

Impacto de material particulado PM_{2.5} en la calidad del aire por la quema de *Saccharum officinarum* en Laredo, Trujillo-Perú

Impact of PM_{2.5} Particulate Matter on Air Quality Due to the Burning of *Saccharum officinarum* in Laredo, Trujillo-Peru

Gian Marco Castillo Avila¹ ; Ana Marlene Guerrero Padilla² 

¹ Programa de Maestría en ciencias. Mención gestión ambiental, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n- Ciudad Universitaria, Trujillo Perú.

² Escuela de Posgrado de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n- Ciudad Universitaria, Trujillo Perú.

*Autor correspondiente: gcastilloa@unitru.edu.pe (G. Castillo)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2025.01.10](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2025.01.10)

RESUMEN

Este estudio analiza el impacto del material particulado PM_{2.5} generado por la quema de hectáreas de *Saccharum officinarum* en Laredo entre 2017 y 2022. Para obtener datos meteorológicos, se empleó el modelo WRF con una resolución de 1 km, abarcando Trujillo y el Océano Pacífico. Los resultados del WRF fueron validados mediante comparación con datos observados, mostrando alta correlación y capacidad predictiva. La dispersión de PM_{2.5} se simuló utilizando el modelo Calpuff de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), validado con datos de quemas controladas y varios escenarios de quema. Los análisis mostraron concentraciones máximas de PM_{2.5} en áreas cercanas a las fuentes de emisión, superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Esto ocurrió especialmente entre junio y noviembre, debido a vientos del sur-sureste y condiciones de inversión de subsidencia. En 2021, los días críticos presentaron vientos en calma. En términos de emisiones, la quema de 3 hectáreas generó un índice de calidad de aire moderado en el 60,47% de los receptores. En contraste, la quema de 6 y 9 hectáreas alcanzó el umbral de cuidado, afectando al 32,56% y al 43,41% de los receptores, respectivamente.

Palabras clave: Quema de caña de azúcar; Material particulado PM_{2.5}; caña de azúcar; Modelamiento; WRF; Calpuff.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of PM_{2.5} particulate matter generated by the burning of *Saccharum officinarum* hectares in Laredo between 2017 and 2022. Meteorological data were obtained using the WRF model with a 1 km resolution, covering Trujillo and the Pacific Ocean. The WRF results were validated through comparison with observed data, showing high correlation and predictive capability. The dispersion of PM_{2.5} was simulated using the Calpuff model from the Environmental Protection Agency (EPA), validated with data from controlled burns and various burning scenarios. The analyses showed maximum PM_{2.5} concentrations in areas near emission sources, exceeding Environmental Quality Standards (EQS). This was particularly evident between June and November due to south-southeast winds and subsidence inversion conditions. In 2021, critical days exhibited calm wind conditions. Regarding emissions, the burning of 3 hectares generated a moderate air quality index for 60.47% of the receptors. In contrast, the burning of 6 and 9 hectares reached the caution threshold, affecting 32.56% and 43.41% of the receptors, respectively.

Keywords: Sugarcane burning; PM_{2.5} particulate matter; sugarcane; WRF; modeling; Calpuff.

1. INTRODUCCIÓN

La quema controlada de los campos de caña de azúcar constituye una práctica ampliamente utilizada, ya que contribuye a la eliminación del material foliar antes de la cosecha, reduce la carga de biomasa transportada a las plantas procesadoras y mejora la eficiencia en el proceso de extracción de sacarosa (Holmes & Nowell, 2023). Actualmente, este cultivo se encuentra en más de 105 países y representa más del 85 % de la producción mundial de azúcar. Además, es considerado uno de los cultivos más importante a nivel mundial (FAO, 2023).



A inicios del siglo XXI, la producción de caña a nivel mundial ha experimentado un aumento del 44%, alcanzando una cifra de 1900 Gt, con una extensión cosechada de 29 millones de hectáreas. América lidera la producción con un 50,7%, seguida de Asia con un 40,9%, mientras que África y Oceanía contribuyen con un 5,9% y 2,5% respectivamente. Entre los principales productores se encuentran en Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán México, Colombia, Australia, Indonesia y Estados Unidos (Luo et al., 2022).

En el Perú, la producción de *Saccharum officinarum* se remonta al siglo XVI y ha experimentado fluctuaciones a lo largo de su historia. Entre 2000 y 2004, mostró un crecimiento sostenido, interrumpido posteriormente por fenómenos climáticos como El Niño en 2015. Actualmente, esta actividad ocupa alrededor de 160 mil hectáreas distribuidas en las regiones de Piura, Lambayeque, La Libertad, Áncash, Lima y Arequipa (Segura, 2023).

Durante los años 2018, 2019, 2020 y 2021, la empresa Agroindustria Laredo cosechó 6,537, 6,329, 6,388 y 6,628 hectáreas propias, respectivamente. En ese mismo periodo, también procesó 6,165, 5,837, 5,837 y 5,723 hectáreas provenientes de sembradores externos (Agroindustria Laredo, 2021). La quema de una parte significativa de estas hectáreas constituye una práctica habitual para facilitar la cosecha, lo que genera importantes emisiones de contaminantes atmosféricos.

A nivel internacional, se ha reportado que, en una zona del estado de Florida, la quema de caña de azúcar produce aproximadamente 5,100 toneladas métricas anuales de material particulado ($PM_{2.5}$) (Adegboye, 2022). En el contexto peruano, se estima que la quema de una hectárea de caña de azúcar en la Agroindustria Laredo puede liberar alrededor de 1.836 toneladas de $PM_{2.5}$ a la atmósfera.

El material particulado con diámetro inferior a 2,5 micras, se genera por combustión de materia orgánica y transformación gaseosa en la atmósfera (Alfaro, 2020). Diversos estudios vinculan la exposición al material particulado derivado de combustión de *Saccharum officinarum* con un incremento de $10 \mu g/m^3$ en el promedio móvil de 5 días (lag1–5) de las concentraciones de TSP se relacionó con un aumento del 11,6 % en las admisiones hospitalarias particularmente en niños y ancianos por asma (intervalo de confianza del 95 %: 5,4 % a 17,7 %) (Arbex et al., 2007). Estudios recientes sugieren que este impacto podría provocar hasta 2,5 muertes anuales, lo que equivale a una tasa de mortalidad de 0,4 muertes por cada 100,000 personas al año (Holmes & Nowell, 2023; Adegboye, 2022). Estos hallazgos sugieren la urgencia de adoptar medidas para mitigar efectos adversos en la salud y entorno ambiental.

La regulación de la quema de *Saccharum officinarum* en Perú está contemplada en la Ley 31949, que establece disposiciones para controlar esta práctica y fomentar la adopción de métodos de cosecha más sostenibles. Para obtener la certificación ambiental de las actividades agrícolas que emplean la quema de caña de azúcar, es necesario elaborar un documento técnico que modele la dispersión de contaminantes atmosféricos (Guevara et al., 2021).

Para llevar a cabo el modelamiento, se requiere información meteorológica modelada, la cual se obtiene mediante el uso de Weather Research and Forecasting (WRF), un modelo numérico empleado en la investigación atmosférica a mesoescala y en el pronóstico meteorológico (Cipagauta et al., 2014). El modelo de dispersión atmosférica empleado es CALPUFF, desarrollado por Sigma Research Corporation (Earth Tech, Inc., EE. UU.) y financiado por el California Air Resources Board (CARB), siguiendo la base técnica de (Scire et al., 2000). WRF ha sido estudiado ampliamente para determinar la sensibilidad e influencia de parametrizaciones, destacándose que las configuraciones de dominio, las resoluciones de la malla y los módulos utilizados juegan un papel fundamental en su rendimiento y en la precisión de los resultados obtenidos (Mamunar Rashid et al., 2022). Los modelos de parametrización empleados en el estudio incluyen Single (WSM-3) (Zaidi & Gisen, 2018), RRTMG Shortwave scheme y RRTMG longwave scheme (Iacono et al., 2008), Unified Noah Land Surface (Campbell, 2018), Universidad Yonsei (YSU) (Hong et al., 2006) y Simplified Arakawa-Schubert (SAS) (Pan & Wu, 1995).

El modelado de dispersión simula la distribución espacio-temporal de los contaminantes en la atmósfera, considerando factores como las concentraciones, las reacciones químicas y los efectos meteorológicos y del terreno (Johnson, 2022). A nivel global, se destacan modelos ampliamente utilizados como el Industrial Source Complex 3 (ISC3), el Atmospheric Dispersion Modeling System (ADMS), el modelo regulatorio AMS/EPA (Aermod) y Calpuff (Guo et al., 2020). Dada la complejidad topográfica, los diversos usos del suelo y la proximidad al mar del casco urbano de Laredo, así como de otros receptores en el dominio del modelado, se ha decidido utilizar el modelo Calpuff. Este modelo es capaz de simular la dispersión de partículas y gases bajo meteorología variable en el espacio y el tiempo (Holmes & Nowell, 2023). Además, se ha demostrado especialmente eficaz para modelar contaminantes a largo alcance, más allá de los 50 km, y en condiciones meteorológicas y topográficas complejas, incluyendo la deposición de partículas tanto en condiciones secas como húmedas (Scire et al., 2000). Calpuff, junto con CalMet, es aplicable tanto en entornos regionales como urbanos (Holnicki et al.,

2016).

Esta investigación busca determinar la influencia del material particulado $PM_{2.5}$ en la calidad del aire debido a la quema de *Saccharum officinarum* en Laredo, Trujillo, Perú, durante el periodo 2017-2022. Se espera que el material particulado $PM_{2.5}$ emitido por la quema de *Saccharum officinarum* alcance umbral de cuidado en la calidad del aire.

2. METODOLOGÍA

2.1 Meteorología

El modelo meteorológico utilizado Weather Research and Forecasting (WRF), herramienta numérica de predicción y simulación atmosférica que combina esquemas avanzados de parametrización para representar procesos físicos clave, como la microfísica, radiación, capa límite planetaria, superficie terrestre, y convección atmosférica, proporcionando resultados precisos y detallados (Cipagauta et al., 2014).

Para este trabajo, se realizó un modelado meteorológico utilizando el WRF durante el período del 1 de enero de 2017 al 31 de diciembre de 2022. Se configuraron los parámetros del modelo empleando las siguientes parametrizaciones:

- Microfísica: WRF Single-Moment 3-class (WSM-3) para simular la formación de nubes y precipitación (Zaidi, & Gisen, 2018).
- Radiación de onda corta y larga: Esquema RRTMG para representar la interacción radiativa en la atmósfera (Iacono et al., 2008).
- Superficie terrestre: Noah Land Surface Model para simular la transferencia de calor y humedad entre el suelo y la atmósfera (Campbell, 2018).
- Capa límite planetaria: Esquema YSU para la representación de turbulencias (Hong et al., 2006).
- Convección: Esquema Simplified Arakawa-Schubert para la simulación de nubes cumuliformes (Pan & Wu, 1995).

El modelo incorporó datos geográficos de alta resolución, incluyendo:

- Un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 30 m, proveniente de la misión SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission).
- Datos de uso y cobertura de suelo derivados de las imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2 con resolución de 10 m, en formato GeoTIFF.

Se validaron los resultados obtenidos del modelo WRF mediante comparaciones estadísticas con datos observados de la estación meteorológica de Trujillo (Latitud $8^{\circ}6'43.29''S$; Longitud $78^{\circ}59'6.36''W$; Altitud 44 m.s.n.m.). Los métodos de validación incluyeron estadísticas descriptivas, como el error medio (Bias), error cuadrático medio (MSE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y coeficientes de correlación (r) (Wilks, 2007).

El volumen de datos utilizados incluyó registros horarios de temperatura, precipitación, velocidad del viento y humedad, recopilados durante el período mencionado. Esta información permitió ajustar y validar las parametrizaciones del modelo para garantizar la precisión de las simulaciones.

2.2 Modelo de dispersión

La estimación de emisiones se realizó mediante la aplicación de la ecuación $E=A \times B \times C_E \times E_i$ (1) Donde A es área quemada (m^2), B es la Biomasa por Área (kg/m^2), C_E es la eficiencia de combustión y E_i Factor de emisión (g/kg). recomendada por la U.S. Environmental Protection Agency. Esta ecuación, permite determinar la emisión en $g/s \times m^2$, obtenidas las emisiones mediante el modelo calpuff, se aplica la ecuación $CFI = CM + CF$ (2) para obtener la concentración final en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$), donde CM representa la Concentración Modelada de los receptores en $\mu g/m^3$, y CF corresponde a la concentración de Fondo, también en $\mu g/m^3$. Los niveles de fondo se determinaron con información de monitoreos trimestrales (OEFA, 2023), y datos extraídos de la tesis de (Villalobos, 2017).

El modelo se validó mediante comparación entre las concentraciones modeladas y datos recopilados durante el monitoreo llevado a cabo por (Villalobos, 2017). Para este fin, se emplearon métodos estadísticos reco-

mendados por (Wilks., 2007), que incluyen: BIAS (Me) error medio, Error medio cuadrático (MSE), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), Coeficiente de correlación (r), Coeficiente de determinación.

Escenarios de modelamiento

Son aplicados según D.S. N° 003-2017-MINAM que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), los cuales especifican los parámetros para el material particulado PM_{2.5}, medido como el promedio de 24 horas, y los valores de la primera concentración máxima en cada año del período de modelado.

Para investigar los efectos del material particulado PM_{2.5} por la quema de *Saccharum officinarum*, se modelaron áreas de 3, 6 y 9 hectáreas dentro de un total de 557,4 hectáreas, excluyendo aquellas cercanas a zonas urbanas y ejes de vías (OEFA, 2018). Estas áreas se dividieron en cinco cuadrantes, donde se realizaron tres modelados cada uno, representando la quema durante el periodo de 2017 a 2022. Cada año del estudio consistió en 15 ejecuciones del modelo, distribuidas uniformemente en los cuadrantes respectivos:

Cuadrantes respectivos:

- Cuadrante 1: 3-A, 6-B, 9-C
- Cuadrante 2: 3-D, 6-E, 9-F
- Cuadrante 3: 3-G, 6-H, 9-I
- Cuadrante 4: 3-J, 6-K, 9-L
- Cuadrante 5: 3-M, 6-N, 9-Ñ

2.3 Índice de calidad de aire - INCA

El INCA señala el nivel de limpieza o contaminación en la atmósfera y los potenciales impactos en la salud. El índice de calidad de aire se determina a partir de las concentraciones de PM_{2.5} y según la metodología propuesta en RM N° 181-2017-MINAM, Índice de calidad de aire - INCA, el cual se calcula según ecuación $INCA_{(PM_{2.5})} = [PM_{2.5}] \times 100 / 25$, donde $INCA_{(PM_{2.5})}$ es Índice de calidad del aire PM_{2.5}, PM_{2.5} es la concentración en µg/m³. Un valor de 0-50 representa un valor de característica buena, de 51 – 100 es moderada, de 101 a 500 es mala y mayor a 500 es muy mala o umbral de cuidado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelamiento de meteorología

El dominio de modelamiento para la generación de campos meteorológicos fue de 50km x 50km. En el modelo utiliza una resolución espacial de 1km y 193x163 puntos de grilla, abarcando toda la provincia de Trujillo y zona nerítica del océano pacifico, como se muestra en la figura 1.

Las parametrizaciones empleadas en el modelo WRF se muestran en la tabla 1, resultados que proporcionaron campos meteorológicos como presión atmosférica (hPa), la fracción de cobertura de nubes, y perfiles meteorológicos verticales en el centro del dominio de estudio. Las configuraciones de WRF se emplearon con una resolución de 1 un kilómetro y 40 niveles verticales.

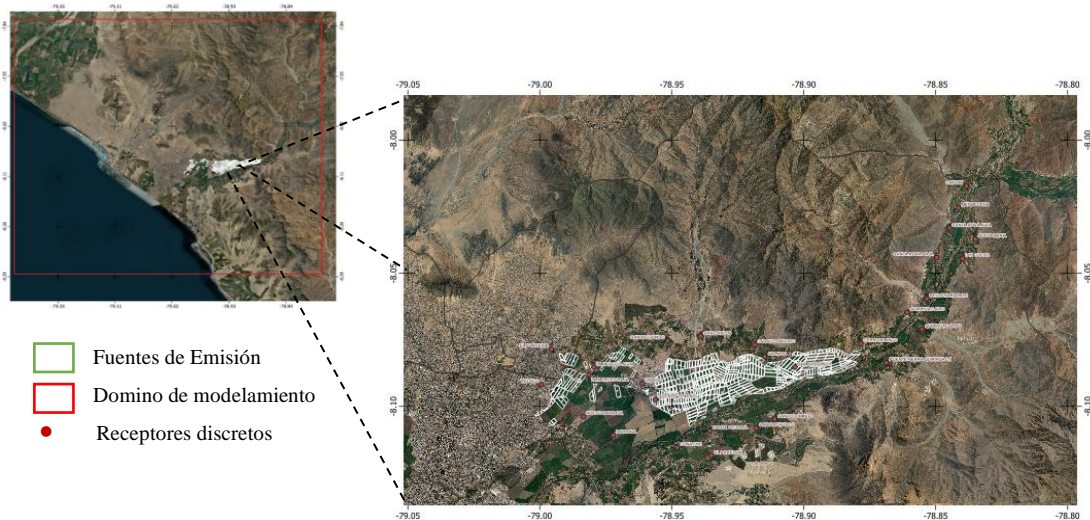


Figura 1. Dominio de modelamiento

Dado que la actividad ocurre principalmente en áreas de suelo agrícola y además ciertos receptores se encuentran ubicado en una zona urbana y caminos sin pavimentar se consideró longitud de la rugosidad de la superficie de 0,10 a 0,5 m.

Tabla 1. Parametrizaciones para modelamiento meteorológico

Esquema	Parametrización
Microphysics	Wrf single momento 3-class scheme =3
Long – Wave radiation	RRTMG Longwave Scheme _ ra_lw_physics = 4
Short-wave radiation	RRTMG Shortwave scheme ra_sw_physics = 4
Land Surface	Unifield Noah Nand Surface model sf _ Surface _ Physics = 2
Planetary boundary Layer	Yonsei University (YSU) Scheme pbl_Physics = 1
Scale-Aware Simplified Arakawa-Schubert (SAS)	Arakawa-Schubert (SAS) cu_physics = 5,

El procesador de diagnóstico Calmet generó datos de viento y temperatura con una resolución espacial de 900 m, los cuales fueron validados utilizando registros de la estación meteorológica de Trujillo. Los resultados mostraron una variabilidad diaria de temperatura entre 10 °C y 32 °C, con mínimos registrados alrededor de las 4:00 a.m. y máximos alcanzados entre la 1:00 p.m. y las 3:00 p.m. El año 2022 fue el más frío del período estudiado, influenciado por el fenómeno de La Niña, mientras que 2017 destacó como el más cálido debido a la presencia de El Niño.

Las precipitaciones alcanzaron su máximo a finales de 2022, con la mayoría por debajo de 10 mm en los 6 años. La humedad osciló entre 50 y 85%, siendo marzo el mes más seco y julio el más húmedo. La velocidad del viento mostró picos entre las 2:00 p.m. y las 4:00 p.m., siendo máxima en 2017. La predominancia del viento fue Sur durante el día y Sur-Suroeste por la noche, con variaciones estacionales.

Durante el período de estudio de 2017 a 2022, se llevaron a cabo validaciones entre los datos meteorológicos estimados y observados, cuyos resultados se ajustaron a los rangos estadísticos sugeridos por (Hanna & Chang, 2012). Según estos criterios, es fundamental que, para las concentraciones máximas de arco, el sesgo fraccional sea menor a 0.6, y tanto el coeficiente de determinación como el de correlación sean mayores de 0.6. En lo que respecta a velocidad del viento, muestra una excelente correlación de 0.93. Por otro lado, los valores positivos de sesgo (BIAS) sugiere una tendencia a la sobreestimación, un hallazgo que concuerda (Madala et al., 2015), quienes encontraron que todos los esquemas utilizando WRF tienden a sobreestimar la velocidad media del viento. Este fenómeno puede estar relacionado con las limitaciones para simular la rugosidad de la superficie y la turbulencia inducida en los niveles inferiores de la atmósfera (Avolio et al., 2017).

3.2. Modelamiento de dispersión de PM_{2,5}

En el modelamiento se emplean dos mallas de receptores: una cerca de las fuentes a menos de 1 km con un espaciado de 250 m y otra para distancias mayores a 3 km con receptores cada 1 km. Se empleó un factor de emisión de 0,88 g/kg (AP 42, 1995), con la velocidad de quema de 1 hora/hectárea y datos de biomasa/área quemada obtenidos de la tesis de Villalobos (2017). Los niveles de fondo se calcularon con información de (OEFA, 2023) y (Villalobos, 2017).

El modelamiento preliminar permitió identificar receptores discretos clave, incluyendo: La Huaca del Sol, El Porvenir, Trujillo, Hospital Lazarte, Hospital El Esfuerzo, Hospital de Laredo, Terrapuerto, Plaza de Armas de Laredo, Nuevo Laredo, San Carlos, IE Galindo 80835, Caballo Muerto, Plaza de Armas Bello Horizonte, Cerro Blanco, Quirihuac, Ciudad de Dios, Cerro La Cruz, Peaje Menocucho, Simbal, Paranday, Shiran, Santo Domingo, San Puchosco, Santa Victoria, Conache, Barraza y Sauces Barraza.

La validación del modelo se realizó comparando las emisiones estimadas con datos de monitoreo en 6 parcelas quemadas, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9280, un sesgo de 2,2940, RMSE de 3,2340 y MSE de 10,459. Estos resultados reflejan un error promedio bajo, influenciado posiblemente por factores como topografía y meteorología vertical y de superficie. Estudios previos (Amin ul et al., 2021) han destacado la influencia de estas variables en la precisión del modelo.

Aunque el modelo Calpuff demostró habilidades para simular la dispersión en terrenos complejos, se observaron discrepancias en las predicciones máximas, lo que podría atribuirse a factores como la concordancia temporal en concentraciones a corto plazo y la precisión en la meteorología de vientos bajos (Holnicki et al., 2016). Se evaluaron diferentes escenarios de quema, siendo el más crítico aquel que considera la quema de todas las parcelas (1473,5 hectáreas), con concentraciones de PM_{2,5} proyectadas de hasta 8000 µg/m³. En un escenario más

controlado, donde se limitó la quema a 557,4 hectáreas distantes de zonas urbanas, las concentraciones se estimaron en alrededor de 2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para evaluar la influencia de la quema en parcelas más pequeñas, se realizó un modelado estratificado considerando la quema de 3, 6 y 9 hectáreas en cada uno de los 5 cuadrantes, con un total de 15 evaluaciones anuales durante el período 2017-2022. Las concentraciones más altas se registraron en los cuadrantes 1 y 2, superando el ECA de aire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en varios casos.

Se observó que las concentraciones de material particulado en los años analizados presentaron variaciones significativas, superando en varios casos el ECA de aire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la figura 2, durante el 2017, en el cuadrante 1, la quema de 9 hectáreas generó concentraciones máximas de hasta 160,0924 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en receptores como Caballo Muerto y IE. Galindo 80835. Para el año 2018, estas concentraciones incrementaron, alcanzando valores de 231,10524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Caballo Muerto, IE. Galindo 80835 y otros receptores del cuadrante 2.

Durante 2019, las concentraciones máximas en el cuadrante 1 fluctuaron entre 50,862 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la quema de 3 hectáreas y 193,266427 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la quema de 9 hectáreas. Este patrón se mantuvo en 2020, con concentraciones máximas de hasta 263,781 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el cuadrante 2 debido a la quema de 9 hectáreas. El año 2021 fue particularmente crítico, ya que en el cuadrante 2 se registraron valores máximos de 314,788 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, destacándose como el periodo más desfavorable en términos de contaminación atmosférica.



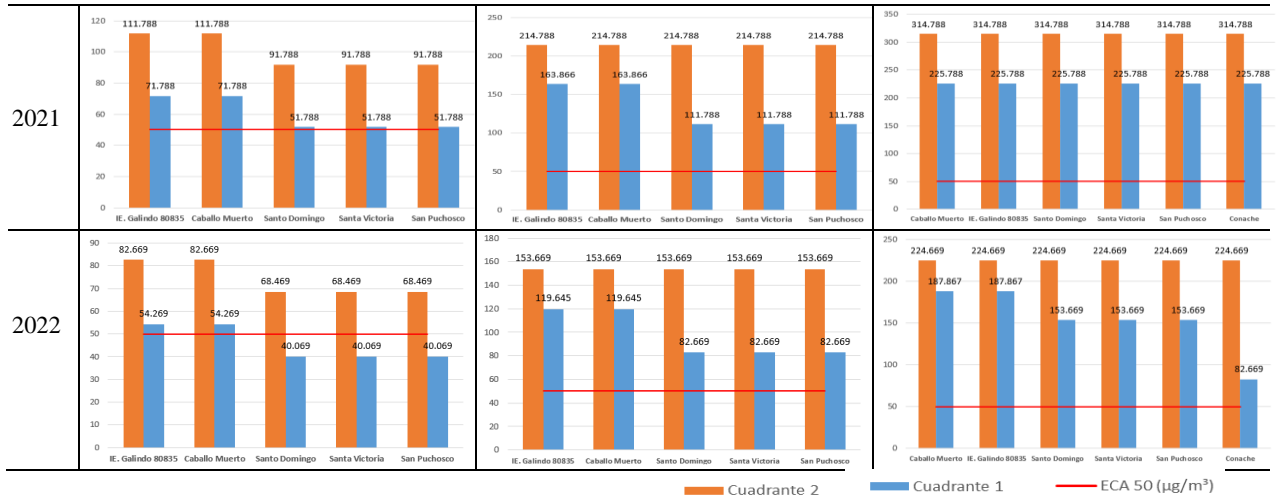


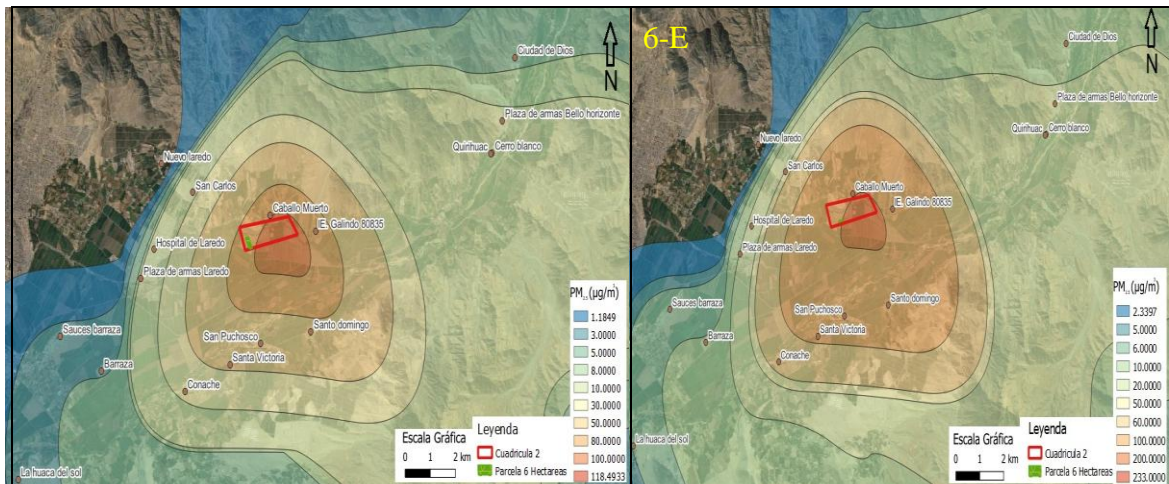
Figura 2. Valores obtenidos en µg/m³ de PM_{2.5} por la quema de 3, 6 y 9 hectáreas de cuadrante 1 y 2 durante el periodo de 2017 a 2022.

En 2022, las concentraciones máximas en el cuadrante 1 oscilaron entre 54,269 µg/m³ y 187,867 µg/m³ dependiendo de la cantidad de hectáreas quemadas, mientras que en el cuadrante 2 se registraron valores de hasta 224,669 µg/m³. Estos resultados reflejan un impacto continuo sobre la calidad del aire debido a las actividades de quema en parcelas.

Los escenarios de mayor contaminación de PM_{2.5} atribuible a quema de *Saccharum officinarum* en Laredo se estiman entre los meses de junio a noviembre, que corresponden al periodo frío. Durante este lapso, prevalecen los vientos de sur-suroeste, propiciando el afloramiento de aguas frías a lo largo de la costa. Esta condición, combinada con la inversión de subsidencia del anticiclón subtropical, da lugar a una densa nubosidad (Silva et al., 2018). Contrariamente, el debilitamiento del anticiclón entre diciembre y mayo se traduce en días más despejados.

Los resultados de dispersión de PM_{2.5} para el periodo de modelamiento 2017-2022 indican que los días de máxima concentración se registraron entre mayo y diciembre. En el año 2021, que mostró los escenarios más críticos de contaminación, se determinó que los días de mayor impacto coincidieron con condiciones de viento en calma, con velocidades entre 0,0157 y 0,946 m/s. Las concentraciones más elevadas se observaron en varios puntos receptores, entre ellos la IE. Galindo 80835, Caballo Muerto, Santo Domingo, San Puchosco, Santa Victoria y Conache.

En el cuadrante 2, los resultados indican que, para la quema de 3 hectáreas, las concentraciones máximas de PM_{2.5} varían entre 111,788 µg/m³ en los receptores IE. Galindo 80835 y Caballo Muerto, y 91,788 µg/m³ en Santo Domingo, Santa Victoria y San Puchosco. Para la quema de 6 hectáreas, las concentraciones máximas alcanzan 214,788 µg/m³ en los receptores IE. Galindo 80835, Caballo Muerto, Santo Domingo, Santa Victoria y San Puchosco. En el caso de la quema de 9 hectáreas, se observan concentraciones máximas de hasta 314,788 µg/m³ en los receptores IE. Galindo 80835, Caballo Muerto, Santo Domingo, San Puchosco, Conache y Santa Victoria.



9-F

9-F

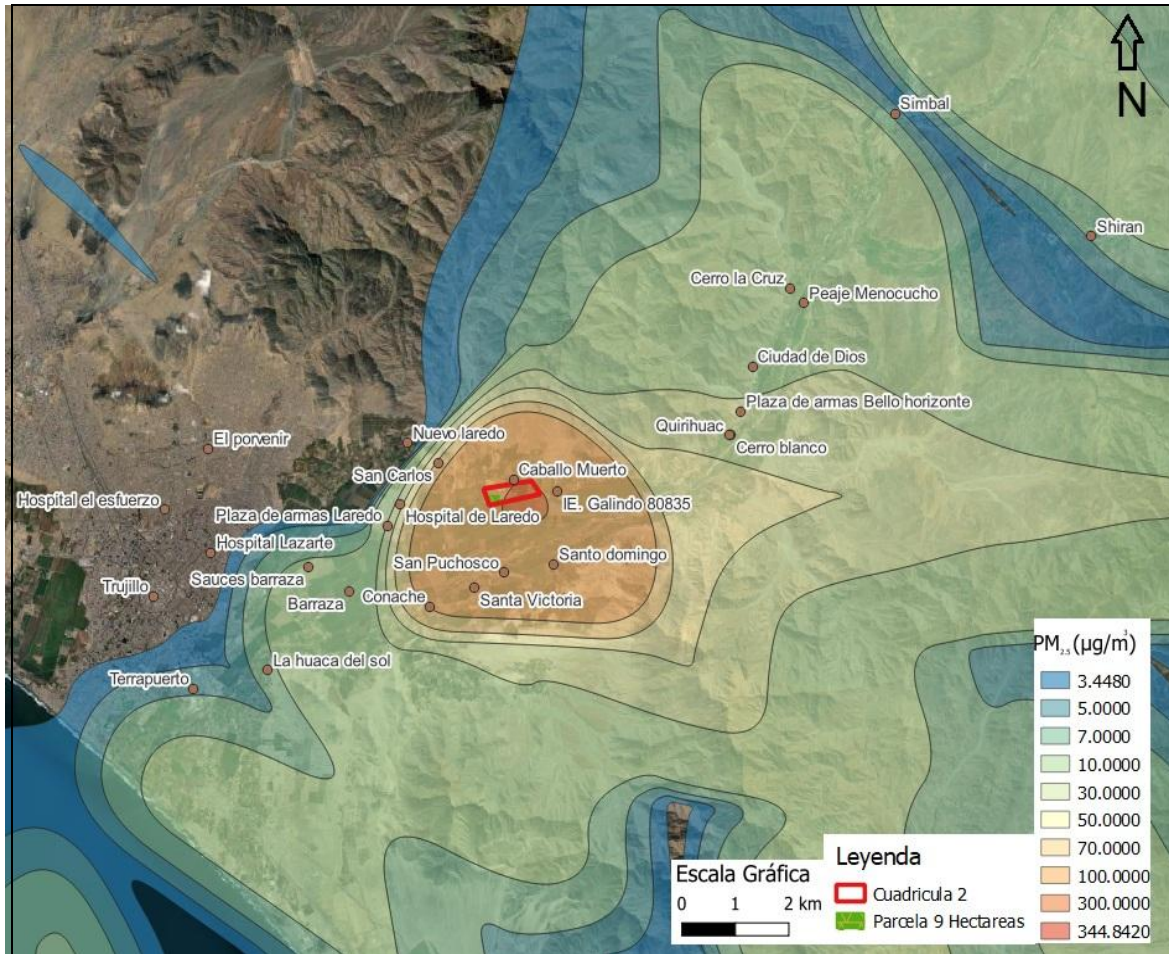


Figura 3. Dispersión de $PM_{2.5}$ por quema de parcelas estratificadas de 3, 6 y 9 hectáreas, cuadrante 2 durante el año 2021.

La figura 3 muestra las plumas de dispersión del material particulado $PM_{2.5}$, indicando que varios receptores son afectados por las emisiones estimadas durante todo el período de modelado. Las concentraciones máximas se registraron en el año 2021 para varios receptores. Se encontró una clara asociación entre la topografía del terreno y las concentraciones de $PM_{2.5}$, con las áreas cercanas a cerros mostrando concentraciones significativamente más altas que las zonas planas.

3.3 Determinación del Índice de Calidad del Aire (INCA)

El cálculo del INCA se realizó para diferentes escenarios de quema de *Saccharum officinarum* en hectáreas durante el periodo comprendido entre 2017, al 2022. Los resultados mostraron que, en general, hubo variaciones en la calidad del aire dependiendo del tamaño del área quemada y del año.

En el año 2017, para un escenario de quema de 3 hectáreas, el 17,829% de los receptores tuvieron un índice de calidad de aire Bueno, el 58,364% Moderado y el 23,807% Mala. Para un escenario de quema de 6 hectáreas, hubo un 8,527% de receptores con calidad de aire bueno, el 44,186% con calidad Moderada, el 43,411% con calidad Mala y el 3,876% en el Umbral de Cuidado. En el caso de un escenario de quema de 9 hectáreas, el 7,752% de los receptores alcanzaron calidad de aire Buena, el 31,783% Moderada, el 51,938% Mala y el 8,527% se situó en el Umbral de Cuidado.

Para los años 2018, 2019, 2020 y 2022, se observaron tendencias similares de INCA para diferentes escenarios de quema de hectáreas de *Saccharum officinarum*, con variaciones en la proporción de receptores con calidad de aire Bueno, Moderado, Mala y en el Umbral de Cuidado. Sin embargo, destaca que durante el año 2021 se presentaron los escenarios con peor índice de calidad del aire en comparación con los años anteriores.

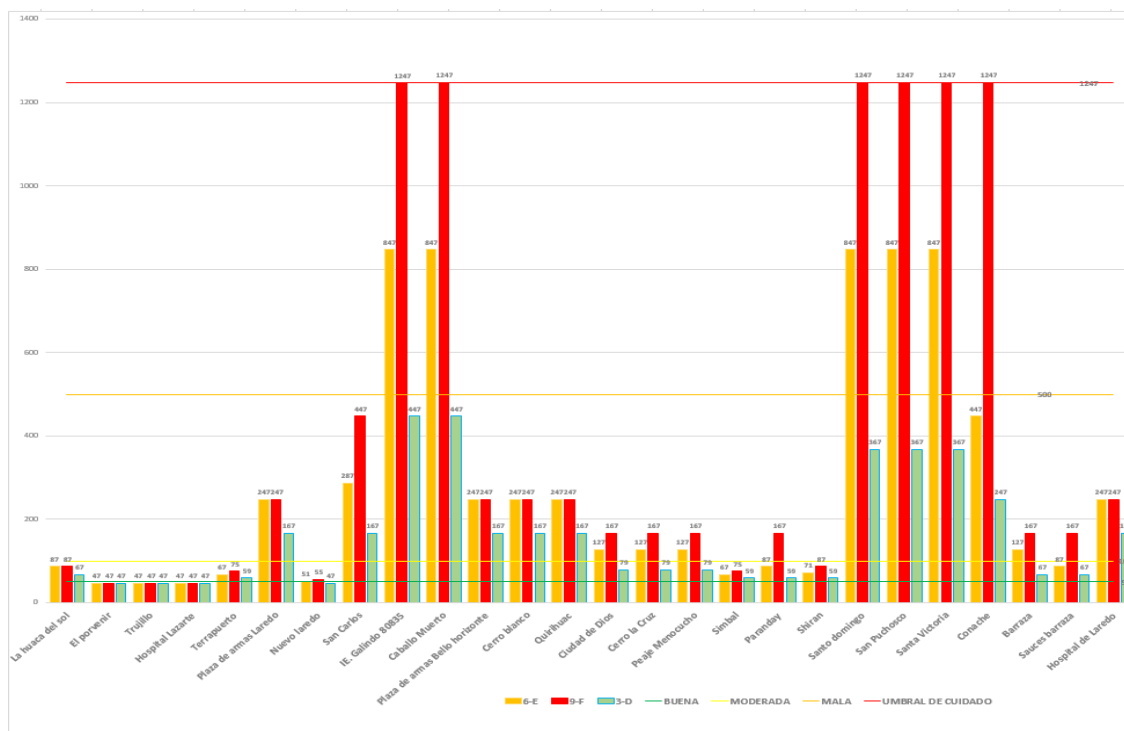


Figura 4. Índice de calidad del aire por la quema de 3, 6 y 9 hectáreas de cuadrante 2 durante el año 2021

La figura 4 muestra que la contribución de emisiones modeladas en cada escenario de quema de 3, 6 y 9 hectáreas en el cuadrante 2 se traduce en un INCA que refleja un deterioro moderado del aire del 33,33%, 43,41% y 60,47%, respectivamente. Además, se observa una clasificación de INCA categoría “Malo” afectando al 32,56%, 48,06% y 54,26% en los mismos escenarios de quema. Por último, se identifica un INCA “umbral de cuidado” para todos los años de modelamiento, afectando al 3,58% en el caso de quema de 6 hectáreas y al 8,53% en la de 9 hectáreas. Estos resultados indican que la quema de *Saccharum officinarum* afectan de manera negativa la calidad de aire, lo que coincide con Investigaciones previas realizadas en diversas regiones, como Piracaiba, Brasil (Dancé & Sáenz, 2016) y en Araquara en Brasil (Arbex et al., 2007), que han demostrado el impacto significativo de la quema de *Saccharum officinarum* en la calidad del aire y enfermedades respiratoria de las poblaciones locales. En el territorio nacional, (Alfaro, 2020) realizó un estudio en casa grande y evaluó el efecto de la quema de *Saccharum officinarum* y *calidad de aire*, encontrando concentraciones máximas de 71 ug/m³ para PM₁₀ y 32 ug/m³ para PM_{2,5}. sin exceder los estándares de calidad ambiental. Además, se encontró que las variables meteorológicas de temperatura y dirección del viento influyeron de manera positiva y negativa en la dispersión de PM_{2,5}. Por otro lado, (Jurado, 2020) reveló que en dos estaciones de monitoreo se registraron concentraciones elevadas de PM₁₀ y PM_{2,5}, asociado con la cosecha de *Saccharum officinarum* en el distrito de la Huaca, donde condiciones meteorológicas específicas, facilitaron la dispersión del material particulado, generado por la quema controlada. Además, un estudio efectuado en Laredo por (Villalobos, 2017) demostraron que la quema de biomasa contribuye al aumento de PM_{2,5}, no excede los ECA Aire, subrayando la necesidad de una atención constante hacia este riesgo para la salud de los habitantes.

4. CONCLUSIONES

El uso del modelo WRF ha permitido llevar a cabo un modelamiento meteorológico detallado durante el período de 2017 a 2022. El dominio de modelamiento abarcó un área de 50 km x 50 km y una resolución espacial de 1 km, ofreció resultados precisos gracias a la alta densidad de puntos de grilla (193 x 163). Las configuraciones del modelo evidenciaron una notable capacidad para capturar la variabilidad diaria y estacional de las condiciones meteorológicas, como temperatura, velocidad del viento, precipitaciones y humedad relativa.

Las validaciones realizadas, basadas en registros de estaciones meteorológicas locales, confirmaron la fiabilidad

de los resultados al ajustarse a los criterios estadísticos. En particular, se destacó una excelente correlación ($r = 0.93$) para la velocidad del viento, aunque también se identificó una tendencia a la sobreestimación, atribuida a limitaciones en la representación de la rugosidad de la superficie y la turbulencia en los niveles inferiores de la atmósfera.

El análisis estacional reveló que el fenómeno de La Niña influyó en las temperaturas más bajas registradas en 2022, mientras que el fenómeno de El Niño explicó los picos cálidos de 2017. Las precipitaciones y la humedad relativa mostraron patrones diferenciados, con marzo como el mes más seco y julio el más húmedo. Las simulaciones indicaron una predominancia del viento con dirección Sur durante el día y Sur-Suroeste durante la noche, con variaciones estacionales significativas.

Los resultados obtenidos subrayan la necesidad de ajustar aún más las parametrizaciones de rugosidad de la superficie y los usos del suelo para mejorar la precisión del modelamiento. Esto es especialmente relevante en áreas de cultivos agrícolas y zonas urbanas con características heterogéneas, donde la longitud de rugosidad juega un papel clave en la dinámica atmosférica.

En cuanto al modelamiento de la dispersión de $PM_{2.5}$ por la quema de caña de azúcar durante el mismo período, se implementaron dos mallas de receptores. Este enfoque permitió identificar que los escenarios de mayor contaminación se produjeron entre junio y noviembre, con valores máximos de $PM_{2.5}$ de $314,788 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $214,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $111,788 \mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondientes a la quema de 9, 6 y 3 hectáreas, respectivamente.

Durante la quema de 6 y 9 hectáreas el índice de calidad ambiental INCA va desde moderado a umbral de cuidado, lo que representa un riesgo potencial para la salud pública, especialmente para grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con afecciones respiratorias preexistentes. Este hallazgo subraya la necesidad de implementar medidas de mitigación y control en las actividades agrícolas, tales como la optimización de las prácticas de quema o la adopción de alternativas menos contaminantes, para minimizar el impacto ambiental y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire.

Los resultados subrayan la necesidad de adoptar medidas sostenibles, como la implementación de la cosecha en verde, para reducir el impacto ambiental y proteger la salud pública, particularmente en comunidades cercanas a las áreas de cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adegboye, O. (2022). "Field Burning Fallout: Quantifying $PM_{2.5}$ Emissions from Sugarcane Fires." *Environmental Health Perspectives*, 130(8), 10–11. <https://doi.org/10.1289/EHP11533>
- Agroindustria Laredo. (2021). "Memoria del Directorio y del Gerente General de la Compañía, Año 2021." https://www.agroindustriallaredo.com/wp-content/uploads/2022/03/Memoria_Directorio_2021.pdf
- Alfaro, G. C. A. (2020). "Alteración de la calidad del aire por quema de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L) En Casa Grande, La Libertad." Universidad Nacional Agraria La Molina, 119. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4488>
- Amin ul, H., Qaiser, N., Amjad, F., Naseem, I., Mansoor, A., Ali Muhammad, R., & Khan Sadaf, S. (2021). "Earth Science & Climate Change Sensitivity Analysis of calpuffModel: Application Over Complex Terrain." *J Earth Sci Clim Change, an Open Access Journal*, 12(5), 2157–7617. <https://ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/>
- Arbex, M. A., Martins, L. C., De Oliveira, R. C., Pereira, L. A. A., Arbex, F. F., Cançado, J. E. D., Saldiva, P. H. N., & Braga, A. L. F. (2007). "Air pollution from biomass burning and asthma hospital admissions in a sugar cane plantation area in Brazil." *Journal of Epidemiology and Community Health*, 61(5), 395–400. <https://doi.org/10.1136/jech.2005.044743>
- Avolio, E., Federico, S., Miglietta, M. M., Lo Feudo, T., Calidonna, C. R., & Sempreviva, A. M. (2017). "Sensitivity analysis of WRF model PBL schemes in simulating boundary-layer variables in southern Italy: An experimental campaign." *Atmospheric Research*, 192(December 2016), 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.003>
- Campbell, P. C. (2018). "Updates to the Noah Land Surface Model in WRF - CMAQ to Improve Simulated Meteorology, Air Quality, and Deposition." *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1029/2018MS001422>
- Cipagauta, C., Mendoza, B., & Zavala-Hidalgo, J. (2014). "Sensitivity of the surface temperature to changes in total solar irradiance calculated with the WRF model." *Geofísica Internacional*, 53(2), 153–162. [https://doi.org/10.1016/s0016-7169\(14\)71497-7](https://doi.org/10.1016/s0016-7169(14)71497-7)

- Dancé, J., & Sáenz, D. (2016). "La cosecha de caña de azúcar: Impacto económico, social y ambiental." USMP, Dirección de Investigación. Perú: FCCEF, 1–18.
<https://www.usmp.edu.pe/contabilidadyeconomia/images/pdf/investigacion/cosecha.pdf>
- FAO. (2023). "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032."
https://www.oecd.org/es/publications/2023/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2023-2032_859ba0c2.html
- Guevara, T., Fau, K., Tueros, G., Luis, L., Benancio, R., & Teofila, G. (2021). "RESOLUCIÓN DE PRESIDENCIA EJECUTIVA N° 053-2021-SENAMHI/PREJ Lima, 29 de octubre de 2021 VISTOS:
<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00701SENA-1377.pdf>
- Guo, D., Wang, R., & Zhao, P. (2020). "Spatial distribution and source contributions of PM_{2.5} concentrations in." *Atmospheric Pollution Research*, 11(8), 1281–1289.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.004>
- Hanna, S., & Chang, J. (2012). "Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation." *Meteorology and Atmospheric Physics*, 116(3–4), 133–146. [<https://doi.org/10.1007/s00703-011-0177-1>]
- Holmes, C. D., & Nowell, H. K. (2023). "Impacts of Sugarcane Fires on Air Quality and Public Health in South Florida'". *Environmental Health Perspectives*, 131(2), 28002. <https://doi.org/10.1289/EHP12800>
- Holnicki, P., Kałuszko, A., & Trapp, W. (2016). "An urban scale application and validation of the Calpuff model." *Atmospheric Pollution Research*, 7(3), 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.016>
- Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes." *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341.
<https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). "Radiative forcing by long-lived greenhouse gases : Calculations with the AER radiative transfer models." <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Jurado, A. O. A. (2020). *Regulación ambiental y la quema de caña de azúcar en el distrito de La Huaca, Piura* [Tesis de maestría, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio USMP.
<https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/8166>
- Johnson, J. B. (2022). *An Introduction to Atmospheric Pollutant Dispersion Modelling*. *Environmental Sciences Proceedings*, 19(18). <https://doi.org/10.3390/ecas2022-12826>
- Luo, T., Lakshmanan, P., Zhou, Z., Deng, Y., Deng, Y., & Yang, L. (2022). "REVIEW PERSPECTIVE OF SUGARCANE." 9(2), 272–283.
- Madala, S., Satyanarayana, A. N. V., Srinivas, C. V., & Kumar, M. (2015). "Mesoscale atmospheric flow-field simulations for air quality modeling over complex terrain region of Ranchi in eastern India using WRF." *Atmospheric Environment*, 107, 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.059>
- Mamunar Rashid, G., Touhid Hossain, M. M., Abdullah Elias Akhter, M., & K Mallik, M. A. (2022). *Sensitivity of Radiation Schemes in the WRF-ARW Model to Predict Extreme Temperature Due to Heat Wave over Bangladesh*. *Journal Of Applied Physics (IOSR-JAP)*, 14(5), 21–33.
<https://doi.org/10.9790/4861-1405022133>
- OEFA. (2018). "Caña de azúcar: ruta hacia la cosecha en verde."
<https://www.gob.pe/institucion/oeffa/informes-publicaciones/4207871-cana-de-azucar-ruta-hacia-la-cosecha-verde>
- OEFA. (2023). "Carta n° 04169-2023-oeffa/rai."
<https://drive.google.com/drive/folders/1EFQ5iDPqin34imQMaewLRQeHGN-PYW99?usp=sharing>
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). "A User's Guide for the Calpuff Dispersion Model." Earth Tech. Inc, January, 521. http://www.src.com/Calpuff/download/Calpuff_UsersGuide.pdf
- Silva, J. S., Rojas, J. P., Norabuena, M., & Seguel, R. J. (2018). "Ozone and volatile organic compounds in the metropolitan area of Lima-Callao, Peru." *Air Quality, Atmosphere and Health*, 11(8), 993–1008.
<https://doi.org/10.1007/s11869-018-0604-2>
- Segura, J. (24 de febrero de 2023). *Ingenios azucareros crean Asociación Peruana de Agroindustriales del Azúcar y Derivados*. Gestión. Recuperado de: <https://gestion.pe/economia/midagri-nueva-variedad-de-cana-de-azucar-incrementara-en-un-80-el-nivel-de-cosecha-piura-lambayeque-ancash-lima-arequipa-noticia/>

- U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *Compilation of air pollutant emission factors* (5th ed., Vol. I, p. 26). <https://www.nrc.gov/docs/ML1607/ML16075A216.pdf>
- Villalobos Cabrera, M. H. (2017). Influencia de la quema de biomasa de caña de azúcar en la concentración de PM_{2.5} en el aire de la zona urbana de Laredo [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/2251>
- Wilks, D., (2007). "Statistical methods in the atmospheric sciences, second edition." *Meteorological Applications* (Vol. 14, Issue 2). <http://dx.doi.org/10.1002/met.16F>
- Pan, H.-L., & Wu, W.-S. (1995). Implementing a mass flux convection parameterization package for the NMC medium-range forecast model (Office Note No. 409). National Centers for Environmental Prediction (U.S.). <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/11429>
- Zaidi, S. M., & Gisen, J. I. A. (2018). "Evaluation of Weather Research and Forecasting (WRF) Microphysics single moment class-3 and class-6 in Precipitation Forecast." *MATEC Web of Conferences*, 150, 10–13. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815003007>