

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

Gian Marco Castillo Ávila, Ana Marlene Guerrero Padilla

Universidad Nacional de Trujillo, Jr. Diego de Almagro N° 344 Trujillo, La Libertad, Perú

Recibido el 9 de junio del 2024. Aprobado el 20 de junio del 2024. Publicado el 11 de febrero del 2025

Resumen

Este estudio indaga en el impacto del material particulado PM_{2.5} derivado de la quema de campos de cultivo de caña de azúcar en la agroindustria de Laredo durante el periodo de 2017 a 2022. Para adquirir datos meteorológicos, se empleó el modelo Weather Research and Forecasting [WRF] con una resolución espacial de 1 km y 40 niveles verticales, cubriendo la provincia de Trujillo y áreas del océano Pacífico. La validez de los resultados del WRF se confirmó mediante la comparación con datos observados, demostrando una alta correlación y capacidad para prever las condiciones meteorológicas. Para simular la dispersión de partículas particulado PM_{2.5}, se utilizó el modelo regulado por la EPA, Calpuff. Este modelo se validó con datos de quemas controladas y se exploraron varios escenarios de quema de caña de azúcar. El análisis estratificado de la quema de parcelas reveló concentraciones máximas de particulado PM_{2.5} en áreas cercanas a las fuentes de emisión, excediendo los estándares de calidad del aire, especialmente durante los meses de junio a noviembre, influenciados por vientos del sur sureste y condiciones de inversión de subsidencia del anticiclón subtropical. En 2021, los días críticos se caracterizaron por vientos en calma. Con respecto a las emisiones de particulado PM_{2.5} durante la quema de campos, se observó que la quema de 3 hectáreas generó un índice de calidad moderado registrado en el 60.47% de los receptores, mientras que la quema de 6 y 9 hectáreas resultó en una categoría de umbral de cuidado, afectando al 32.56% y al 43.41% respectivamente.

Descriptor: *Quema de caña de azúcar, Material particulado PM_{2.5}, caña de azúcar; Modelamiento; WRF; Calpuff*

Abstract

This study investigates the impact of PM_{2.5} particulate matter derived from the burning of sugarcane fields in the Laredo agroindustry during the period from 2017 to 2022. To acquire meteorological data, the Weather Research and Forecasting [WRF] model was employed with a spatial resolution of 1 km and 40 vertical levels, covering the province of Trujillo and areas of the Pacific Ocean. The validity of the WRF results was confirmed through comparison with observed data, demonstrating a high correlation and ability to forecast meteorological conditions. To simulate the dispersion of PM_{2.5} particulate matter, the Calpuff model regulated by the EPA was used. This model was validated with controlled burning data, and various sugarcane burning scenarios were explored. Stratified analysis of field burning revealed maximum concentrations of PM_{2.5} particulate matter in areas near emission sources, exceeding air quality standards, especially during the months of June to November, influenced by southeasterly winds and subsidence inversion conditions of the subtropical anticyclone. In 2021, critical days were characterized by calm winds. Regarding PM_{2.5} particulate emissions during field burning, it was observed that burning of 3 hectares resulted in a moderate quality index recorded in

60.47% of receptors, while burning of 6 and 9 hectares resulted in a care threshold category, affecting 32.56% and 43.41%, respectively, of receptors.

Keywords: Sugarcane burning, $PM_{2.5}$ particulate matter, WRF modeling, Calpuff

1. Introducción

El proceso de quema en pie de caña de azúcar se lleva a cabo como paso previo al corte. Este cultivo es de gran interés comercial que requiere ser quemado antes de la cosecha [1]. La quema de cultivos de caña, da lugar a una lluvia de cenizas en las áreas circundantes. Este cultivo está presente en más de 105 países, representa más del 85% de la producción mundial de azúcar y siendo el segundo cultivo bioenergética más grande del mundo en la actualidad [2].

Desde el año 2000, la producción mundial de caña 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 [3].

En contexto peruano, la producción de caña de azúcar tiene una historia que se remonta al siglo XVI. A pesar de altibajos históricos, desde el año 2000 hasta el 2004 experimentó un crecimiento sostenido, aunque se vio interrumpido por eventos climáticos como el fenómeno del niño en 2015. Con una extensión de 160 millones de hectáreas, distribuidos en los departamentos de Piura, Lambayeque, La libertad, Ancash, Lima y Arequipa contribuyendo con el 3.6% del PBI agrícola [Segura, 2023]. Durante los años 2018, 2019, 2020 y 2021, la empresa Laredo cosechó 6537, 6329, 6388, y 6628 Hectáreas propias, así como 6165, 5837, 5837, 5723 y 5337 Hectáreas provenientes de sembradores, respectivamente [4,5] las cuales en su mayoría fueron quemadas, emitiendo toneladas de material particulado.

El material particulado con diámetro inferior a 2,5 micras $PM_{2.5}$, se genera principalmente por procesos de combustión, quema de materia orgánica y transformación gaseosa en el aire [Contini et al., 2014]. Diversos estudios vinculan la exposición al $PM_{2.5}$ derivado de la quema de caña de azúcar con un incremento en las visitas a salas de emergencia por terapia inhalatoria, así como ingresos hospitalarios debido a enfermedades respiratorias en niños y ancianos [6,7]. Estudios recientes estiman que este impacto puede resultar

en hasta 2.5 muertes por año, con una tasa de mortalidad de 0.4 muertes por 100,000 personas al años [8,9], Estos hallazgos sugieren la urgencia de adoptar medidas para mitigar efectos adversos en la salud y el medio ambiente.

La regulación de quema de caña de azúcar en el territorio nacional está respaldada por el proyecto ley número 6243/2020-CR, ley que regula la gestión y manejo de cultivo de caña de azúcar de manera sanitaria y amigable con el medio ambiente, prohíbe la quema y promueve la minimización de sus residuos sólidos. Así mismo, existe una norma en el reglamento de manejo de residuos sólidos del sector agrario (decreto supremo N° 016-2012-AG). El modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, requiere información meteorológica modelada, para ello se emplea Weather Research anf Forecasting (WRF) npor sus siglas en inglés modelo numérico utilizado para investigación atmosférica a meso escala y pronóstico meteorológico [10]. WRF fue desarrollado conjuntamente por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica [NCAR], laboratorio Nacional del Norte del Pacífico [PNL] y Administración Nacional Oceánica y Atmosférica [NOAA] [5]. WRF ha sido estudiado ampliamente para determinar la sensibilidad e influencia de parametrizaciones [6]. Los modelos de parametrización empleados en el estudio incluyen Single [WSM-3] [7], RRTMG Shortwave scheme y RRTMG longwave scheme [8], Unifield Noah Nand Surface [9], Universidad Yonsei [YSU] [10] y Simplified Arakawa-Schubert [SAS] [11]. Cada esquema de parametrización del modelamiento presenta sus limitaciones e imprecisiones [12], no obstante factores como uso de suelo, topografía terrestre, radiación de onda corta, esquemas conectivos desempeñan un papel fundamental en la microfísica de nubes, perfil vertical de atmosfera y capa limite planetaria [19]. La dimensión vertical se define por una presión hidrostática que se adapta al relieve, mientras que la disposición de la cuadrícula sigue el patrón de la cuadrícula C de Arakawa. En cuanto a la temporalidad, el modelo emplea métodos de integración de segundo y tercer orden de Runge-Kutta, junto con esquemas de advección de segundo a sexto orden tanto en dirección horizontal como vertical [20].

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos resultan muy útiles para determinar la

distribución espacio temporal de los contaminantes en la atmosfera [21]. Este tipo de modelamiento es ampliamente usado a nivel global y comprende diversos tipos de modelos como el Industrial source complex 3 – ISC3, sistema de modelación atmosférica[ADMS], el modelo regulatorio AMS/EMA[AERMOD] y calpuff[22].

El casco urbano de Laredo y demás receptores discretos dentro del dominio de modelamiento, presentan topografía compleja, usos de suelo y cercanía al mar, por ello se ha optado emplear el modelo calpuff. Este modelo simula la dispersión de partículas y gases empleando meteorología variable en espacio y tiempo [23], destaca su capacidad de modelar contaminantes de largo alcance a más de 50 Km de radio, simula de manera eficiente la pluma de dispersión en meteorología y topografía compleja, así como la deposición de partículas en condiciones secas y húmedas [24]. El modelamiento CalMet y Calpuff es aplicable en entornos regionales como en áreas urbanas [25].

2. Metodología

2.1. Meteorología

Para obtener la información meteorológica necesaria, se llevó a cabo un modelado durante un período de 6 años [26]. Para este propósito, se empleó el programa WRF, empleando diversas parametrizaciones para capturar los fenómenos atmosféricos con precisión.

Ejecutadas las parametrizaciones en el modelo WRF, se obtuvieron valores para cada una de las variables meteorológicas, los cuales fueron validados utilizando datos observados de estación Trujillo Latitud 8°6'43.29"S, longitud 78°59'6.36"W, altitud 44m.s.n.m. los datos de uso de suelo se descargan de sentinel-2 en series temporales de uso y cobertura del suelo con resolución de 10m en formato GeoTIFF, se incorpora un modelo DEM de 30 segundos de arco SRTM30 se empleó un modelo digital de elevación proveniente del Shuttle Radar Topography Mission [SRTM], con una resolución espacial de 30 m. Además se empleó un raster de, uso de suelos, el cual se obtuvo de los Satélites Sentinel-1 y Sentinel-2 , con una resolución espacial de 10 m. Ambos raster tienen formato geotiff.

2.2. Modelo de dispersión

El cálculo de emisiones se realizó mediante la aplicación de la ecuación $CFI = CM + CF$, recomendada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [USEPA]. Esta

ecuación, permite determinar la concentración final en microgramos por metro cúbico [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], donde CM representa la Concentración Modelada de los receptores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y CF corresponde a la concentración de Fondo, también en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de fondo se determinaron utilizando información proporcionada por la Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental [22] y datos extraídos de la tesis de [31].

La validación del modelo se realizó mediante la comparación de las estimaciones obtenidas a través del modelo de dispersión con los datos recopilados durante el monitoreo llevado a cabo por [31]. Para este fin, se emplearon métodos estadísticos recomendados por [27], que incluyen: Bias [Me] error medio, Error medio cuadrático [MSE], RMSE, Coeficiente de correlación [r], Coeficiente de determinación

Escenarios de modelamiento

Los 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 $\text{PM}_{2.5}$, medido como el promedio de 24 horas, y los valores de la primera concentración máxima en cada año del período de modelado.

Para evaluar el efecto de la quema de caña de azúcar, se realizó el modelamiento de 3, 6 y 9 hectáreas en un área de 557.4hectareas, esta área de estudio se delimito mediante un criterio de exclusión, el cual establece que las áreas ubicadas a una distancia de 1600 metros de zonas urbanas y 80 metros de ejes de vías no deben ser cosechadas mediante el método tradicional de quema [28].

Las 557.4 hectáreas fueron divididas en 5 cuadrantes en cada una de las 5 cuadrículas se realizó 3 modelamientos, considerando que se queman 3, 6 y 9 Hectáreas durante el periodo de modelamiento 2017-2022. Para cada año del modelamiento se realizaron 15 corridas del modelo, Cuadrícula 1[3-A; 6-B; 9-C], Cuadrícula 2[3-D; 6-E; 9-F], Cuadrícula 3[3-G;6-H; 9-I], Cuadrícula 4[3-J; 6-K; 9-L], Cuadrícula 5[3-M; 6-N; 9-Ñ].

2.3. Determinación del índice de calidad del aire

El índice de calidad de aire 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 $\text{PM}_{2.5}$ y según la metodología propuesta en RM N° 181-2017-MINAM, Índice de calidad de aire - INCA, el cual tiene un valor optimo entre 0 y 100 que coincide con los estándares de calidad ambiental.

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 zonas del océano pacifico.

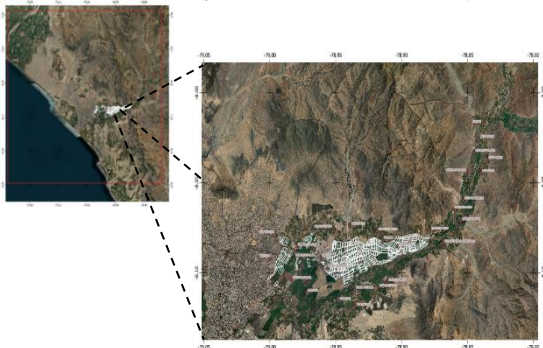


Figura 1: Dominio de modelamiento

Los resultados del modelo WRF proporcionaron campos meteorológicos que se utilizaron como entrada para el modelo calpuff, se determinó la 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 0.999, 0.996, 0.992, 0.989, 0.985, 0.980, 0.975, 0.970, 0.963, 0.956, 0.948, 0.939, 0.929, 0.918, 0.906, 0.892, 0.877, 0.859, 0.840, 0.819, 0.795, 0.768, 0.738, 0.704, 0.667, 0.625, 0.578, 0.526, 0.467, 0.402, 0.329, 0.247, 0.156, 0.054. 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 de campos eólicos, Calmet, generó datos horarios de viento y temperatura con módulos micrometeorológicos, utilizando un dominio de celdas de cuadrículas de 50 km x 50 km y una resolución de 900 m, con 30 capas correspondientes a alturas físicas de 29.38 m. Estos resultados se validaron con la estación Trujillo (8°6´43.29”S, 78°59´6.36”W, 44 m.s.n.m.) [9]. Se observó una variabilidad diaria de temperatura entre 10 y 32 °C, con mínimas alrededor de las 4:00 a.m. y máximas entre la 1:00 p.m. y las 3:00 p.m. El año más frío fue 2022 debido a La Niña, mientras que 2017 fue el más cálido debido a El Niño. Las precipitaciones acumuladas alcanzaron su máximo a finales de 2022, con la mayoría por debajo de 10 mm en los 6 años. La humedad relativa 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 dirección predominante del viento fue Sur durante el día y Sur-Suroeste por la noche, con variaciones estacionales. Las validaciones de los datos estimados y observados cumplieron con criterios estadísticos sugeridos [23]. Sin embargo, hubo una tendencia a sobreestimar la velocidad media del viento, posiblemente debido a limitaciones en la simulación de la rugosidad de la superficie y la turbulencia [24]. Se variaron las simulaciones ajustando la longitud de rugosidad de la superficie, pero se sugiere un mejor ajuste en las parametrizaciones de rugosidad y los usos del suelo. Las parametrizaciones de radiación RRTMG Longwave y RRTMG Shortwave mejoraron la precisión de la simulación, aunque hubo una sobreestimación de la precipitación en comparación con las mediciones observadas, posiblemente debido a la representación incompleta de la dinámica atmosférica y otros factores [25].

3.2. Modelamiento de dispersión de PM_{2.5}

En el modelo se tuvieron en cuenta dos mallas de receptores ubicada en las fuentes a una distancia menor a 1 km alrededor de las mismas, con espaciado de 250 m; la segunda para distancias mayores a 3 km, con receptores cada 1 km. El factor de emisión empleado fue 0.88 g/kg(26) Considerando la velocidad de quema de 1 hora/hectárea [27] y la información de biomasa/área quemada fue calculada a partir de información de [28], donde calculó la biomasa de 6 parcelas de caña de azúcar en Laredo y se obtuvo una tasa de emisión de 0.0051 g/s*m².

Los niveles de fondo se calcularon con información extraída de [27, 28], obteniendo valores de 11.788 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los receptores discretos de mayor relevancia incluyendo la Huaca del Sol en El Porvenir y la ciudad de Trujillo, así como los hospitales Lazarte, El Esfuerzo y de Laredo. También se hace referencia a puntos como el Terrapuerto, la Plaza de Armas de Laredo y Nuevo Laredo, San Carlos, la IE Galindo 80835, Caballo Muerto, la Plaza de Armas de Bello Horizonte, Cerro Blanco, Quirihuac, Ciudad de Dios, Cerro La Cruz, el Peaje Menocucho, Simbal, Paranday, Shiran, Santo Domingo, San Puchosco, Santa Victoria, Conache, Barraza y Sauces Barraza.

Para validar el modelo, se compararon los resultados del monitoreo realizado en 6 parcelas quemadas los días 02, 11, 12, 19 y 21 de septiembre de 2017 con las emisiones estimadas por el modelo durante el mismo periodo. De la validación del modelamiento de dispersión, se obtuvieron valores de coeficiente de correlación de 0.9280, un sesgo de 2.2940, RMSE de 3.2340 y MSE de 10.459 indican que el modelo tiene un error promedio relativamente bajo en la predicción, estos resultados podrían estar considerablemente influidos por variables intervinientes como meteorología vertical y de superficie ya que en el presente estudio se empleó meteorología modelada de 6 años y el área de estudio presenta topografía compleja. Por otro lado (29), validaron la aplicación del modelo en una región con terreno complejo y determinaron que el modelo subestima las predicciones, especialmente en concentraciones máximas. Estos resultados difieren con la presente investigación que indican una sobreestimación en las predicciones máximas. Además de las características de terreno, los factores que afectan la la validación del modelo de dispersión esta relacionado con la selección de coeficientes y el uso de información meteorológica adecuada [30]. Si bien el modelo CALPUFF mostró capacidades para simular la dispersión en terrenos complejos, se observaron algunas discrepancias en las predicciones máximas, especialmente en concentraciones extremas. Estos resultados puede estar relacionado con los hallazgos de [19] quien indica que calpuff al simular concentraciones de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO_x , SO_2 , CO y benceno C_6H_6 es mejor en medias anuales, mientras que, la concordancia temporal en concentraciones de 1 hora a corto plazo es menos precisa, especialmente en meteorología de vientos bajos.

- **1 Quema de todas las parcelas 1473.5 hectáreas de cultivos de caña de azúcar**

Se realizó el modelamiento teniendo en cuenta el escenario más crítico, que consiste en la quema de 1473.5 Hectáreas de ocurrir una quema de todos los campos de caña se obtendría valores alrededor de 8000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$.

- **2. Quema de 557.4 Hectáreas de cultivos de caña de azúcar**

En la segunda evaluación, se efectuó un recorte de las parcelas, incluyendo únicamente aquellas ubicadas a una distancia superior a 1600 metros de zonas urbanas y 80 metros de ejes de vía de ocurrir una quema de todos los campos de caña 557.4 Ha se alcanzarían valores alrededor de 2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$.

- **3 Modelamiento de quema de parcelas estratificadas**

Durante el período de 2017 a 2022, se realizó un modelado estratificado de parcelas en cinco cuadrantes para evaluar el impacto y la contribución de la quema individual de parcelas. Se examinaron las quemadas de parcelas de 3, 6 y 9 hectáreas en cada cuadrante, revelando concentraciones más altas en los cuadrantes 1 y 2, que superaron el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de aire de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el año 2017, en el cuadrante 1, las concentraciones máximas oscilaron entre 47.198 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 160.0924 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para diferentes tamaños de parcelas. El año 2018 mostró concentraciones aún más altas, con valores de hasta 231.10524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para 2019, las concentraciones variaron entre 193.266427 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 231.10524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En 2020, las concentraciones máximas fluctuaron entre 179.781 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 263.781 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando un aumento en la contaminación atmosférica. En 2022, las concentraciones máximas oscilaron entre 187.867 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 224.669 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, evidenciando un impacto continuo de la quema de parcelas en la calidad del aire.

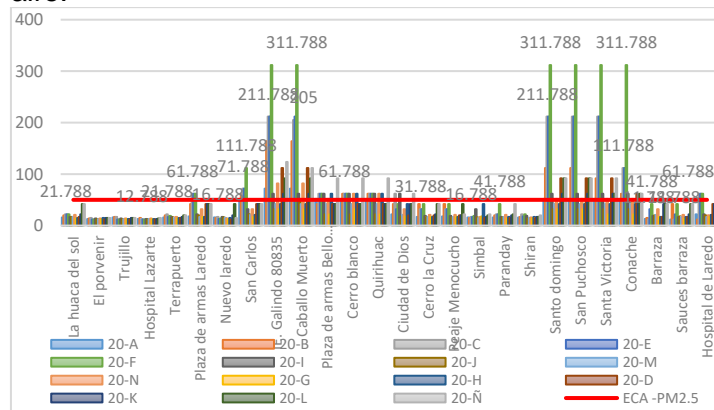


Figura 2. Valores obtenidos por la quema de 3, 6 y 9 hectáreas de cuadrante 2 durante el año 2021

El año 2021 se destacó como el más desfavorable en términos de contaminación atmosférica en comparación con los demás años. Para comprender mejor la distribución y el comportamiento espacio-temporal de las plumas de dispersión del PM_{2.5}, se ha representado esta información en la Figura 2. En el cuadrante 1, la quema de 3 hectáreas resulta en concentraciones máximas que oscilan entre 71.788 µg/m³ para los receptores IE. Galindo 80835 y Caballo Muerto, y 51.788 µg/m³ en Santa Victoria San Puchosco. Por otro lado, la quema de 6 hectáreas produce concentraciones máximas de 163.866 µg/m³ en los receptores Caballo Muerto y IE. Galindo 80835, y 111.788 µg/m³ en San Puchosco, Santa Victoria y Santo Domingo. Para la quema de 9 hectáreas, se registran concentraciones máximas de 214.788 µg/m³ en los receptores Caballo Muerto, IE. Galindo 80835, Santo Domingo, San Puchosco y Santa Victoria.

Los escenarios de mayor contaminación de PM_{2.5} atribuible a la quema de campos de caña de azúcar 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. Contrariamente, el debilitamiento del anticiclón entre diciembre y mayo se traduce en días más despejados.

Los resultados de dispersión de PM_{2.5} para todo el periodo de modelamiento 2017-2022 muestran que los días de máxima concentración se dieron de mayo a diciembre. Durante el año 2021, que presenta los escenarios más críticos de contaminación, se determinó que los días más críticos coincidieron con vientos en calma, con velocidades que oscilaron entre 0.0157 y 0.946 m/s. Las concentraciones más altas se observaron en varios receptores, incluidos IE. Galindo 80835, Caballo Muerto, Santo Domingo, San Puchosco, Santa Victoria y Conache. Durante la quema de 9 hectáreas, se registraron valores máximos de 311.788 µg/m³, mientras que, durante la quema de 6 hectáreas, las concentraciones alcanzaron los 211.78 µg/m³. Por otro lado, para la quema de 3 hectáreas, los valores máximos fueron de 111.788 µg/m³, afectando a IE. Galindo 80835 y Caballo Muerto, y de 91.788 µg/m³ para Santo Domingo, San Puchosco, Santa Victoria y Conache.

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. Sin embargo, Calpuff puede simular dispersión turbulenta en terrenos complejos

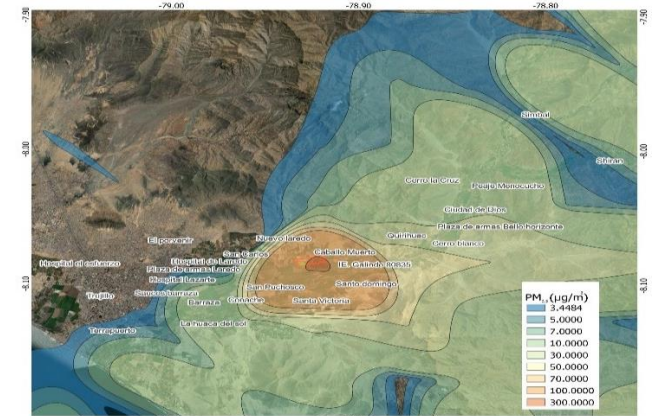


Figura 3: Dispersión de PM_{2.5} por quema de parcelas estratificadas de 9 hectáreas, en el cuadrante 2 durante el año 2021.

3.3. Determinación el índice de calidad de aire

El cálculo del Índice de Calidad del Aire [ICA] se realizó para diferentes escenarios de quema de caña de azúcar en hectáreas durante los años 2017, 2018, 2019, 2020 y 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 en los índices de calidad del aire para diferentes escenarios de quema de hectáreas, 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.

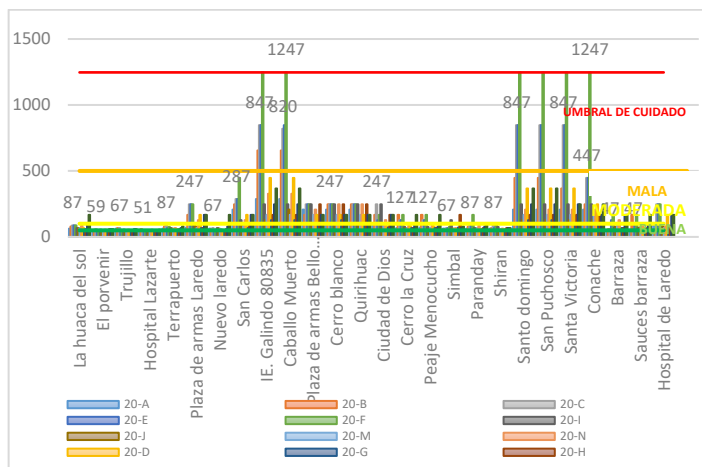


Figura 4: Índice de calidad de aire durante el año 2021

La imagen 4 muestra que la contribución de emisiones modeladas en cada escenario de quema de 3, 6 y 9 hectáreas se traduce en un índice de calidad de aire (ICA) que refleja un deterioro moderado del aire del 33.33%, 43.41% y 60.47%, respectivamente. Además, se observa una clasificación de ICA categoría “Malo” afectando al 32.56%, 48.06% y 54.26% en los mismos escenarios de quema. Por último, se identifica un ICA “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 campos de caña de azúcar afectan de manera negativa la calidad de aire, lo que coincide con Investigaciones previas realizadas en diversas regiones, como Piracaiba, Brasil [31], el valle del Cauca en Colombia[32], y en Araquara en Brasil[33,34], que han demostrado el impacto significativo de la quema de caña de azúcar en la calidad del aire y la salud respiratoria de las poblaciones locales. En el territorio nacional, [35] realizó un estudio en casa grande y evaluó el efecto de la quema de caña de azúcar en la calidad del 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 variables como la temperatura y la dirección del viento tuvieron efectos positivos como negativos en diferentes puntos. Por otro lado, [36] reveló que en dos estaciones de monitoreo en el centro poblado de Vítate y la ciudad de la Huaca se registraron concentraciones elevadas de PM₁₀ y PM_{2.5}, asociado con la cosecha de caña de azúcar en el distrito de la Huaca, donde condiciones meteorológicas específicas, facilitaron la dispersión del material particulado, generado por la quema controlada de caña de azúcar. Además, un estudio efectuado en Laredo [28] demostraron que la

quema de biomasa contribuye al aumento de PM_{2.5}, no excede los Estándares de Calidad Ambiental, subrayando la necesidad de una atención constante hacia este riesgo para la salud de los habitantes locales.

4. Conclusiones

Se logro obtener meteorología modelada la cual presenta una sobreestimacion de parámetros meteorológicos.

Se logró realizar el modelamiento de dispersión de PM_{2.5} por la quema de caña de azúcar, los escenarios más críticos se dieron durante los meses de mayo a diciembre obteniendo valores que superan los estándares de calidad de aire.

Se logró determinar el índice de calidad de aire, cuyos resultados indican que la quema de campos de caña de azúcar altera de manera directa la calidad de aire hasta categoría INCA de crítico, malo y moderada intensidad.

Referencias

1. Solera MC, Zita A, Loria B. Motivos y Razones para Quemar las Plantaciones de Caña de Azúcar en Costa Rica A) Ventajas. 2006;(506):248–53.
2. FAO. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032. 2023.
3. Luo T, Lakshmanan P, Zhou Z, Deng Y, Deng Y, Yang L. Review Perspective Of Sugarcane. 2022;9(2):272–83.
4. Cipagauta C, Mendoza B, Zavala-Hidalgo J. Sensitivity of the surface temperature to changes in total solar irradiance calculated with the WRF model. Geofis Int [Internet]. 2014;53(2):153–62. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)71497-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7169(14)71497-7)
5. Mesoscale and Microscale Meteorology Division NC for AR. Weather Research Forecasting Version 3 Modeling System User’s Guide. 2015;443. Available from: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html.
6. Bukovsky MS and DJK. Precipitation Simulations Using WRF as a Nested Regional Climate Model. Of, J Meteorol Appl Sci Earth. 2009;2152–60.
7. Dudhia J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. Journal of the Atmospheric Sciences; 1989. p. 46(20), 3077–107.
8. Iacono MJ, Delamere JS, Mlawer EJ, Shephard MW, Clough SA, Collins WD. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. 2008;113:2–9.
9. Campbell PC. 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. 2018;

10. Hong SY, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Weather Rev.* 2006;134(9):2318–41.
11. wu ws. implementing a mass flux convection parameterization package for the nmc medium-range forecast model. u s deparment Commer Natl Ocean Atmos Adm Natl Weather Serv Natl Meteorol Cent. 1995;(September).
12. NAUMAN. Parameterization-Induced Error Characteristics of MM5 and WRF Operated in Climate Mode over the Alpine Region: An Ensemble-Based Analysis. *Am Meteorol Soc.* 2011;3107–24.
13. Camberlin BPJCP. Testing WRF capability in simulating the atmospheric water cycle over Equatorial East Africa. *Springer.* 2011;1357–79.
14. Wu H, Zhang Y, Yu Q, Ma W. Application of an integrated Weather Research and Forecasting (WRF)/CALPUFF modeling tool for source apportionment of atmospheric pollutants for air quality management: A case study in the urban area of Benxi, China. *J Air Waste Manag Assoc.* 2018;68(4):347–68.
15. Lee HD, Yoo JW, Kang MK, Kang JS, Jung JH, Oh KJ. Evaluation of concentrations and source contribution of PM₁₀ and SO₂ emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF-CALPUFF modeling tools. *Atmos Pollut Res.* 2014;5(4):664–76.
16. Guo D, Wang R, Zhao P. Spatial distribution and source contributions of PM_{2.5} concentrations in. *Atmos Pollut Res [Internet].* 2020;11(8):1281–9. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.004>
17. Holmes NS, Morawska L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmos Environ.* 2006;40(30):5902–28.
18. Scire JS, Strimaitis DG, Yamartino RJ. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. *Earth Tech Inc [Internet].* 2000;(January):521. Available from: http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf
19. Holnicki P, Kałuszek A, Trapp W. An urban scale application and validation of the CALPUFF model. *Atmos Pollut Res.* 2016;7(3):393–402.
20. Guevara T, Fau K, Tueros G, Luis L, Benancio R, Teofila G. Resolución De Presidencia Ejecutiva N° 053-2021-Senamhi/Prej Lima, 29 De Octubre De 2021 VISTOS: 2021.
21. D. S. Wilks. Statistical methods in the atmospheric sciences, second edition [Internet]. Vol. 14, Meteorological Applications. 2007. 205–205 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/met.16F>
22. OEFA. Caña de azúcar: ruta hacia la cosecha en verde. 2018. 165 p.
23. Hanna S, Chang J. Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation. *Meteorol Atmos Phys.* 2012;116(3–4):133–46.
24. Madala S, Satyanarayana ANV, Srinivas C V., Kumar M. Mesoscale atmospheric flow-field simulations for air quality modeling over complex terrain region of Ranchi in eastern India using WRF. *Atmos Environ [Internet].* 2015;107:315–28. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.059>
25. Zaidi SM, Gisen JIA. Evaluation of Weather Research and Forecasting (WRF) Microphysics single moment class-3 and class-6 in Precipitation Forecast. *MATEC Web Conf.* 2018;150:10–3.
26. AP 42. Compilation of air pollutant emission factors. *FIFTH.* 1995;1:26.
27. McCarty JL. Remote sensing-based estimates of annual and seasonal emissions from crop residue burning in the contiguous United States. *J Air Waste Manag Assoc.* 2011;61(1):22–34.
28. Villalobos MH. Universidad César Vallejo facultad de ingeniería. *Univ Cesar Vallejo.* 2017;1:62.
29. cui H, Yao R, Xu X, Xin C, Yang jinming. A tracer experiment study to evaluate the CALPUFF real time application in a near-field complex terrain setting. *Atmos Environ [Internet].* 2011;45(39):7525–32. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.041>
30. Amin ul H, Qaiser N, Amjad F, Naseem I, Mansoor A, Ali Muhammad R, et al. Earth Science & Climate Change Sensitivity Analysis of CALPUFF Model: Application Over Complex Terrain. *J Earth Sci Clim Chang an open access J [Internet].* 2021;12(5):2157–7617. Available from: <https://ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/>
31. Dancé J, Sáenz D. La cosecha de caña de azúcar: Impacto económico, social y ambiental. *USMP, Dir Investig Perú FCCEF [Internet].* 2016;1–18. Available from: <https://www.usmp.edu.pe/contabilidadyeconomia/images/pdf/investigacion/cosecha.pdf>
32. Madriñan C. Compilacion y analisis sobre contaminacion del aire producida por la quema y la requema de la caña de azucar; *Saccharum officinarum L, en el valle geografico del rio cauca.* 2002;1–110. Available from: http://www.bdigital.unal.edu.co/5039/1/carloseduardo_madrinanpalomino.2002.pdf
33. Cançado JED, Saldiva PHN, Pereira LAA, Lara LBLS, Artaxo P, Martinelli LA, et al. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. *Environ Health Perspect.* 2006;114(5):725–9.
34. Arbex MA, Martins LC, De Oliveira RC, Pereira LAA, Arbex FF, Cançado JED, et al. Air pollution from biomass burning and asthma hospital admissions in a sugar cane plantation area in Brazil. *J Epidemiol Community Health.* 2007;61(5):395–400.
35. Alfaro GCA. "Alteración De La Calidad Del Aire Por Quema De Caña De Azúcar (Saccharum Officinarum L) En Casa Grande, La Libertad." *Univ Nac Agrar La Molina [Internet].* 2020;119. Available from: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.129.96/4488>
36. Jurado AOA. Regulación Ambiental Y La Quema De Caña De Azúcar En El Distrito De La Huaca , Piura ,. *Univ San Martin Porres [Internet].* 2020;255. Available from: <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/8166>