada en el transporte de contaminantes procedente de Norteamérica por la masa de aire continental que sucede al paso de la zona frontal.

Durante el período de estudio Cuba fue afectada de forma directa por 17 frentes fríos. Se analizaron las concentraciones medias diarias, máximas y mínimas

de O<sub>3</sub> antes, durante y después del paso de los frentes fríos. De forma general las concentraciones de O<sub>3</sub> fueron inferiores días antes del paso del frente frío respecto a los días posteriores al paso del frente.

La figura 9 muestra la marcha diaria de O<sub>3</sub> correspondiente al 4 de marzo de 2021, día durante el cual una zona frontal afectó la mitad occidental del territorio cubano. Puede apreciarse el aumento de las concentraciones horarias de O<sub>3</sub> durante los días posteriores al paso del frente frío respecto a los días anteriores y al propio día del paso de este.

### Impacto del O<sub>3</sub> troposférico en la producción de papa

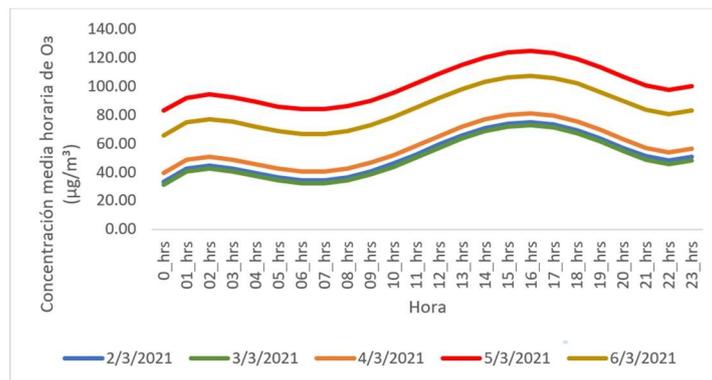
La tabla 4 muestra los resultados obtenidos para el análisis del impacto de la exposición al O<sub>3</sub> troposférico en el cultivo de la papa de enero a marzo en 2021 y 2022.

El valor de AOT40 obtenido para el primer trimestre de 2021 superó los 6000 µg/m<sup>3</sup>.h, que es el umbral a partir del cual las afectaciones en los cultivos pueden ser superiores al 5% (Sompriti *et al.*, 2022). Durante el período analizado de 2022 el valor del AOT40 no superó los 6000 µg/m<sup>3</sup>.h.

Los valores de AOT40 para el primer trimestre de 2021 y 2022 permitieron estimar una pérdida de rendimiento relativo del cultivo de 1.4 % y 1.3% respectivamente. Debe tenerse en cuenta que la papa es un cultivo moderadamente sensible al O<sub>3</sub> (Mills *et al.*, 2007). Además, las concentraciones medias de

**Tabla 3.** Coeficiente de correlación entre las concentraciones de O<sub>3</sub> y los TSS

Todos los datos	Período poco lluvioso	Período lluvioso	Concentraciones >80
0.40	0.43	0.33	0.36



**Figura 9.** Comportamiento de las concentraciones horarias de O<sub>3</sub> antes, durante y después del paso de un frente frío el 4 de marzo de 2021

**Tabla 4.** Cálculo del índice AOT40.

Año	2021	2022
AOT40(µg/m <sup>3</sup> .h)	6532.08	5736.19
Cantidad de horas con concentraciones superiores a 80µg/m <sup>3</sup>	586	554
RY	-0.36	-0.32
RYL	0.014	0.013

O<sub>3</sub> en Cuba son inferiores a las obtenidas por otros autores en otras latitudes (Mills *et al.*, 2007; Holloway *et al.*, 2012). Por tanto, las estimaciones de los daños obtenidos en este estudio son inferiores a las sugeridas por otros autores para el caso del cultivo de la papa (Mills *et al.*, 2007; Holloway *et al.*, 2012; Suganthy and Udayasoorian, 2020).

Se tuvieron en cuenta los datos de la cantidad de hectáreas sembradas de papa en San José de las Lajas, la cantidad de toneladas cosechadas, el rendimiento en toneladas por hectáreas (ton/ha.) del cultivo y el valor de la producción. A partir de estos valores se determinó la CPL y la EL para el primer trimestre de 2021 y 2022. Los resultados se muestran en la [tabla 5](#).

**Tabla 5.** Pérdidas económicas debido al O<sub>3</sub>

Año	2021	2022
<b>CPL(t.ha):</b>	0.17	0.17
<b>CPL(t):</b>	15.33	14.81
<b>Pérdida económica total (UDS):</b>	4138.96	3999.31

Las mayores pérdidas económicas estimadas correspondieron al primer trimestre del año 2021. Esto se debe a que en dicho periodo se superó la CMA para la vegetación durante mayor cantidad de horas que en el trimestre analizado de 2022.

### CONCLUSIONES

1. Los máximos diarios de O<sub>3</sub> en San José de las Lajas se presentan después del mediodía.
2. Los seis meses del año durante los cuales se presentan las mayores concentraciones de O<sub>3</sub> en San José de las Lajas corresponden al período poco lluvioso.
3. Los TSS asociados a las mayores concentraciones medias diarias de O<sub>3</sub> fueron la VIII, VII y VI. Durante los días posteriores al paso de un frente frío las concentraciones medias, máximas y mínimas diarias aumentaron respecto los días anteriores al paso del frente frío.
4. La estimación reducción del rendimiento relativo del cultivo de la papa debida a la exposición al O<sub>3</sub> no superó el 2%. Sin embargo, las pérdidas económicas provocadas por la disminución del rendimiento del cultivo de la papa en San José de las Lajas en el primer trimestre del año 2021 y el primer trimestre del 2022 fueron cercanas a los 4000 USD para ambos periodos de estudio.

### REFERENCIAS

Calderón, V. A. (2011). Evaluación de riesgos a la salud humana y vegetal debido a la presencia atmosférica de contaminantes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y elementos traza en la

cuenca del Aconcagua, Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile, 140p.

Collazo, A. (2011). Análisis de la contaminación transfronteriza y local de contaminantes gaseosos precursores de la depositación ácida húmeda y formación de ozono en Cuba. Tesis en opción al grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

Cuesta, O.; González, Y.; Sosa, C.; López, R.; Bolufé, J. & Reyes, R. (2019). La calidad del aire en La Habana. Actualidad. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 25, No. 3, ISSN: 2664-0880. <http://revista.insmet.cu/index.php/rm/article/view/488/0>

FMI. (2022). Instituto Meteorológico e Hidrológico de Finlandia. System Integrated for ModelIng of Atmospheric CoMposition (SILAM). <https://silam.fmi.fi>

Holloway, M.; Arnold, S. R.; Challinor, A. J. & Emberson, L. D. (2012). Intercontinental trans-boundary contributions to ozone-induced crop yield losses in the Northern Hemisphere. Biogeosciences, 9, 271–292, 2012. DOI: <http://doi.org/10.5194/bg-9-271-2012>.

Jolliffe, I. & Stephenson, D. (2003). Forecast Verification. A Practitioner’s Guide in Atmospheric Science. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. ISBN 0-471-49759-2.

Jiménez, L.; Lopez, M. & Gimenez, E. (2021). Worldwide Research on the Ozone Influence in Plants. Department of Biotechnology-Plant Biology, School of Agricultural, Food and Biosystems Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, España. DOI: <http://doi.org/10.3390/agronomy.11081504>

Lapinel, B. (1988). La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las lluvias en Cuba. Tesis de doctorado. Inst. Meteorología, La Habana. 147 p. (inédito).

López, R.; Bolufé, J.; Sosa, C.; García E.; Manso, R.; Cuesta, O & Iraola, C. (2018). Evaluación de riesgos para la salud y la vegetación por los contaminantes atmosféricos: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> en áreas de Cuba. Resultado P211LH007-019. Programa de Meteorología y Desarrollo Sostenible.

Lou, S.; Liao H.; Yang Y. & Mu, Q. (2015). Simulation of the interannual variations of tropospheric ozone over China: Roles of variations in meteorological parameters and anthropogenic emissions. Atmospheric Environment 122: 839-851.

Martín, A. (2019). Efecto del número de tallos en los índices de crecimiento y el rendimiento de la papa

- (*Solanum tuberosum* L.) cultivar Ultra. Trabajo de diploma. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Mills, G.; Buse, A.; Gimeno, B.; Bermejo, V.; Holland, M.; Emberson, L. & Pleijel, H. (2007). A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. *Atmospheric Environment* 41 (2007) 2630–2643. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.016>
- Oficina Nacional de Estadística e Información ONEI, (2021). Anuario estadístico de San José de las Lajas 2021. <https://www.onei.cu>.
- ONN, (2014). Norma Cubana NC 1020:2014 Calidad del aire - Contaminantes - Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. La Habana, Cuba.
- OMS, (2021). Directrices globales de calidad del aire de la OMS: material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Ramírez, J. (1989). Estudio de las variaciones en las concentraciones de ozono troposférico en Cuba y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos. Tesis de Doctorado en Ciencias Geográficas, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba, 100 p.
- Ramírez, J. (1992). Efectos nocivos que produce el ozono troposférico sobre el cultivo del tabaco. Editorial Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
- Sánchez, E. (2021). Acción por el clima y energías renovables en el marco de la agenda 2030. *Revista española de desarrollo y cooperación*, Vol. 48, pp7-9. ISSN: 1137-8875. Madrid, España.
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. (2006). *Wet deposition in Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change*. Editorial John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey. Segunda edición, 932-979p.
- Sompriti, D.; Shahana, B.; Gufran, B. & Bandarusatya, M. (2022). Impact assessment of surface ozone exposure on crop yields at three tropical stations over India. *Indian Institute of Tropical Meteorology (IITM)*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1775269/v2>.
- Suganthy, V.S. & Udayasoorian, C. (2020). Ambient and elevated ozone (O<sub>3</sub>) impactson potato genotypes (*solanum tuberosum*.l) over a high altitude western Ghats location in southern india. Department of Agriculture, Karunya Institute of Technology and Sciences, Coimbatore, Tamil Nadu, India. *Plant Archives* Vol. 20, Supplement 2, 2020 pp. 1367-1373, ISSN:2581-6063 (online), [http://www.plantarchives.org/SPL%20ISSUE%2020-2/219\\_1367-1373\\_.pdf](http://www.plantarchives.org/SPL%20ISSUE%2020-2/219_1367-1373_.pdf)
- Torres, E.; Lecha, L.; Sánchez, L. & Verdecia, Y. 2020. Catálogo de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre Cuba. DOI: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.12542.20802>
- Wayne, D. (1991). Estadísticas no paramétricas y de libre distribución. En, *Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud*. (pp.503 – 557). México, D.F.: Ed. Simusa.

Lic. Rachel Martínez Rodríguez. Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), La Habana, Cuba.

E-mail: [victoria20plus@gmail.com](mailto:victoria20plus@gmail.com)

MSc. Arnaldo Evaristo Collazo Aranda. Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), La Habana, Cuba.

-mail: [acollazo40@gmail.com](mailto:acollazo40@gmail.com)

Dra. Rosemary López Lee. Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), La Habana, Cuba.

E-mail: [rosemary.lopez@insmet.cu](mailto:rosemary.lopez@insmet.cu)