



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

SEDE
ESMERALDAS

ESCUELA DE GESTIÓN AMBIENTAL

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE PRÓXIMO A LAS CHIMENEAS DE
LA REFINERÍA ESMERALDAS, MEDIANTE EL MODELO DE DISPERSIÓN
PLUMA.

TESIS DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
LICENCIADA EN GESTIÓN AMBIENTAL

AUTOR

PATRICIA MARIBEL MOREIRA VERA

ASESORA

MGT. KARLA SOLIS CHARCOPA

ESMERALDAS – ABRIL 2022

Trabajo de tesis luego de haber dado cumplimiento a los requisitos exigidos por el reglamento de grado de la PUCE-Esmeraldas, previo a la obtención del título de Licenciada en Gestión Ambiental.

Presidente de tribunal de graduación

Lector 1

MSc. Stefania Sanchez Flores

Lector 2

PhD. Jorge Velazco Vargas

Coordinadora de la Carrera de Gestión Ambiental.

MSc. Karla Solis Charcopa

Director de tesis.

MSc. Karla Solís Charcopa

Esmeraldas, julio 2022

AUTORÍA

Yo, Patricia Maribel Moreira Vera, declaro que la presente investigación enmarcada en el actual trabajo de tesis es absolutamente original, auténtica y personal.

En virtud que el contenido de esta investigación de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor y de la PUCE-Sede Esmeraldas.

Patricia Maribel Moreira Vera

C.I. 0927496752

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su infinita misericordia y por darme constancia, perseverancia y haberme dado la oportunidad de poder estudiar, a mis padres, Teresa y José por haber sido mi apoyo incondicional en los momentos más difíciles, y un profundo agradecimiento a la coordinadora de carrera Karla Solís, y a mi guía el Msc. Cristóbal Baixauli por su paciencia y dedicación para hacer un excelente trabajo.

DEDICATORIA

A mi hija Valentina Peña Moreira para ser su ejemplo de motivación y superación.

ÍNDICE

AUTORÍA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA.....	v
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	9
Presentación del tema de investigación.....	9
Planteamiento del problema	11
Justificación.....	13
Objetivos	15
1. MARCO TEÓRICO.....	16
1.1. Bases teóricas y Científicas.....	16
1.2. Antecedentes	29
1.3. Marco legal	33
2. METODOLOGÍA	39
2.1. Área de estudio.....	39
2.2. Tipo de investigación.....	41
2.3. Método.....	41
RESULTADOS	43
DISCUSIÓN.....	48
CONCLUSIONES.....	51
RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentración de contaminantes clave en $\mu\text{g} / \text{m}^3$	37
Tabla 2. Impactos en la salud asociados para los ocho contaminantes identificados....	37
Tabla 3. Detalle indicadores recogidos en cada tipo de instrumento; Error! Marcador no definido.	
Tabla 4. Estadísticos descriptivos de las distribuciones de valores en las medidas meteorológicas y de concentración de MP.....	46
Tabla 5. Concentraciones promediadas en función de la orientación y distancia.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Progresión de la pluma en base a las turbulencias y parámetros de dispersión	26
Figura 2. Área de estudio. Puntos de muestreo en función de la distancia y la orientación angular. Fuente: Programa AIRE	39
Figura 3. Medidor de partículas PCE-MPC 10 y Estación Meteorológica PCE-FWS 20N	42
Figura 4. Representación de las distancias medias adelante y atrás respecto a las chimeneas de la Refinería	44
Figura 5. Concentraciones de material particulado $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ respecto a las chimeneas de Refinería	45

RESUMEN

Actualmente el problema de la contaminación es originada por el acelerado crecimiento que hemos experimentado, la revolución industrial y el uso de los recursos naturales han conllevado a un grave deterioro del medio ambiente, generando un desequilibrio ecológico. En la provincia de Esmeraldas una de las actividades que más ingresos económicos genera es la Refinería, sin embargo, el alto riesgo que ésta representa para la población y el medio ambiente aún es objeto de discusión y fue una de las razones para realizar el presente estudio, que tuvo como objetivo general analizar la calidad del aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, mediante el modelo de dispersión gaussiana de la pluma de emisión. Para llevar a cabo este estudio se propuso establecer un marco de referencia de 3 km de radio aproximadamente, para crear una red dinámica de puntos dentro del área propuesta a lo largo de 3 distancias radiales separados por una orientación de 10 grados angulares, definiendo 3 distancias angulares y 2 marginales con una dispersión más amplia. Se estableció un total de 9 puntos de muestreo utilizando un medidor de material particulado PVE-MPC 10, también se determinaron los datos meteorológicos correspondientes a la dirección, velocidad del viento, la temperatura y humedad relativa con el uso de 3 estaciones meteorológicas modelo PCE-FWS 20N, que fueron ubicadas en los barrios de la victoria, 15 de marzo y la tolita para ser monitoreadas de manera constante. Por medio de los resultados se pudo observar que las concentraciones máximas fueron de 22 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) respecto al MP 2,5 μg , mientras que para el MP 10 μg la máxima concentración fue de 37 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Conforme a las medidas meteorológicas se obtuvo un valor promedio de 8,1 km/h conforme a la velocidad del viento, también se obtuvo valores de 56,8% y 30,1 °C en cuanto a la humedad relativa y la temperatura. Con el total de datos recogidos delante de las chimeneas en diferentes ángulos respecto al viento, se pudo establecer que el tamaño de la muestra no cumplió con la distribución de concentración de material particulado que se esperaba, llegando a la conclusión de que es necesario probar el uso de otros modelos atmosféricos para establecer otras realidades conforme a las emisiones que se generan en la Refinería Esmeraldas.

Palabras clave: Calidad de aire, Refinería, Modelo de Dispersión Gaussiana de la Pluma de Emisión.

ABSTRACT

Currently the problem of pollution is caused by the accelerated growth we have experienced, the industrial revolution and the use of natural resources have led to a serious deterioration of the environment, generating an ecological imbalance. In the province of Esmeraldas one of the activities that generates more economic income is the refinery, however the high risk that this represents for the population and the environment is still under discussion and was one of the reasons for conducting this study, which had as general objective to analyze the quality of the air near the chimneys of the Esmeraldas refinery, using the Gaussian dispersion model of the emission plume. To carry out this study, it was proposed to establish a reference frame of approximately 3 km radius, to create a dynamic network of points within the proposed area along 3 radial distances separated by an orientation of 10 angular degrees, defining 3 angular and 2 marginal distances with a wider dispersion. A total of 9 sampling points were established using a particulate matter meter PVE-MPC 10, also meteorological data corresponding to direction, wind speed, temperature and relative humidity were determined with the use of 3 meteorological stations model PCE-FWS 20N, which were located in the neighborhoods of la victoria, 15 de marzo and La tolita to be monitored constantly. The results showed that the maximum concentrations were 22 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) for PM 2.5 g, while for PM 10 g the maximum concentration was 37($\mu\text{g}/\text{m}^3$). According to meteorological measurements, an average value of 8.1 km/h was obtained for wind speed, and values of 56.8% and 30.1 °C were also obtained for relative humidity and temperature. With the total data collected in front of the chimneys at different angles with respect to the wind, it was possible to establish that the sample size did not comply with the expected concentration distribution of particulate matter, reaching the conclusion that it is necessary to test the use of other atmospheric models to establish other realities according to the emissions generated at the Esmeraldas Refinery.

Key words: Air quality, Refinery, Emission Plume Gaussian Dispersion Model.

INTRODUCCIÓN

Presentación del tema de investigación

La contaminación del aire es una de las problemáticas ambientales más importantes de las últimas décadas, esta es definida como modificación impropia del ambiente interior o exterior, a causa de la introducción de agentes físicos, químicos o biológicos que pueda cambiar las características naturales del aire y su equilibrio ecológico (1), este tiene un impacto toxicológico grave en la salud humana y el medio ambiente (2). Las fuentes de contaminación varían desde una pequeña unidad de cigarrillos y fuentes naturales como las actividades volcánicas hasta un gran volumen de emisiones de los motores de los automóviles y las actividades industriales (3).

A nivel mundial múltiples actividades antropogénicas generan emisiones de gases contaminantes a la atmosfera en su afán de producir energía, abastecer de alimentos y servicios (3), entre estas se encuentran la emitidas por las industrias, el transporte, agricultura, residuos sólidos y los hogares, estas actividades pueden transmutar paulatinamente la calidad del aire (4). Respecto a ello la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha identificado el aire contaminado como el mayor riesgo ambiental y, por lo tanto, es necesario esforzarse por mantener una buena calidad del aire (5). Para gestionar los posibles impactos en la salud, se debe monitorear y controlar la calidad del aire de manera más meticulosa (6).

Los contaminantes de mayor preocupación en el campo de la salud pública incluyen partículas dispersas en el ambiente, CO₂, ozono, compuestos nitrogenados y dióxido de azufre (7). La contaminación del aire en interiores y exteriores causa enfermedades respiratorias potencialmente mortales y otras enfermedades.

Con la creciente industrialización, varios contaminantes afectan la salud humana a través de diferentes medios ambientales, dichos contaminantes en el aire son a menudo el daño más directo para los humanos (8). Aunque las medidas razonables de protección ambiental pueden ayudar a mejorar la calidad ambiental, el continuo deterioro de la calidad del aire en esta etapa ha dado lugar a diversas enfermedades agudas y crónicas para los seres humanos, que se han convertido en un problema urgente en el campo de la salud pública (9).

Esos contaminantes emitidos pueden ingresar al cuerpo humano a través del tracto respiratorio. Debido a que la estructura de cada parte del tracto respiratorio no es la misma, la retención o absorción de sustancias extrañas también es muy diferente (10). Cuanto más profunda sea la entrada, mayor será el área de difusión, mayor será el tiempo de residencia y mayor será la absorción del cuerpo (11). Además, los contaminantes del aire también pueden ingresar al cuerpo humano a través del tracto digestivo a través de los alimentos, el agua y el suelo, y también pueden entrar en contacto directo con la piel o las membranas mucosas y afectar la salud del cuerpo.

Uno de las principales motores de la economía del Ecuador y de la provincia de Esmeraldas es la industria petrolera, sin embargo esta tiene múltiples factores de riesgos ambientales asociado que han provocado un aumento de la preocupación de las comunidades (12), en especial por los contaminantes emitidos al aire producto del proceso de refinación, el mismo que puede tener efectos directos o indirectos en los seres humanos (13). Si la concentración de contaminantes del aire aumenta drásticamente en un corto período de tiempo, es un peligro grave envenenar a las personas que inhalan una gran cantidad de contaminantes (14).

Además, los contaminantes del aire afectan la salud humana a de manera crónicas son el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y las partículas en la atmósfera (9) , estos pueden estimular repetidamente el cuerpo durante mucho tiempo y pueden causar diversas enfermedades respiratorias como faringitis, laringitis y bronquitis, y luego gradualmente convertirse en enfermedad pulmonar obstructiva crónica (5).

Una de las fuentes puntuales de emisión de contaminantes de la atmosfera consideradas en nuestro estudio como referencia en la refinería de Esmeraldas, pese a que existen más fuentes de emisiones como las generadas por el tránsito vehicular, la quema agrícola entre otras que contribuyen la antes mencionada problemática ambiental, sin embargo es necesario mencionar que las refinerías de petróleo en el proceso de convertir el crudo en una amplia gama de productos (15), emiten una variedad de contaminantes tanto en operaciones normales como en accidentes (16). La emisión de contaminantes de cada fuente es variada pero a su vez tienen algo en común los cual es la generación de material particulado (9). Dicho contaminante está compuesto por muchos componentes, como ácidos, químicos orgánicos, metales, suelo, madera y polvo.

Por lo general, este tipo de contaminante se inhalan por la boca y la nariz y afectan principalmente a la tráquea y los pulmones (17). Las condiciones como el asma y las alergias pueden mejorar cuando se enfrentan a esta clase de contaminantes. Los tipos de problemas de salud están relacionados con el tamaño relativo del contaminante.

Si bien la humanidad persigue constantemente industrias avanzadas de alta tecnología y una gran cantidad de riqueza, si se ignora todo tipo de problemas de contaminación ambiental, la humanidad finalmente asumirá la responsabilidad (18). Al mismo tiempo que se protege el medio ambiente, también se debe proteger al ser humano de los peligros causados por la contaminación ambiental.

Por ello también es necesario conocer el escenario global y las tendencias de liberación alrededor de varios sitios, puesto que pueden dar una imagen amplia de los contaminantes que se identifican en el aire ambiente que rodea a estas fuentes (12), y la forma en que pueden afectar la calidad ambiental, es trascendental tomar en cuenta estos efectos y encontrar estrategias y paradigmas que ayuden a mejorar la situación (15). En tal efecto, la presente investigación parte de analizar la calidad del aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, mediante el modelo de dispersión Pluma.

Planteamiento del problema

La contaminación del aire mata aproximadamente a siete millones de personas en todo el mundo cada año (2). Los datos de la OMS muestran que 9 de cada 10 personas respiran aire que excede los límites de las pautas de la OMS que contienen altos niveles de contaminantes y los países de ingresos bajos y medianos sufren las exposiciones más altas (19).

En la actualidad el ser humano diariamente respira entre 13 a 15 kg de aire, y debido a la presencia de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, es probable que se pueda producir daños tanto a la flora, fauna, al ambiente y especialmente en el hombre, provocando un sinnúmero de enfermedades crónicas, generalmente respiratorias y cardiovasculares (20).

Uno de los muchos contaminantes existentes es el material particulado, que se refiere a una materia microscópica en estado líquido o sólido en la capa atmosférica (21). El material particulado es la suma de estos componentes sólidos y líquidos que se encuentran

suspendidos en el aire generan un impacto negativo (22). Tanto componentes orgánicos como inorgánicos tienen diferentes tamaños, composición y origen (23).

Entre más pequeñas son estas partículas, más profundamente pueden llegar al aparato respiratorio y ocasionar problemas en la respiración. La emisión puede ser PM10 o PM2.5, debido al aumento de la tasa de producción o al suministro de catalizador involucrado durante la producción (6).

Las fuentes antropogénicas más reconocidas de este contaminante son las industrias, el transporte, la agricultura, los residuos sólidos y los hogares en su afán de producir energía, abastecer de alimentos y servicios (3), estas pueden afectar la calidad del aire (24). Durante décadas, la extracción de recursos en sitios rurales, ha generado mezclas de compuestos potencialmente tóxicos y por ende altamente cancerígenos (20).

Las refinerías son una de las industrias que liberan en proceso de producción, tuberías, bridas, válvulas, tanques de almacenamiento y zonas de desechos (25) diferentes de contaminación atmosférica tóxica, que se quedan suspendidas en el aire, entre ello se ha incluido el benceno, el plomo y el cianuro de hidrógeno que causan cáncer (6). Además del cáncer, la contaminación de las refinerías puede provocar problemas respiratorios, defectos de nacimiento y problemas neurológicos (18). El procesamiento petroquímico de petróleo y gas genera corrientes de escape cargadas con residuos químicos y gaseosos potencialmente dañinos (2). Las fugas, las llamaradas y el exceso de emisiones de las refinerías emiten contaminantes atmosféricos peligrosos, o tóxicos del aire, que se sabe o se sospecha que causan cáncer, defectos de nacimiento y tienen un impacto grave en el medio ambiente (18).

Las actividades industriales son las principales responsables de la alteración de la calidad del aire en el ambiente, por tales motivos es necesario buscar otras formas de solucionar el problema (26). A medida que las industrias liberan una serie de contaminantes al aire circundante, se debe comprender las fuentes de contaminación en estas industrias y la naturaleza de los contaminantes, a fin de desarrollar estrategias de control efectivas (17). Conocer el escenario global y las tendencias de liberación alrededor de varios sitios en el mundo puede darnos una imagen amplia de los contaminantes que se están identificando en el aire ambiental que rodea a estas fuentes y la forma en que pueden afectar la calidad del aire.

Para gestionar los posibles impactos en la salud, es importante implementar una gestión adecuada de la calidad del aire comprendiendo el vínculo entre las fuentes de contaminantes específicas y la exposición resultante de la población (27).

El Ecuador es un país petrolero, por ende, las industrias de este tipo tienen gran fuerza en el mismo ya que es un elemento vital de la economía nacional. Sin embargo, los peligros ambientales potenciales asociados a sus procesos de extracción, transporte y refinación han causado una mayor preocupación en las comunidades cercanas a ellas (17). La única refinería existente se encuentra ubicada en la provincia de Esmeraldas, misma que está asentada en la zona urbana y hasta el momento no se cuenta con información puntual precisa sobre las concentraciones del contaminante (PM10) en el aire de esta zona.

Teniendo en cuenta que es una zona urbana y por tanto concurrida por peatones y vehículos y que no se cuenta con mediciones locales de PM10 en la zona de estudio, se formula como problema: ¿Cuál es el estado de la calidad del aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, mediante el modelo de dispersión Pluma?

Justificación

Todo el mundo está expuesto a la contaminación del aire. Este tipo de contaminación, incluso en niveles bajos, tiene un impacto en la salud humana (28). La ciencia ha demostrado claramente que la contaminación del aire provoca enfermedades, aumenta las hospitalizaciones e incluso la muerte prematura (29).

Si bien la contaminación del aire es una de las principales preocupaciones del nuevo mundo civilizado, que genera un problema toxicológico grave en el ser humano y el ambiente (30). Tiene varias fuentes de emisión diferentes, pero los vehículos de motor y los procesos industriales contribuyen con la mayor parte de la contaminación del aire (31).

Según la OMS, la exposición a altos niveles de contaminación del aire causados por procesos industriales puede provocar una variedad de resultados adversos para la salud (32). Por lo tanto, aumentan el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas y cáncer de pulmón (26).

Los contaminantes más dañinos para la salud, estrechamente asociados con una mortalidad prematura excesiva, son partículas finas de PM2.5 emitidas en procesos

industriales, mismas que penetran profundamente en los conductos pulmonares (33). La exposición prolongada a las concentraciones actuales de partículas en el ambiente puede conducir a una marcada reducción de la esperanza de vida (1).

Hoy en día, numerosos problemas de salud pueden deberse a la contaminación del aire exterior que involucra los "sistemas corporales respiratorio, cardiovascular, inmunológico, hematológico, neurológico y reproductivo / de desarrollo" (8). La mayoría de los problemas de salud giran en torno al sistema respiratorio, ya que generalmente se inhalan por la boca y la nariz (34). Puesto que las emisiones de la industria del petróleo se producen en todas las cadenas del proceso de producción de petróleo, desde la extracción hasta la fase de consumo (13).

En el contexto de este estudio la concentración de material particulado depende de múltiples fuentes puntuales como las emitidas por las chimeneas de la refinería de esmeraldas, lineales o móviles que corresponden al tránsito vehicular y de área que corresponden a los hogares, quemas agrícolas entre otras.

En vista de que la refinería de esmeraldas es una de las actividades industriales más significativas de la provincia de Esmeraldas, es necesario conocer cuál es la calidad del aire cerca de sus inmediaciones, ya que el aumento de la contaminación tiene efectos adversos sobre la salud humana debido a la toxicidad del petróleo (35), por ello también es necesario comprender las fuentes de contaminación en estas industrias y la naturaleza de los contaminantes, con el fin de desarrollar estrategias de control efectivas (23).

Pese a que la información sobre emisiones de partículas y gases de la refinería de petróleo en Esmeraldas es muy limitada (28). Surge la necesidad de analizar la calidad del aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, mediante el modelo de dispersión Pluma, como una herramienta para predecir la concentración de contaminantes del aire; con ello también se requiere conocer la estimación de emisiones de fuentes estacionarias y los posibles impactos sobre la calidad del aire local y regional para comprender la sostenibilidad ambiental.

Las fuentes de material particulado son muchas por esto se hace prácticamente imposible separarlas unas de otras, es por ello que para este estudio se han clasificado en puntuales (chimeneas de la refinería), lineales (tránsito vehicular), de área (hogares, quemas agrícolas entre otras).

Objetivos

General

Analizar la calidad del aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, mediante el modelo de dispersión gaussiana de la pluma de emisión.

Específicos

- Analizar siguiendo los modelos de dispersión gaussiana teniendo en cuenta factores como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad y orientación del viento, así como la distancia y orientación respecto de la dirección del viento.
- Registrar las concentraciones de material particulado PM10 y material particulado fino PM2.5 en un área poblada extensa orientada hacia el este de las chimeneas. En lugares próximas a las chimeneas con una distancia inferior a los 4 km.
- Registrar las concentraciones de material particulado, teniendo en cuenta la variable temporal desde diversas perspectivas: Ciclo semanal, y ciclo diario. Durante todos los días de la semana, y en diversas franjas horarias ayudando a realizar un mejor seguimiento de las emisiones cambiantes de las chimeneas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Bases teóricas y Científicas

Atmósfera

La atmósfera es el manto de gases que rodea la Tierra. Se mantiene cerca de la superficie del planeta por la atracción gravitacional de la Tierra (36).

Sin la atmósfera no podría haber vida en la Tierra. La atmósfera: contiene el aire que respiramos, protege la vida de las radiaciones nocivas del sol, ayuda a evitar que el calor solar del planeta se escape al espacio, es un elemento importante del ciclo del agua, mantiene el clima de la Tierra moderado en comparación con el de otros planetas (37).

La atmósfera está formada por una mezcla de gases, principalmente nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono (38). Alcanza más de 500 km sobre la superficie del planeta. No existe un límite exacto entre la atmósfera y el espacio exterior. Los gases atmosféricos se vuelven más delgados cuanto más alto asciendes (39). La atmósfera se vuelve cada vez menos densa, hasta que se "mezcla" con el espacio exterior.

La atmósfera se divide en cinco capas diferentes, según la temperatura. La capa más cercana a la superficie de la Tierra es la troposfera, que se extiende entre siete y 15 kilómetros (cinco a 10 millas) de la superficie (40). La troposfera es más gruesa en el ecuador y mucho más delgada en los polos norte y sur. La mayor parte de la masa de toda la atmósfera está contenida en la troposfera, entre aproximadamente el 75 y el 80 por ciento (41). La mayor parte del vapor de agua en la atmósfera, junto con el polvo y las partículas de ceniza, se encuentra en la troposfera, lo que explica por qué la mayoría de las nubes de la Tierra se encuentran en esta capa. Las temperaturas en la troposfera disminuyen con la altitud (42).

La estratosfera es la siguiente capa desde la superficie de la Tierra. Se extiende desde la parte superior de la troposfera, que se llama tropopausa, hasta una altitud de aproximadamente 50 kilómetros (30 millas) (43). Las temperaturas en la estratosfera aumentan con la altitud. Una alta concentración de ozono, una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno, constituye la capa de ozono de la estratosfera (44).

La parte superior de la estratosfera se llama estratopausa. Por encima de eso está la mesosfera, que llega hasta unos 85 kilómetros (53 millas) sobre la superficie de la Tierra (45). Las temperaturas disminuyen en la mesosfera con la altitud. De hecho, las temperaturas más frías de la atmósfera están cerca de la parte superior de la mesosfera, alrededor de -90°C (-130°F) (46).

La termosfera se encuentra por encima de la mesopausa y alcanza unos 600 kilómetros (372 millas). No se sabe mucho sobre la termosfera, excepto que las temperaturas aumentan con la altitud (47). La radiación solar hace que las regiones superiores de la termosfera se calienten mucho, alcanzando temperaturas de hasta 2.000°C (3.600°F).

La capa superior, que se mezcla con lo que se considera espacio exterior, es la exosfera (48). La atracción de la gravedad de la Tierra es tan pequeña aquí que las moléculas de gas escapan al espacio exterior (23).

Contaminantes en la atmósfera

La contaminación del aire se presenta en muchas formas, pero generalmente se puede considerar como contaminantes gaseosos y particulados que están presentes en la atmósfera terrestre (49). Los productos químicos vertidos al aire que tienen un impacto directo en el medio ambiente se denominan contaminantes primarios. Estos contaminantes primarios a veces reaccionan con otros químicos en el aire para producir contaminantes secundarios (50).

La contaminación del aire generalmente se divide en dos categorías: contaminación del aire exterior y contaminación del aire interior. La contaminación del aire exterior implica exposiciones que tienen lugar fuera del entorno construido (44). Los ejemplos incluyen partículas finas producidas por la quema de carbón, gases nocivos como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono; ozono a nivel del suelo y humo de tabaco (45). La contaminación del aire interior implica la exposición a partículas, óxidos de carbono y otros contaminantes transportados por el aire o el polvo interiores (46). Los ejemplos incluyen productos y químicos para el hogar, desgasificación de materiales de construcción, alérgenos (caída de cucarachas y ratones, moho, polen) y humo de tabaco.

Las fuentes de contaminantes del aire son particularmente abundantes en los centros de población industrial modernos(37). Las fuentes principales incluyen plantas de energía y calefacción, plantas de fabricación industrial y vehículos de transporte.

Existen varios tipos de fuentes de contaminación del aire, entre ellos puede ser una fuente estacionaria de contaminación del aire se refiere a una fuente de emisión que no se mueve, también conocida como fuente puntual. Las fuentes estacionarias incluyen fábricas, plantas de energía y tintorerías (51). El término fuente de área se usa para describir muchas fuentes pequeñas de contaminación del aire ubicadas juntas cuyas emisiones individuales pueden estar por debajo de los umbrales de preocupación, pero cuyas emisiones colectivas pueden ser significativas (52). Los quemadores de leña residenciales son un buen ejemplo de una fuente pequeña, pero cuando se combinan con muchas otras fuentes pequeñas, pueden contribuir a los niveles de contaminación del aire locales y regionales (40). Las fuentes de área también se pueden considerar fuentes difusas, como la construcción de desarrollos de viviendas, lechos de lagos secos y vertederos.

Una fuente móvil de contaminación del aire se refiere a una fuente que es capaz de moverse por sus propios medios (41). En general, las fuentes móviles implican transporte "en la carretera", que incluye vehículos como automóviles, vehículos deportivos utilitarios y autobuses (42). Además, también hay una categoría "fuera de carretera" o "todoterreno" que incluye herramientas para césped y cortadoras de césped a gasolina, equipos agrícolas y de construcción, vehículos recreativos, barcos, aviones y trenes (53).

Las fuentes agrícolas surgen de operaciones que crían animales y cultivan cultivos, que pueden generar emisiones de gases y material particulado. Por ejemplo, los animales confinados en un establo o un área restringida producen grandes cantidades de estiércol (54). El estiércol emite varios gases, particularmente amoníaco al aire. Este amoníaco se puede emitir desde las casas de los animales, las áreas de almacenamiento de estiércol o desde la tierra después de que se aplica el estiércol (55). En la producción de cultivos, la aplicación incorrecta de fertilizantes, herbicidas y pesticidas puede potencialmente resultar en la deriva aérea de estos materiales y causar daños.

A diferencia de las fuentes de contaminación del aire antes mencionadas, la contaminación del aire causada por fuentes naturales no es causada por personas o sus actividades (43). Un volcán en erupción emite partículas y gases, los incendios de bosques y praderas pueden emitir grandes cantidades de "contaminantes", las tormentas de polvo

pueden crear grandes cantidades de partículas, y las plantas y los árboles emiten de forma natural compuestos orgánicos volátiles que pueden formar aerosoles que pueden causar un efecto natural. neblina azul (56). Los animales salvajes en su hábitat natural también se consideran fuentes naturales de "contaminación".

Contaminantes primarios

Los contaminantes del aire que se encuentran con mayor frecuencia son las partículas, el ozono a nivel del suelo, el monóxido de carbono, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y el plomo (36). Estos contaminantes pueden dañar la salud y el medio ambiente y causar daños a la propiedad. De los seis contaminantes, la contaminación por partículas y el ozono a nivel del suelo son las amenazas para la salud más generalizadas (45).

El ozono a nivel del suelo no se emite directamente al aire, sino que se crea mediante reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno (NOx) y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) en presencia de la luz solar (57). Las emisiones de las instalaciones industriales y los servicios eléctricos, los gases de escape de los vehículos de motor, los vapores de gasolina y los disolventes químicos son algunas de las principales fuentes de NOx y COV (44). Respirar ozono puede desencadenar una variedad de problemas de salud, especialmente en los niños, los ancianos y las personas de todas las edades que padecen enfermedades pulmonares como el asma (58). El ozono a nivel del suelo también puede tener efectos nocivos sobre la vegetación y los ecosistemas sensibles (49). (El ozono a nivel del suelo no debe confundirse con la capa de ozono, que está en lo alto de la atmósfera y protege a la Tierra de la luz ultravioleta; el ozono a nivel del suelo no brinda tal protección) (43).

El material particulado, también conocido como contaminación por partículas, es una mezcla compleja de partículas extremadamente pequeñas y gotitas de líquido (59). La contaminación por partículas está formada por varios componentes, incluidos ácidos (como nitratos y sulfatos), productos químicos orgánicos, metales y partículas de tierra o polvo (54). El tamaño de las partículas está directamente relacionado con su potencial para causar problemas de salud (53). La EPA está preocupada por las partículas que tienen 10 micrómetros de diámetro o menos porque esas son las partículas que generalmente pasan a través de la garganta y la nariz y entran a los pulmones (52). Una vez inhaladas, estas partículas pueden afectar el corazón y los pulmones y causar efectos graves a la salud.

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro emitido por los procesos de combustión. A nivel nacional y, particularmente en las áreas urbanas, la mayoría de las emisiones de CO al aire ambiente provienen de fuentes móviles (20). El CO puede causar efectos nocivos para la salud al reducir el suministro de oxígeno a los órganos (como el corazón y el cerebro) y los tejidos del cuerpo. En niveles extremadamente altos, el CO puede causar la muerte.

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es uno de un grupo de gases altamente reactivos conocidos como "óxidos de nitrógeno" u óxidos de nitrógeno (NO_x). Otros óxidos de nitrógeno incluyen ácido nitroso y ácido nítrico (45). El Estándar Nacional de Calidad del Aire Ambiental de la EPA utiliza NO₂ como indicador para el grupo más grande de óxidos de nitrógeno (50). El NO₂ se forma rápidamente a partir de las emisiones de automóviles, camiones y autobuses, plantas de energía y equipos todoterreno (35). Además de contribuir a la formación de ozono a nivel del suelo y la contaminación por partículas finas, el NO₂ está relacionado con una serie de efectos adversos en el sistema respiratorio.

El dióxido de azufre (SO₂) es uno de un grupo de gases altamente reactivos conocidos como "óxidos de azufre". Las mayores fuentes de emisiones de SO₂ provienen de la quema de combustibles fósiles en las centrales eléctricas (73%) y otras instalaciones industriales (20%) (52). Las fuentes más pequeñas de emisiones de SO₂ incluyen procesos industriales como la extracción de metales del mineral y la quema de combustibles con alto contenido de azufre en locomotoras, barcos grandes y equipos no viales (53). El SO₂ está relacionado con una serie de efectos adversos en el sistema respiratorio.

El plomo es un metal que se encuentra naturalmente en el medio ambiente y en los productos manufacturados (39). Históricamente, las principales fuentes de emisiones de plomo han sido los combustibles en los vehículos de motor de carretera (como automóviles y camiones) y las fuentes industriales (60). Como resultado de los esfuerzos regulatorios en los EE. UU. Para eliminar el plomo de la gasolina de los vehículos de motor en las carreteras, las emisiones de plomo del sector del transporte disminuyeron drásticamente en un 95 por ciento entre 1980 y 1999, y los niveles de plomo en el aire disminuyeron en un 94 por ciento entre 1980 y 1999.

Hoy en día, los niveles más altos de plomo en el aire generalmente se encuentran cerca de las fundiciones de plomo. Las principales fuentes de emisiones de plomo al aire en la

actualidad son el procesamiento de minerales y metales y las aeronaves con motor de pistón que operan con gasolina de aviación con plomo (40).

Dispersión de contaminantes en la atmosfera

Una vez en el medio ambiente, los contaminantes del aire pueden dispersarse a través del aire, el agua, el suelo, los organismos vivos y los alimentos. Las vías de dispersión varían mucho, dependiendo tanto de la fuente de emisión como del contaminante en cuestión (61). Las tasas y patrones de dispersión también dependen en gran medida de las condiciones ambientales. La dispersión de la contaminación en el aire se ve afectada por muchos factores (62):

- Condiciones meteorológicas (especialmente velocidad del viento, dirección del viento y estabilidad atmosférica)
- La altura de emisión (por ejemplo, fuentes a nivel del suelo como el tráfico rodado o fuentes de alto nivel como chimeneas altas)
- Características geográficas locales y regionales
- La fuente (por ejemplo, un punto fijo, como una chimenea, o un número difuso de fuentes, como automóviles y disolventes).

Durante la dispersión, los contaminantes sufren una amplia gama de cambios y transferencias (45). La dilución se produce debido a la mezcla con el aire. La separación o acumulación de contaminantes ocurre sobre la base de las características físicas del contaminante (55). Se producen reacciones químicas que descomponen el contaminante original o lo convierten en nuevos compuestos (63). Algunos contaminantes también pueden eliminarse del medio de transporte mediante deposición, por ejemplo, sedimentando bajo los efectos de la gravedad, por lavado de lluvia o por interceptación (barrido) de plantas y otras obstrucciones (64).

Por tanto, muchos contaminantes muestran patrones de dispersión extremadamente complejos, especialmente en entornos como ciudades y pueblos donde hay un gran número de fuentes de emisión y grandes variaciones en las condiciones ambientales (14). Esta complejidad significa que a menudo es muy difícil modelar o medir patrones y

tendencias de contaminantes y, por lo tanto, predecir los niveles de exposición humana (16).

Las variaciones temporales en los niveles de contaminación son importantes. En muchos casos existen tendencias a largo plazo que reflejan cambios subyacentes en las tasas de emisión (por ejemplo, como resultado de cambios técnicos o económicos, o debido a la intervención de políticas) (34).

Superpuestos a estos, puede haber variaciones anuales, que reflejan las diferencias de un año a otro en el clima o la actividad de la fuente. Muchos contaminantes también muestran marcados patrones estacionales, semanales y diarios, debido a ciclos de actividad y efectos climáticos y de otro tipo a corto plazo (2). También pueden ocurrir episodios importantes de contaminación a corto plazo como resultado de liberaciones accidentales repentinas.

Por lo tanto, las medidas de exposición variarán según cuándo, dónde y durante cuánto tiempo se lleve a cabo la monitorización del aire (23).

Modelación atmosférica

Un modelo atmosférico es un modelo matemático construido alrededor del conjunto completo de ecuaciones dinámicas primitivas que gobiernan los movimientos atmosféricos (15). Puede complementar estas ecuaciones con parametrizaciones para difusión turbulenta, radiación, procesos húmedos (nubes y precipitación), intercambio de calor, suelo, vegetación, agua superficial, los efectos cinemáticos del terreno y convección. La mayoría de los modelos atmosféricos son numéricos, es decir, discretizan ecuaciones de movimiento (13).

Pueden predecir fenómenos a microescala como tornados y remolinos en la capa límite, flujos turbulentos a sub-microescala sobre edificios, así como flujos sinópticos y globales. El dominio horizontal de un modelo es global, que cubre toda la Tierra, o regional (área limitada), que cubre solo una parte de la Tierra (64). Los diferentes tipos de modelos ejecutados son termotrópicos, barotrópicos, hidrostáticos y no hidrostáticos. Algunos de los tipos de modelos hacen suposiciones sobre la atmósfera, lo que alarga los pasos de tiempo utilizados y aumenta la velocidad de cálculo (1).

Los pronósticos se calculan utilizando ecuaciones matemáticas para la física y la dinámica de la atmósfera (30). Estas ecuaciones no son lineales y son imposibles de resolver con exactitud. Por tanto, los métodos numéricos obtienen soluciones aproximadas. Los diferentes modelos utilizan diferentes métodos de solución. Los modelos globales a menudo utilizan métodos espectrales para las dimensiones horizontales y métodos de diferencias finitas para la dimensión vertical, mientras que los modelos regionales suelen utilizar métodos de diferencias finitas en las tres dimensiones (25). Para ubicaciones específicas, las estadísticas de salida del modelo utilizan información climática, salida de la predicción meteorológica numérica y observaciones meteorológicas de superficie actuales desarrollar relaciones estadísticas que tengan en cuenta el sesgo del modelo y los problemas de resolución.

Modelos de dispersión de la contaminación del aire

El movimiento de contaminantes en la atmósfera es causado por el transporte, la dispersión y la deposición. El transporte es un movimiento causado por un flujo de viento promediado en el tiempo (35). La dispersión resulta de la turbulencia local, es decir, movimientos que duran menos que el tiempo utilizado para promediar el transporte (65). Los procesos de deposición, que incluyen la precipitación, la captación y la sedimentación, provocan un movimiento descendente de contaminantes en la atmósfera, que finalmente eliminan los contaminantes a la superficie del suelo.

Hay cinco tipos de modelos de dispersión de la contaminación del aire, así como algunos híbridos de los cinco tipos:

Modelo de caja: el modelo de caja es el más simple de los tipos de modelos. Se asume que la cuenca de aire (es decir, un volumen dado de aire atmosférico en una región geográfica) tiene la forma de una caja (56). También asume que los contaminantes del aire dentro de la caja están distribuidos de manera homogénea y utiliza esa suposición para estimar las concentraciones promedio de contaminantes en cualquier lugar dentro de la cuenca de aire (23). Aunque es útil, este modelo tiene una capacidad muy limitada para predecir con precisión la dispersión de contaminantes atmosféricos en una cuenca de aire porque la suposición de una distribución de contaminantes homogénea es demasiado simple.

Modelo gaussiano: el modelo gaussiano es quizás el más antiguo (alrededor de 1936) y quizás el tipo de modelo más utilizado (40). Asume que la dispersión de contaminantes del aire tiene una distribución gaussiana, lo que significa que la distribución de contaminantes tiene una distribución de probabilidad normal (39). Los modelos gaussianos se utilizan con mayor frecuencia para predecir la dispersión de columnas de contaminación del aire continuo y flotante que se originan a nivel del suelo o fuentes elevadas. Los modelos gaussianos también se pueden usar para predecir la dispersión de columnas de contaminación del aire no continuas (llamados modelos de bocanadas) (60). El algoritmo principal utilizado en el modelado gaussiano es la ecuación de dispersión generalizada para una pluma de fuente puntual continua.

Modelo lagrangiano: un modelo de dispersión lagrangiano sigue matemáticamente las parcelas de plumas de contaminación (también llamadas partículas) a medida que las parcelas se mueven en la atmósfera y modelan el movimiento de las parcelas como un proceso de caminata aleatoria (37). A continuación, el modelo de Lagrange calcula la dispersión de la contaminación del aire calculando las estadísticas de las trayectorias de un gran número de parcelas de plumas de contaminación (60). Un modelo de Lagrange utiliza un marco de referencia móvil a medida que las parcelas se mueven desde su ubicación inicial (61). Se dice que un observador de un modelo lagrangiano lo sigue junto con la pluma.

Modelo euleriano: un modelo de dispersión euleriano es similar a un modelo lagrangiano en que también rastrea el movimiento de una gran cantidad de parcelas de plumas de contaminación a medida que se mueven desde su ubicación inicial (37). La diferencia más importante entre los dos modelos es que el modelo euleriano utiliza una cuadrícula cartesiana tridimensional fija como marco de referencia en lugar de un marco de referencia móvil (66). Se dice que un observador de un modelo euleriano observa pasar la pluma.

Modelo de gas denso: los modelos de gas denso son modelos que simulan la dispersión de columnas densas de contaminación por gas (es decir, columnas de contaminación que son más pesadas que el aire). Los tres modelos de gas denso más utilizados son (67):

- El modelo DEGADIS desarrollado por el Dr. Jerry Havens y el Dr. Tom Spicer en la Universidad de Arkansas por encargo de la Guardia Costera de los Estados Unidos y la EPA de Estados Unidos.

- El modelo LOSA desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore financiado por el Departamento de Energía de Estados Unidos, la Fuerza Aérea de Estados Unidos y el Instituto Americano del Petróleo.
- El modelo HEGADAS desarrollado por la división de investigación de Shell Oil.

Modelo de dispersión Gaussiano

El modelo gaussiano es quizás el más antiguo (alrededor de 1936) y quizás el tipo de modelo más utilizado. Asume que la dispersión de contaminantes del aire tiene una distribución gaussiana, lo que significa que la distribución de contaminantes tiene una distribución de probabilidad normal (68). Los modelos gaussianos se utilizan con mayor frecuencia para predecir la dispersión de columnas de contaminación del aire continuo y flotante que se originan a nivel del suelo o fuentes elevadas. Los modelos gaussianos también se pueden usar para predecir la dispersión de columnas de contaminación del aire no continuas (llamados modelos de bocanadas) (66). El algoritmo principal utilizado en el modelado gaussiano es la ecuación de dispersión generalizada para una pluma de fuente puntual continua (62).

Una vez que la pluma de contaminantes avanza en el mismo sentido del viento, el modelo de Gauss considera que el perfil de concentración por mezcla alcanza una distribución gaussiana. Si las condiciones atmosféricas son neutrales, se formará una pluma en forma de cono (66). La concentración de la línea central de la pluma es mayor en una ubicación muy cercana al foco del transmisor y disminuye en la dirección del viento (60). A medida que aumenta la distancia a favor del viento, el extremo de la pluma golpeará el suelo, como se muestra en la *Figura 1*.

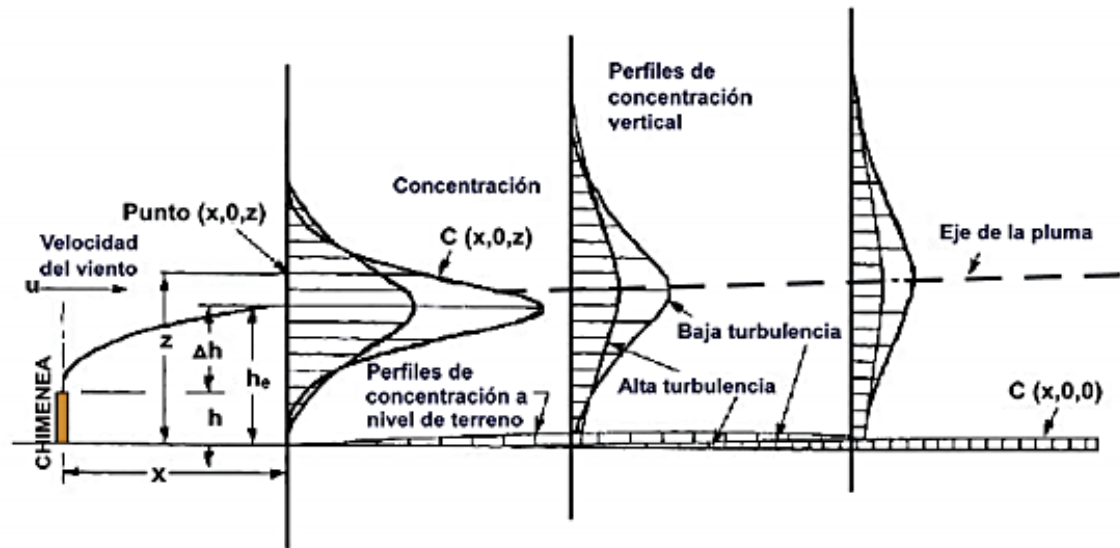


Figura 1 Progresión de la pluma en base a las turbulencias y parámetros de dispersión.

El modelo de la columna de humo gaussiana se basa en las siguientes formula:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Figura 2 Fórmula del modelo gaussiano.

Donde $C(x,y,z)$ es la concentración, Q es la cantidad de contaminante emitido por unidad de tiempo ($g\ s^{-1}$), u es la velocidad del viento y σ_y y σ_z son coeficientes de dispersión turbulenta que dependen de la clase de estabilidad y de la distancia al foco en la dirección del viento, x . En la ecuación anterior el suelo se trata como una superficie plana que no absorbe contaminante. El significado de las variables se muestra a continuación.

La concentración de contaminantes en cualquier punto $C(x,y,z)$ es la siguiente: donde U es la velocidad del viento, Q es la tasa de descarga, G es la curva gaussiana normalizada en el plano (es decir, el plano perpendicular a la dirección del viento) y X . La Figura 2 muestra la curva normal (curva gaussiana), utilizada para caracterizar el proceso aleatorio (67). La altura del centro en el eje vertical se denomina "valor medio" y el ancho de la curva se denomina desviación estándar (68). A medida que incrementa la distancia a favor del viento, disminuirá la concentración máxima en la línea central.

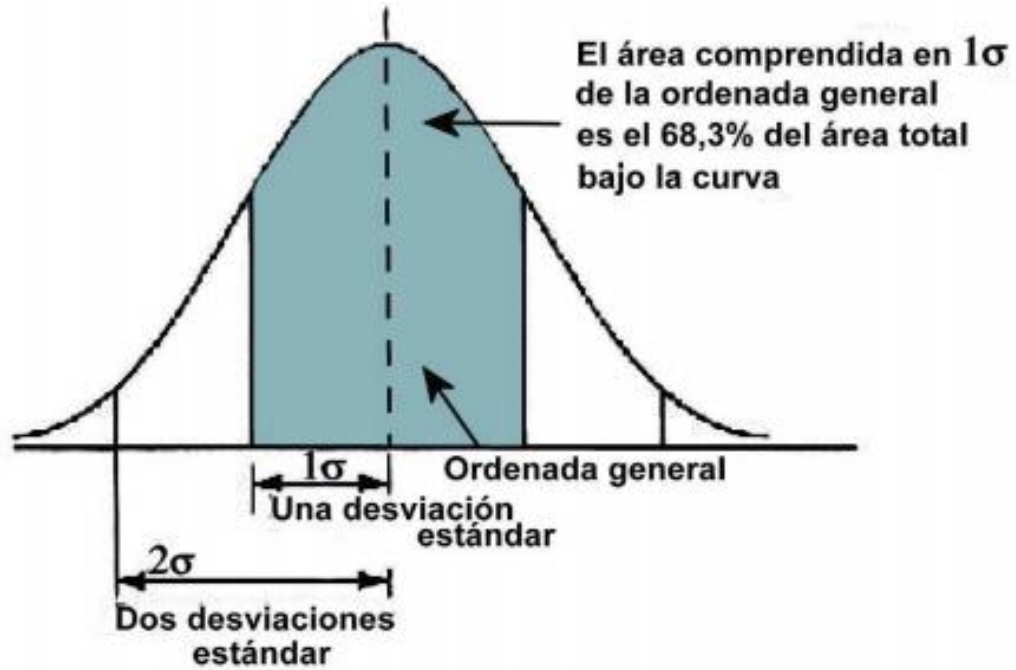


Figura 3 Curva de distribución Gaussiana

En la figura anterior 8 literal a, se muestra la evolución que puede tener la pluma en diferentes intervalos de tiempos (69). En cualquier instante, la pluma muestra su alrededor serpenteante (61). Por ejemplo, si a los 10 minutos o 1 hora el contorno se extiende, disminuirá la concentración de la línea central, tal y como se evidencia en la ilustración 8 literal b.

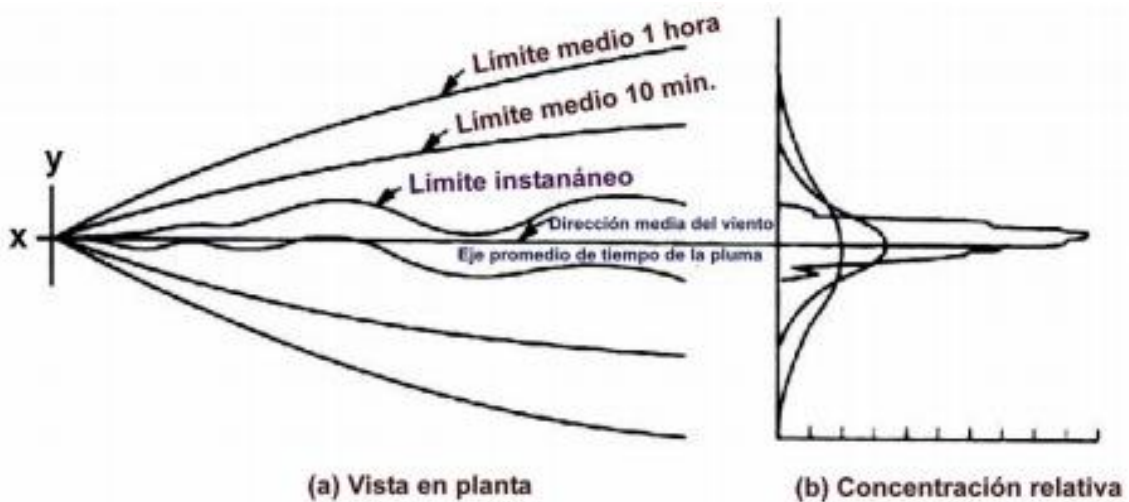


Figura 4 Cambios en la pluma respecto al tiempo transcurrido

Criterios básicos para una modelación de dispersión atmosférica de calidad

Los criterios básicos para una modelación de dispersión gaussiana se las incluye en tres categorías:

- a) Datos de la fuente: para ello es necesario tomar en cuenta la altura física de la chimenea y su diámetro interior, la temperatura, la ubicación de la chimenea y otras fuentes, la tasa de emisión de contaminantes y la velocidad de la chimenea. En el caso de la emisión de contaminantes suele expresarse como un promedio temporal (1 hora, 24 horas o 1 año) (36). Sin embargo, algunos modelos de dispersión pueden solicitar otros datos de entrada, como el tamaño de los edificios cercanos (por ejemplo, el ancho promedio del edificio y el espacio entre edificios), la elevación de la fuente y el terreno, la distribución del tamaño de partículas y sus correspondientes tasas de deposición y coeficientes.
- b) Datos meteorológicos: La mayoría de los modelos gaussianos aceptan datos meteorológicos de superficie que consideran la velocidad del viento y dirección, la clasificación de estabilidad horaria, la altura de la capa de mezcla, y la temperatura atmosférica (37). Es necesario tener datos meteorológicos durante al menos un año. Sin embargo, si solo algunos datos de largo plazo están únicamente disponibles en el sitio, las observaciones puntuales para la región, pueden ser conseguidas a partir de estas, siempre y cuando se haya realizado una revisión previa de aquellos datos. Cuando sea necesario, se debe instalar y operar una estación meteorológica local durante al menos un año.
- c) Datos de los receptores: La identificación y programación de todos los receptores. El receptor generalmente se especifica por sus coordenadas y elevación (70).

Los resultados obtenidos del modelo de dispersión de Gauss suelen ser una representación gráfica, en el cual se expresa la concentración de contaminantes en los alrededores del área (71). El gráfico consta de concentraciones calculadas en relación con la distancia, la concentración, la altura y otros parámetros. Después de graficar los resultados, se valúan los datos calculados (37). Para evaluar los gráficos se deben comparar con el área local, tomando en cuenta las normas de calidad de aire y con ello identificar las posibles áreas en las que el contaminante cumple con los niveles establecidos.

1.2. Antecedentes

En la actualidad la contaminación del aire es uno de los problemas que causa afectaciones de manera preocupante a los seres vivos. Por lo general este tipo de contaminación está compuesta por cantidades de dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono y material particulado (16). Hoy en día para conocer la calidad del aire y la dispersión de los contaminantes se emplean métodos y fórmulas matemáticas y numéricas para representar los procesos químicos físicos que perturban los contaminantes cuando se expanden y reanudan en la atmosfera (5). A continuación, se detallan sucintamente diferentes estudios relacionados con el tema de investigación estudiado.

En las zonas urbana de México, la contaminación del aire se ha vuelto un tema de preocupación para los habitantes, ante ello Luis Pineda (72) realizó un estudio titulado “Dispersion of atmospheric coarse particulate matter in the San Luis Potosí, Mexico, urban area” . Para ello en los meses de junio 2003 a mayo 2004, se tuvo que recolectar diariamente 177 muestras con un grupo de alto rendimiento en la zona urbana de San Luis Potosí; cabe recalcar que para ello utilizaron filtros de fibra de cuarzo. Se llevaron a cabo una serie de experimentos de simulación numérica durante el mismo período de medición para estudiar la concentración de salud (PM) en el área urbana. Si bien la circulación atmosférica varía mucho de un año a otro, la interpretación de los resultados mostró que existe un patrón de circulación estacional preferencial: viento del suroeste en invierno y viento del sureste en verano. Por otro lado, los resultados reflejaron que las altas concentraciones de PM están directamente conexas con las características específicas de la circulación atmosférica.

Por otro lado, en Cuba existe gran connotación por el aumento de la contaminación atmosférica, Raisa Bridón (28) aportó datos importantes en un estudio de caso titulado La dispersión atmosférica de contaminantes en una zona industrial de Cuba. El trabajo actual tiene como propósito evaluar la expansión local de contaminantes tales como PM, NOx y SO₂. Para ello el autor utilizó el sistema de modelo de dispersión gaussiana de contaminantes AERMOD. Para estudiar la expansión de los contaminantes se tomaron en consideración el entorno rural y urbano. La concentración de SO₂ ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) se determinó dentro de 1 h y 24 h y dentro de 1 año, excediendo el límite permitido (500, 50 y 20 $\mu\text{g} / \text{m}^3$). De manera similar, para cada período, se registró el número de veces que la concentración de SO₂ en cada ambiente analizado (urbano: 39, 61 y 39; rural: 99, 75 y

25) excedió el nivel de referencia. Se encontró que, en el año de modelización, la concentración de 39 receptores (ocupando 9,75 km² en el medio urbano) excedió el valor de referencia, y también alcanzó los 25 6,25 kilómetros cuadrados en el medio rural). Por otro lado, para los contaminantes de dióxido de nitrógeno y PM, sus niveles estaban por debajo de los valores establecidos. Y para finalizar el autor concluye que, mediante el caso de estudio, se demostró el potencial de los sistemas AERMOD en el estudio de la difusión de contaminantes atmosféricos.

Mariam Fonseca (73), en el mismo lugar realizó una publicación sobre el estudio del impacto en la calidad del aire de las fuentes puntuales en la ciudad De Pinar Del Río. En el utilizó el sistema de modelación MM5-CALMET-CALPUFF. Y se realizó una simulación de dispersión de cuatro contaminantes tales como: PM10-20, SO₂, CO Y NO_x; expuestas por las 22 fuentes fijas y en días lluviosos. Una vez aplicada la metodología, los resultados reflejaron que se daban máximas concentraciones en la jornada de la mañana, además fue notorio que la expansión de estos contaminantes a afectado a las zonas aledañas de la ciudad y, por último, se reflejó que existían altas concentraciones de concentraciones de SO₂ y NO_x, por ende, sobrepasaban los límites máximos permisibles.

En el país de Bolivia, Juan Serrano (65), realizo un estudio similar al anterior, titulado “Estudio comparativo de la simulación de dispersión de contaminantes en la atmósfera para estudios de impacto ambiental”. Este artículo tiene como propósito comparar dos programas informáticos para representar la expansión de contaminantes en la atmósfera alrededor de las centrales térmicas. El primero de ellos fue el programa The Air Pollution Model 2.0 (TAPM) y el segundo Industrial Source Complex Short Term 3.0 (ISCST3). El ISC significa el modelo tradicional de difusión de contaminantes, que utiliza aproximaciones teóricas o semi-empíricas de nubes o plumas gaussianas y datos meteorológicos obtenidos previamente en la ubicación objetivo. Estos modelos son válidos computacionalmente, pero tienen la desventaja de que requieren al menos todas las horas del año para recopilar datos meteorológicos de dichos sitios y no son adecuados para terrenos complicados o corrientes de aire con condiciones complicadas. Finalmente, el autor afirma que para un EIA se puede emplear el ISC como un instrumento de cálculo sencillo y económico, siempre y cuando se cuente con la información meteorológica; a diferencia del TAPM puede ser utilizado para computar y manifestar detalladamente los

valores de contaminación y los modeladores de flujo concernientes con la expansión de contaminantes en un lugar determinado.

En la mayoría de los países, especialmente en Chile y Colombia, el modelo de dispersión atmosférica es de importancia global para el control e implementación de redes de monitoreo o control de emisiones a nivel industrial. Jorge Cabrera (74) ha realizado un estudio aplicando un modelo de dispersión atmosférica, este modelo SCREEN3 es un modelo de dispersión de tipo gaussiano que obtiene datos de dispersión atmosférica (altura de pluma, Máxima concentración y parámetros de dispersión laterales y verticales. Este método permitió explicar diversos aspectos y a su vez conocer específicamente variables y valores de las entradas y salidas. Los resultados del modelo muestran que es obligatorio intervenir en el trabajo del SEIA para aseverar que el modelo atmosférico se emplee según los requisitos legales y tenga usos razonables y correctos. Esto también requiere procesos de implementación y mantenimiento que permitan a los evaluadores, analistas y tomadores de decisiones comprender el conocimiento y las capacidades desde la perspectiva de un modelo descentralizado.

En Ecuador a diario se da altos niveles de expansión gaseosa, esta expansión es producto de la emisión de varios contaminantes en la atmosfera. Por ejemplo, Daniel Pereira (74) en el año 2016 realizo un estudio llamado “Simulation of pollutant dispersion in the atmosphere of biomass power plant”. La presente investigación consistió en realizar una simulación de la expansión de contaminantes en el aire. El estudio fue realizado en la parte amazónica del Ecuador, el autor expresa que para ello fue necesario contar con los datos meteorológicos del área, clases de climas y un diagnóstico ambiental del lugar. Posterior a ello se utilizó las fórmulas matemáticas del método Gauss (utilizada para medir partículas y gases en la atmósfera).

En este estudio se concluye que los contaminantes del aire pueden dispersarse a través del aire, el agua, el suelo, los organismos vivos y los alimentos. Las vías de dispersión varían mucho, dependiendo tanto de la fuente de emisión como del contaminante en cuestión. Las tasas y patrones de dispersión también dependen en gran medida de las condiciones ambientales. La dispersión de la contaminación en el aire se ve afectada por muchos factores:

- condiciones meteorológicas (especialmente velocidad del viento, dirección del viento y estabilidad atmosférica),

- la altura de emisión (por ejemplo, fuentes a nivel del suelo como el tráfico rodado o fuentes de alto nivel como chimeneas altas)
- características geográficas locales y regionales,
- la fuente (por ejemplo, un punto fijo, como una chimenea, o un número difuso de fuentes, como automóviles y disolventes).

En el mismo año, en la provincia de Tulcán, Carlos Ordoñez (75) publicó un estudio de caso con el tema “Application of simplified models for dispersion of air pollutants”. Este trabajo tiene como objetivo comparar y analizar diferentes modelos de dispersión atmosférica simplificado View tipo I. Para ello se utilizan las interfaces del modelo Berlyand, SCREEN3 y Web Gauss. La concentración máxima obtenida por el modelo de Clase I muestra similitud, más que la distancia a estos valores. La distancia obtenida por Berlyand es la más corta, lo que limita enormemente el análisis espacial de la difusión de contaminantes.

Para seguir con la metodología se utilizaron las interfaces de los modelos Berlyand, SCREEN3 y Web Gauss. Los niveles máximos obtenidos a través de los modelos de Nivel I manifiestan semejanza, no comportándose así, los trayectos a las cuales se consiguen dichos valores. Las distancias menores se alcanzaron mediante el método del Berlyand, lo cual restringe en gran medida el estudio espacial de los contaminantes. La importancia de esta investigación es poder demostrar y afirmar que los simuladores empleados pueden ser un instrumento muy práctico para cualquier tipo de empresa que desee evaluar el impacto ambiental de fuentes fijas.

Los resultados obtenidos a través de este trabajo utilizando el simulador de difusión de contaminantes atmosféricos muestran que el dióxido de azufre es el principal contaminante emitido por la chimenea UEB "Julio A. Mella", y su concentración supera la concentración máxima en todos los casos en cumplimiento de la normativa.

Como se mencionó anteriormente, los modelos de dispersión son un mecanismo de suma importancia puesto que consideran los procesos químicos y físicos que rigen a los contaminantes. Por lo tanto, la simulación es una metodología que permite resolver ecuaciones relacionando un fenómeno y una situación real. Manzur Benzal (72) publicó un artículo que tuvo como propósito realizar una simulación de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Esta simulación la realizó para comprobar la existencia de contaminantes tales como el CO y el SO₂. El programa utilizado se llama MATLAB, fue empleado para conocer la altura de la chimenea y la velocidad del viento. Además de ello se complementó las simulaciones con el modelado de calidad de aire de EPA: SCREEN3 MODEL * VERSION DATED 96043, esto con el propósito de cotejar los valores de las concentraciones de monóxido de carbono y dióxido de azufre (automatizadas en MATLAB). Con ello se concluyó, que los valores simulados en MATLAB no superan el límite máximo permisible para la protección del ser humano, por ende, dichos valores se encuentran dentro de los rangos permitidos.

Y para finalizar Edgar Vivar (76) en el 2015 realizó un estudio muy similar, pero a la vez más detallado y limitado. El objetivo principal de esta investigación es ayudar a evaluar la calidad del aire en Azogues mediante el seguimiento cuantitativo de la concentración de partículas PM₁₀ en 3 puntos específicos de la ciudad. Se rota cada cuatro días y sigue los procedimientos prescritos por Ecuador. Esto se lo hizo mediante monitoreos con el Muestreador de Alto Volumen (High Volume Sampler, HVS), empleando filtros de microfibra de cuarzo. La investigación se la hizo entre los meses de agosto 2014 hasta febrero 2015.

Según los resultados obtenidos, la concentración diaria promedio de PM₁₀ durante el semestre de monitoreo fue de 70.3 µg / m³. Aunque no superó el estándar de calidad del aire de Ecuador de 100 µg / m³, sí superó las regulaciones de la Organización Mundial de la Salud (76). El límite máximo de la normativa sanitaria es de 50 µg / m³, y esta población enfrentará el desarrollo de determinadas enfermedades, especialmente respiratorias. La concentración más alta fue en febrero, mientras que la concentración más baja fue en diciembre. La concentración de material particulado en PM₁₀ excede las regulaciones de Ecuador, que son 14% y 70% del estándar de la OMS. Desafortunadamente, ninguna agencia ha evaluado el impacto negativo en la salud de los residentes.

1.3. Marco legal

La investigación se sustentará en una estructura legal contemplada en:

La Constitución del Ecuador 2008, misma que expresa en el Artículo 14 que los residentes tienen derecho a un medio ambiente sano y Equilibrio ecológico, asegurando un

desarrollo sostenible y una buena vida. Prueba (77). Proteger el medio ambiente, proteger el medio ambiente La integridad del ecosistema, la biodiversidad y el patrimonio genético del país, Prevenir daños ambientales y restauración de áreas degradadas. De igual manera el artículo 31 está ligado al tema de investigación el cual manifiesta que las personas tienen derecho a disfrutar plenamente de la ciudad y su espacio (78). El público, de acuerdo con los principios de desarrollo sostenible y justicia social, respeta las diferencias. Cultura urbana y equilibrio entre zonas urbanas y rurales. Ejercicio de derechos La ciudad se basa en su gestión democrática, sus funciones sociales y ambientales. Propiedad y ciudad, y ejercer plenamente la ciudadanía.

En el caso particular del artículo 66 reconoce y garantiza el derecho de las personas a vivir en un medio ambiente sano, Equilibrio ecológico, libre de contaminación y armonioso con la naturaleza (77). El artículo 396 establece que el Estado adoptará políticas y medidas adecuadas para prevenir Impacto ambiental negativo. Según el artículo 397, en caso de daño ambiental, el Estado debe tomar las acciones correspondientes. Se utilizan métodos inmediatos y auxiliares para asegurar la salud y restauración del ecosistema, y se deben establecer mecanismos efectivos de prevención y control. Contaminación ambiental. Y por último el artículo 399 estipula que el medio ambiente y Se pasará la corresponsabilidad para la preservación de la ciudadanía Sistema de gestión ambiental nacional descentralizado.

A nivel internacional, existen una serie de tratados, de los cuales Ecuador es Suscriptores, esto es parte del marco regulatorio de gestión de la calidad del aire. Entre ellos los más relacionados al tema de investigación se encuentra la Convención de Viena, ésta fue la primera convención de cualquier tipo que firmaron todos los países involucrados, entró en vigor en 1988 y alcanzó la ratificación universal en 2009 (79). Esto habla de la enormidad del agotamiento del ozono en ese momento y la voluntad de los países de todo el mundo para trabajar juntos para resolverlo. La Convención tenía como objetivo promover la cooperación entre las naciones mediante el intercambio de información sobre los efectos de las actividades humanas en la capa de ozono. Al hacerlo, los creadores de la Convención esperaban que los formuladores de políticas adoptaran medidas para combatir las actividades responsables del agotamiento del ozono.

Por otro lado, se encuentra el Protocolo de Montreal sobre sustancias que agotan la capa de ozono (Protocolo de Montreal) es un acuerdo internacional celebrado en 1987. Fue diseñado para detener la producción e importación de sustancias que agotan la capa de

ozono y reducir su concentración en la atmósfera para ayudar a proteger la capa de ozono de la tierra (80). Mismo que establece obligaciones vinculantes de eliminación progresiva para los países desarrollados y en desarrollo de todas las principales sustancias que agotan la capa de ozono, incluidos los clorofluorocarbonos (CFC), los halones y los productos químicos de transición menos dañinos como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC)

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático es otro tratado ambiental internacional que aborda el cambio climático, negociado y firmado por 154 estados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNCED), conocida informalmente como la Cumbre de la Tierra (81). La CMNUCC busca la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evite la peligrosa interferencia antropogénica inducida por humanos con el sistema climático de la Tierra.

Y por último se incluye al Protocolo de Kioto, en las 192 naciones se comprometieron a reducir sus emisiones en un promedio del 5,2% para 2012, lo que representaría alrededor del 29% de las emisiones totales del mundo (82). A los países que ratificaron el Protocolo de Kioto se les asignaron niveles máximos de emisión de carbono para períodos específicos y participaron en el comercio de créditos de carbono. Si un país emitiera más de su límite asignado, entonces recibiría un límite de emisiones más bajo en el período siguiente.

Los objetivos para el primer período de compromiso del Protocolo de Kioto cubren las emisiones de los seis principales gases de efecto invernadero, a saber: Dióxido de carbono (CO₂); Metano (CH₄); Óxido nitroso (N₂O); Hidrofluorocarbonos (HFC); Perfluorocarbonos (PFC); y hexafluoruro de azufre (SF₆)

Siguiendo el orden jerárquico estipulado en la legislación ambiental, se encuentra el COA, conocido también como el Código Orgánico del Ambiente. Cabe recalcar que, una vez adoptado el COA, quedan derogadas las leyes ambientales que existían anteriormente. Por lo tanto, engloba la política ambiental (83).

Ante ello el artículo 27 expresa en el marco de las competitividades ambientales autónomas y paralelas, en el ejercen las siguientes competencias de acuerdo con las políticas y normativas promulgadas por el gobierno provincial autónomo y la Administración Nacional del Ambiente: Inspeccionar la aplicación de normas técnicas de

los componentes fuego, suelo, agua, y aire y a su vez que se cumpla con los estándares ambientales.

Según el artículo 191 la Agencia Nacional de Medio Ambiente o el gobierno autónomo descentralizado coordinará con otras autoridades competentes según corresponda para monitorear la calidad del aire, agua y suelo de acuerdo con los reglamentos y normas técnicas emitidas para el plan. Las normas técnicas se publicarán y actualizarán periódicamente de acuerdo con las reglas especificadas en esta especificación (83). La autoridad competente promoverá y fomentará la generación de información, así como la investigación sobre contaminación atmosférica, cuerpos de agua y suelo, para determinar sus causas, efectos y métodos alternativos para reducir su generación.

Y por último en el artículo 193 hace referencia a que los GAD o la AAC deberán realizar evaluaciones a los operadores o propietarios de fuentes que emitan o puedan emitir olores desagradables o contaminantes atmosféricos peligrosos con una evaluación complementaria (19). Esta norma técnica determinará las técnicas, procesos, metodologías o tecnologías para disminuir o eliminar las fuentes de emisión de olores y contaminantes atmosféricos peligrosos.

Acompañado de lo antes mencionado también se incluye al Decreto Ejecutivo 3516, mismo que pone en manifiesto la norma de Calidad del Aire. Para lograr este objetivo, esta norma específica el límite máximo permitido de contaminantes en el aire ambiente en el suelo (84). La norma también proporciona métodos y procedimientos para determinar la concentración de contaminantes en el aire ambiental. Este decreto va de la mano con lo establecido por el Air Quality Index.

En este caso existen seis categorías de AQI, a saber, Bueno, Satisfactorio, Moderadamente contaminado, Deficiente, Muy malo y Severo. El AQI propuesto considerará ocho contaminantes (PM 10, PM2.5, NO2, SO2, CO, O3, NH3 y Pb) para los cuales a corto plazo (hasta un período promedio de 24 horas) estándares nacionales de calidad del aire ambiental se prescriben en la tabla 1 (89).

Con base en las concentraciones ambientales medidas, los estándares correspondientes y el posible impacto en la salud, se calcula un subíndice para cada uno de estos contaminantes. También se han sugerido posibles impactos en la salud para diferentes categorías de AQI y contaminantes, con aportes primarios de los expertos médicos del

grupo (90). Los posibles impactos en la salud asociados para los ocho contaminantes identificados, en la tabla 2.

Tabla 1. Concentración de contaminantes clave en $\mu\text{g} / \text{m}^3$.

Nombre cualitativo	Índice	Concentración de contaminantes (por hora) en $\mu\text{g} / \text{m}^3$			
		NO ₂	PM ₁₀	O ₃	PM _{2.5} (optional)
Muy bajo	0- 25	0- 50	0- 25	0- 60	0- 15
Bajo	25- 50	50-100	25- 50	60-120	15- 30
Medio	50- 75	100-200	50- 90	120-180	30- 55
Alto	75-100	200-400	90-180	180-240	55-110
Muy alto	> 100	> 400	> 180	> 240	> 110

Nota. Los valores son expresados en microgramos por metro cúbico de aire (760 mmHg - 25°C).

Fuente: Recuperado de <https://www.gob.ec/regulaciones/decreto-ejecutivo-3516>

Tabla 2. Impactos en la salud asociados para los ocho contaminantes identificados.

AQI	Impactos de salud asociados
Bueno (0-50)	Impacto mínimo
Satisfactorio (51-100)	Puede causar molestias respiratorias leves a personas sensibles.
Moderadamente contaminado (101-200)	Puede causar malestar respiratorio a personas con enfermedades pulmonares como asma y malestar a personas con enfermedades cardíacas, niños y adultos mayores.
Pobre (201-300)	Puede causar molestias respiratorias a las personas con una exposición prolongada y molestias a las personas con enfermedades cardíacas.
Muy deficiente (301-400)	Puede causar enfermedades respiratorias a las personas por exposición prolongada. El efecto puede ser más pronunciado en personas con enfermedades pulmonares y cardíacas.
Grave (401-500)	Puede causar un impacto respiratorio incluso en personas sanas y graves impactos en la salud de personas con enfermedades pulmonares / cardíacas. Los impactos en la salud se pueden experimentar incluso durante una actividad física ligera.

Y para finalizar se pone en manifiesto 3 Acuerdos Ministeriales. Entre ellos el Acuerdo Ministerial 091, mismo que establecen los límites máximos permisibles de emisiones a la

atmósfera para los distintos tipos de fuentes de combustión, en base al tipo de combustible utilizado y la cantidad de oxígeno de referencia (85). En aquellos casos donde se utilicen mezclas de combustibles, los límites aplicados corresponderán al del combustible más pesado. En el caso de combustibles mixtos, el límite impuesto corresponderá al combustible más pesado.

El Acuerdo Ministerial 050, que tiene como propósito principal mantener la salud de las personas, la calidad del aire circundante, el bienestar general del ecosistema y el medio ambiente. Para lograr este objetivo, esta norma específica

el límite máximo permitido de contaminantes en el aire ambiente en el suelo (86). Y para finalizar el Acuerdo Ministerial 155 cuyo objetivo principal es proteger la salud y el bienestar de las personas, la calidad del aire ambiental, el equilibrio de los ecosistemas y el medio ambiente en general. Para lograr este objetivo, el instrumento determina el límite máximo de emisión de contaminantes atmosféricos para las centrales térmicas, y determina los métodos y procedimientos para determinar las emisiones atmosféricas que han sido verificadas a través de diferentes procesos de combustión.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

La definición del área de estudio tuvo como marco de referencia las chimeneas principales de la refinería desde este punto se establecerá un radio de 3 km aproximadamente cabe mencionar que la orientación dependerá de la orientación del viento, dentro de esta área se estableció una red dinámica de puntos a lo largo de 3 distancias radiales y separados por una orientación de 10 grados en coordenadas angulares, definiendo 3 distancias angulares, una central que tuvo la mayor concentración de contaminantes y 2 marginales con una dispersión más amplia y menor concentración.

Definición de puntos de muestreo

Se definieron tres líneas angulares formando un total de 9 puntos de obtención de información relativos a la orientación del viento conforme a la figura 2, la red de puntos de muestreo es dinámica y se ubicó en función de la dirección del viento, así en cada salida de monitoreo fue necesario reestructurarla y redistribuirla, de esta forma se posicionó al equipo para la toma de datos. Lo cual permitió determinar cuál es el humo de base, además con el fin de evitar la mezcla o alteración inapropiada de los resultados se excluyó del estudio los días cuando se detectó quema agrícola, además lugares próximos a las carreteras o avenidas principales, para esto se estableció una distancia de por lo menos 100 metros.

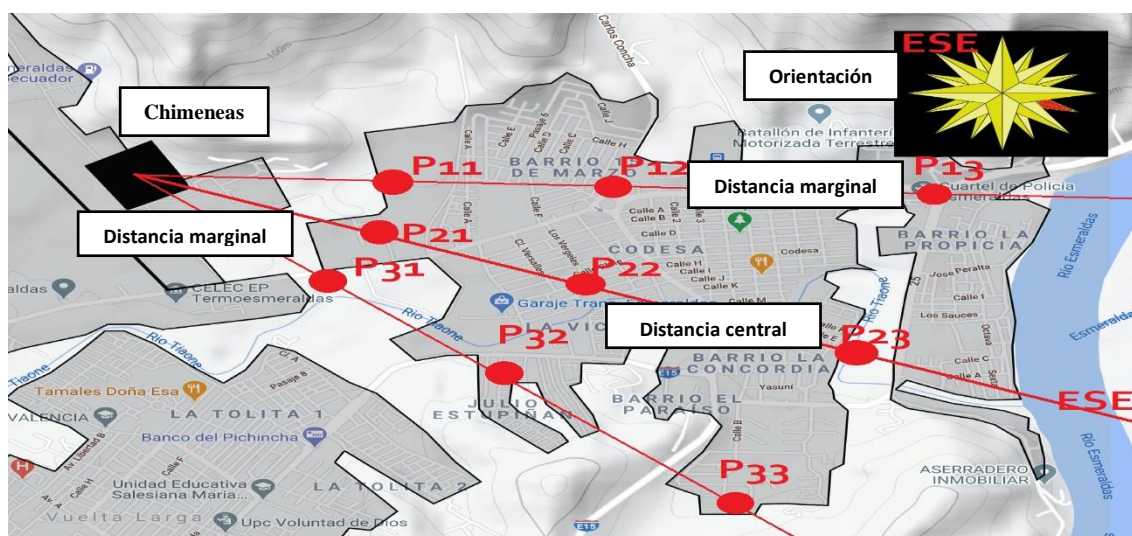


Figura 2. Área de estudio. Puntos de muestreo en función de la distancia y la orientación angular. Fuente: Programa AIRE

Capacitaciones

Una vez determinados los grupos y las zonas para trabajar en el contexto de horas de vinculación de programa aire, previo a las tareas de monitoreo el equipo se reunió para recibir un capacitación general en la que se dio a conocer el objetivo del proyecto y el horario de recolección el uso y operación de los equipos, cómo y cuándo se debía meter la información a la plataforma digital , para esto debe tener conocimiento sobre cómo se debía manejar el formato de recolección de datos, la dirección del viento, temperatura y tener claro el día y la hora de monitoreo.

Recolección de datos

Previo a la fase de monitoreo se efectuó una fase de verificación visual, en la cual en cada punto de monitoreo se tomaron fotografías de las chimeneas para constatar que estas estén en actividad, además si en el área se evidencian quemas agrícolas masivas que puedan alterar nuestros resultados.

Para la recolección de datos el equipo se reunió para planificar la salida, se coordinaron los puntos y se distribuyeron, una vez cada quien llega a su punto se tomaron las medidas sincrónicamente, para las sesiones de recolección de datos se tuvo en cuenta la dirección de viento para poder estimar la dispersión gaussiana de la pluma de emisión de las chimeneas sobre el terreno. Y así poder comparar la simulación de la pluma con los datos recogidos sobre el terreno. Contando con 3 detectores de material particulado que serán usados simultáneamente en medidas de 5 minutos de duración, seguidas de desplazamientos a otros puntos de interés en cortos intervalos de tiempo. Distribuyendo estas sesiones en diferentes días y franjas horarias.

Recolector A: Puntos P11, P12 y P13.

Recolector B: Puntos P21, P22 y P23.

Recolector C: Puntos P31, P32 y P33.

Los datos recogidos de los detectores de material particulado en el contexto del programa aire fueron subidos a aplicaciones online, utilizando el formulario electrónico Microsoft forms para introducir digitalmente esta información y luego de esto se tuvo una reunión para garantizar de que los datos hayan sido introducidos correctamente.

2.2. Tipo de investigación

Investigación observacional, transversal y analítica. En la que se ajustó las plumas de material particulado emitidas por las chimeneas sobre el área urbana densamente poblada, ajustando por mínimos cuadrados los datos recogidos sobre el terreno a los modelos de dispersión gaussianos ajustados por diversas variables: Distancia radial, Desviación angular respecto a la dirección del viento, velocidad del viento, temperatura ambiental. Pudiendo con ello estimar otras variables de la ecuación, como son la cantidad de material particulado emitido por las chimeneas.

2.3. Método

Por lo tanto, en este estudio se abordó el problema de la dispersión de contaminantes emitidos por chimeneas, se lo hizo analizando el modelo de dispersión de la pluma gaussiana en los barrios poblados masificada que hay alrededor de uno a tres km de distancia de la Refinería (los más próximos). Además, con ello se logró ver como la pluma depositaba el contaminante en las calles y en los hogares de esa área.

El modelado de la dispersión atmosférica es la simulación matemática de cómo se dispersaban los contaminantes del aire en la atmósfera ambiental. Se realizó con programas informáticos que incluyen algoritmos para resolver las ecuaciones matemáticas que gobiernan la dispersión de contaminantes. Los modelos de dispersión se utilizaron para estimar la concentración ambiental a favor del viento de contaminantes atmosféricos o toxinas emitidas por fuentes como plantas industriales, tráfico vehicular o emisiones químicas accidentales (tabla 3).

En este contexto a lo largo de un mes y medio (posiblemente mayo y junio de 2021) se realizaron diversas salidas de campo para tomar medidas en los diferentes puntos de la red radial-angular de manera sincrónicas esta se efectuó 2 veces por día en horario de 11am – 3pm, tomando en consideración qué estudios previos certifican que la dirección del viento en este horario fluctúa en la dirección de nuestra área de estudio.

Para la recolección de datos sobre las concentraciones de material particulado PM 2,5 y PM10, se utilizaron medidores modelo PCE-MPC 10, se utilizaron 3 y se los ubicó en función de los puntos de muestreos seleccionados dinámicamente. Además se registró los datos meteorológicos correspondientes a la dirección, velocidad del viento, la temperatura

y la humedad relativa se utilizaron 3 estaciones meteorológica modelo PCE-FWS 20N, las mismas que fueron ubicadas dentro del área de estudio en el sector de las 15 de marzo, la victoria y la tolita respectivamente, esta fueron a ser monitoreadas y controladas por estudiantes de la escuela de gestión ambiental de la pontificia Universidad Católica del Ecuador, capacitados previamente para ello.

Entre los instrumentos o formatos de almacenamiento de la información digitales encontramos los archivos devueltos por la estación meteorológica y los cuestionarios electrónicos donde almacenaremos los resultados de los medidores de partículas. Tal como se describe en la estructura de datos en la siguiente tabla.

Tabla 3. Detalle indicadores recogidos en cada tipo de instrumento

Estación meteorológica	Medidores de partículas
No.	No.
Fecha/Hora	Recolector
Temperatura Externa (°C)	Instrumento ID
Humedad Externa (%)	Ubicación georreferenciada
Velocidad del viento(km/h)	Fecha/Hora
Dirección del viento	Concentración PM25 y PM10



Figura 3. Medidor de partículas PCE-MPC 10 y Estación Meteorológica PCE-FWS 20N.

RESULTADOS

Hoy en día son múltiples las actividades antropogénicas que generan emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que es imprescindible hacer un análisis de las concentraciones del material particulado, así como la fuente que emite estos gases. Para el presente estudio se determinó hacer un estudio en la Refinería Esmeraldas, la cual es considerada como una de las empresas industriales más importantes de la provincia y por lo tanto es conveniente conocer cuál es la calidad del aire que se emite desde sus instalaciones.

El presente estudio se hizo con la finalidad de analizar la calidad de aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, aplicando un modelo de dispersión gaussiano de la pluma de emisión. Se propuso un marco de referencia de 3 km de radio aproximadamente a lo largo de 3 distancias radiales. Se estableció un total de 9 puntos de muestreo con el uso de un medidor material particulado, se calcularon datos meteorológicos como dirección, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa con la ayuda de 3 estaciones meteorológicas PCE-FWS 20N las cuales se ubicaron en los barrios: La Victoria, 15 de marzo y La Tolita.

A continuación, se exponen los hallazgos más importantes del estudio:

Análisis del modelo de dispersión gaussiana

Objetivo específico 1: Analizar siguiendo los modelos de dispersión gaussiana teniendo en cuenta factores como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad y orientación del viento, así como la distancia y orientación respecto de la dirección del viento.

Se comparó las concentraciones a favor de la dirección del viento delante (1A, 1B y 1C) y detrás de los puntos (2A, 2B y 2C) que se encuentran aledaños a las chimeneas para material particulado con concentración de $2,5 \mu\text{m}$, el cual se observa al lado izquierdo. Mientras que el material particulado de concentración $10 \mu\text{m}$ se observa del lado derecho, lo cual se aprecia en la figura 4.

Conforme al mapa que se plasma en la figura 4, los datos que se han recolectado no siguen un modelo gaussiano porque han mostrado una elevada dispersión debido al tamaño de la muestra recogida que en este caso ha sido relativamente baja. El cuadrado negro (1x) en el que se interceptan las líneas representan las concentraciones de material particulado

de 2,5 μm y 10 μm representa las chimeneas de Refinería tal y como se expone en la figura 4.

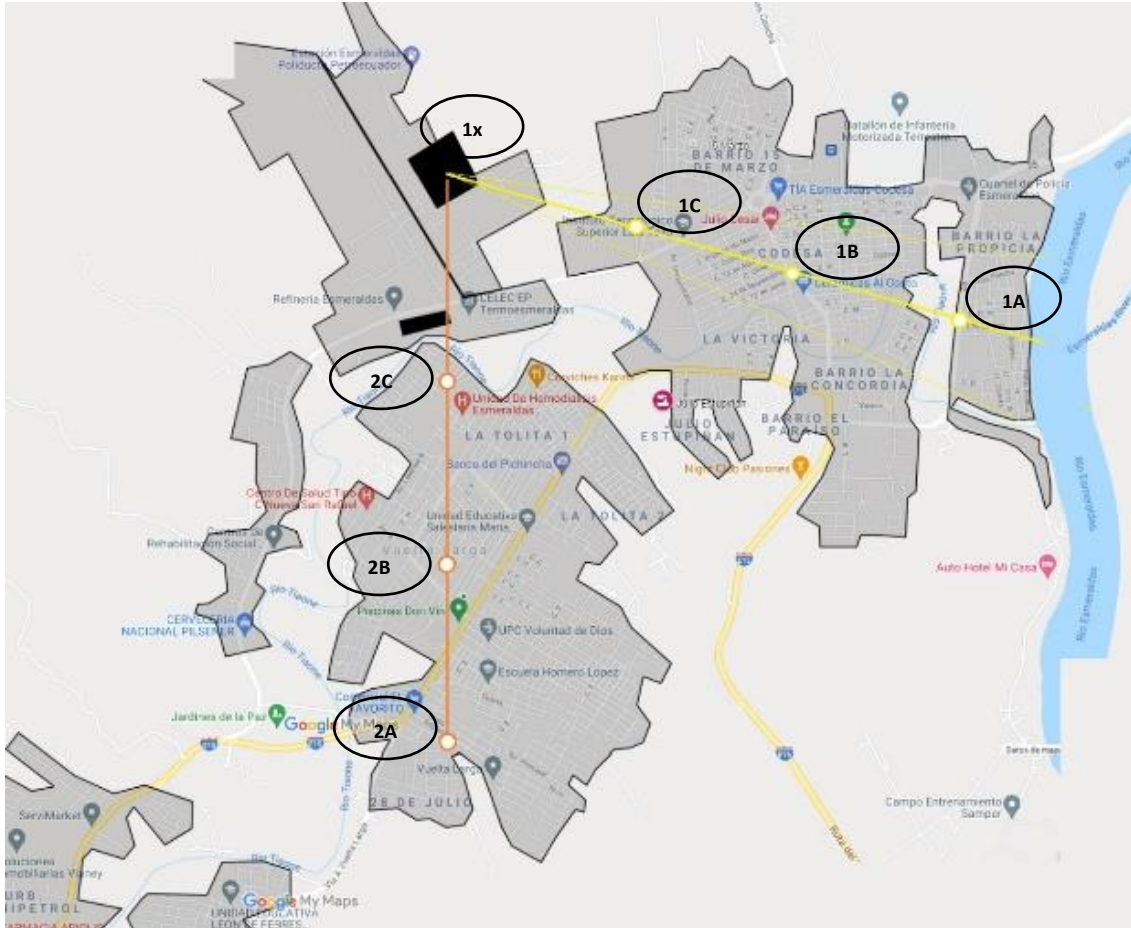


Figura 4. Representación de las distancias medias adelante y atrás respecto a las chimeneas de la Refinería

Nota: La línea amarilla representa MP 10 μm y la línea anaranjada representa MP 2,5 μm ; Los datos recogidos no muestran un comportamiento gaussiano.

Concentraciones del material particulado PM10 y PM2.5

Objetivo específico 2: Registrar las concentraciones de material particulado PM10 y material particulado fino PM2.5 en un área poblada extensa orientada hacia el este de las chimeneas. En lugares próximos a las chimeneas con una distancia inferior a los 4 km.

La figura 5 muestra dos niveles de concentración de PM 2,5 y de 10 respectivamente. Los resultados que se obtuvieron fueron relativamente bajos, pues se observa que el valor más alto que se obtuvo no supera los 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la dirección “delante” a una velocidad de

1 km. Del mismo modo, en la dirección “detrás” se observa que la concentración más alta alcanzó un valor 6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en velocidades de 3 km.

Mientras que a una concentración de PM 10 μm se observa que el valor más alto fue de 18 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la dirección “delante” con velocidades de 1 km. Mientras que en la concentración en la dirección “detrás” el mayor valor fue de 13 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a una velocidad de 2 km (figura 5).

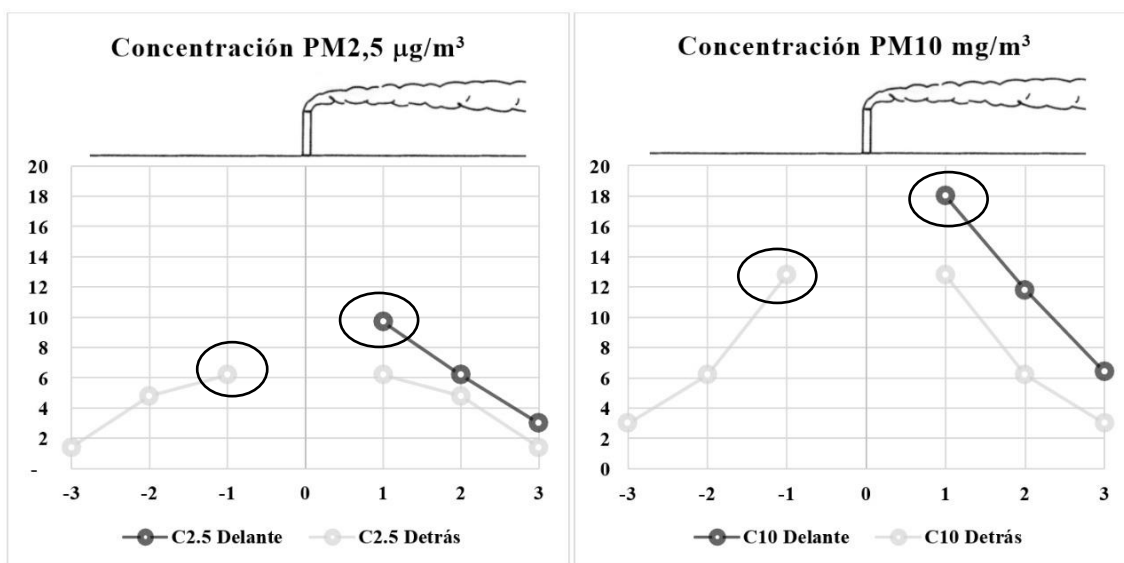


Figura 5. Concentraciones de material particulado 2,5 μm y 10 μm respecto a las chimeneas de Refinería

Conforme a los resultados que se exponen en la tabla 4, respecto a las medidas meteorológicas se puede observar que la velocidad media del viento fue de 8,1 km/h, el valor promedio de la humedad fue de 56,8%, la temperatura media fue de 30,1 $^{\circ}\text{C}$. En cuanto a las concentraciones de material particulado el valor medio de MP 2.5 μm fue de 6,1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en cuanto a las concentraciones de MP 10 μm , el valor promedio fue de 11,6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). En la desviación estándar se puede ver que el material particulado con una concentración de 10 μm es quien presenta mayor dispersión de datos, por cuanto se valor fue igual a 9,1 mientras que la velocidad del viento fue el parámetro que mostró menor dispersión, pues el valor que se obtuvo fue de 0,8.

Los valores P25, P50 y P75 representan los percentiles de la muestra, en donde se puede ver que los valores del viento, humedad y temperatura se mantuvieron constantes a lo largo del estudio. Con respecto a las concentraciones, se observa que el 75% de las mediciones que se hicieron tuvieron una concentración de 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en relación al

material particulado de 2,5 μm , mientras que el 75% de las mediciones en las concentraciones de 10 μg los valores que se obtuvieron registran una concentración de 17 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

También se puede apreciar que los valores máximos de concentración fueron de 22 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) respecto al MP 2,5 μm y de 37 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) respecto al MP 10 μm .

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de las distribuciones de valores en las medidas meteorológicas y de concentración de MP.

Estadísticos	Viento (km/h)	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Concentración 2.5 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración 10 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
n	150	150	150	150	150
Media	8,1	56,8	30,1	6,1	11,6
Desv. Est.	0,8	5,1	1,6	5,2	9,1
Min	6,1	48	26,9	0	0
P25	7,5	50	28,8	2	5
P50	8,6	60	30,3	4	7
P75	8,6	60	30,5	10	17
Máx	8,7	61	34,0	22	37

***Nota:** n (número total); Desv. Est (desviación estándar); min (valor mínimo); P25 (Percentil 25); P50 (Percentil 50); P75 (Percentil 75); km/h (kilómetros/hora); % (porcentaje); °C (grado centígrado); $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramo/centímetro cúbico).

Concentraciones del material particulado para seguimiento de las emisiones de las chimeneas

Objetivo específico 3: Registrar las concentraciones de material particulado, teniendo en cuenta la variable temporal desde diversas perspectivas: Ciclo semanal, y ciclo diario. Durante todos los días de la semana, y en diversas franjas horarias ayudando a realizar un mejor seguimiento de las emisiones cambiantes de las chimeneas.

En la tabla 5 se presentan las concentraciones promedio conforme la orientación y la distancia, en donde se puede apreciar que la concentración 10 μm con la orientación “detrás” obtuvo los valores más altos a una distancia de -3 km, -2 km y -1 km con concentraciones de 3,0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 6,2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 12,8 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente.

En la orientación “delante”, cuyas distancias fueron de 1 km, 2 km y 3 km, los valores que se obtuvieron fueron de 18,0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 11,8 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 6,4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente. Como se puede ver en la tabla 5, cuando la distancia es más baja se reportan los valores más altos de concentración, mientras que cuando la distancia es más alta se observan los valores más bajos de concentración.

Tabla 5. Concentraciones promediadas en función de la orientación y distancia

Orientación	Distancia (km)	Concentración 2.5 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración 10 μm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Detrás	-3	1,4	3,0
Detrás	-2	4,8	6,2
Detrás	-1	6,2	12,8
Delante	1	9,7	18,0
Delante	2	6,2	11,8
Delante	3	3,0	6,4

Nota: Las partes sombreadas indican valores más altos; km (kilómetros); $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramo/centímetro cúbico).

DISCUSIÓN

Tras analizar la calidad de aire próximo a las chimeneas de la Refinería Esmeraldas, aplicando un modelo de dispersión gaussiana, se ha podido evidenciar que los datos recogidos delante de las chimeneas en diferentes ángulos respecto al viento no cumplen con la distribución de concentración de material particulado que se esperaba, pues los valores de estas concentraciones fueron superiores en el centro y más bajas en los laterales. Estos argumentos concuerdan con el estudio de Jorge Cabrera que se realizó en el año 2012, quien menciona que la curva es gaussiana cuando la concentración de contaminantes en la línea central reporta los valores más altos a una distancia cercana e irá disminuyendo en dirección del viento en la parte de abajo (74).

Uno de los primeros supuestos por los cuales no se pudo observar una dispersión gaussiana de los contaminantes quizás se deba al hecho de varios factores como el tráfico, por ejemplo, pues la zona en donde se tomaron los datos es bastante transitada y estos valores obtenidos de material particulado pudieron haber venido de otras fuentes de emisión. Sin embargo se consiguió comparar las concentraciones en dirección del viento y en una dirección aproximadamente opuesta, concluyendo que es necesario aumentar el tamaño de la muestra porque los datos actuales mostraron una alta dispersión (87).

Las concentraciones de MP 10 μm que se han obtenido en el presente estudio difieren con los resultados hallados en un estudio realizado en Azogues en el año 2013, del cual se obtuvo un valor promedio diario máximo de 61,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y como valor mínimo promedio se obtuvo un valor de 35,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tomados en una unidad educativa (76). Dichos valores no se consideran perjudiciales para la salud pues están dentro de lo que permite la ley ecuatoriana en cuanto a la calidad de aire (86).

En este mismo estudio el valor más alto registrado fue en el terminal terrestre en donde se obtuvo un valor de 139,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2014 sobrepasando los límites máximos permitidos que establece la legislación ecuatoriana por medio del Acuerdo Ministerial 061 en cuanto a la calidad de aire, el mismo que debe mantenerse en un rango menor a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (76).

Haciendo una comparación de los valores obtenidos en el estudio realizado en Azogues y el presente estudio, las concentraciones de MP 10 μm han sido relativamente bajas, pues el valor más alto registrado para este estudio fue de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que como ya se ha

mencionado antes, no sobrepasa los límites máximos permitidos por la legislación del Ecuador.

Sin embargo, un estudio realizado en el año 2015 por estudiantes de la Universidad Nacional de Chimborazo registró valores más altos que los que se hallaron en el presente estudio con respecto a las concentraciones de PM 10 μm . Por ejemplo en barrios aledaños a la Refinería de Esmeraldas como el barrio Cerro Gatazo se obtuvo un valor de 41,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en el barrio Tolita 2 se obtuvo un valor de 34,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el barrio La Victoria los valores registrados fueron de 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero estos valores están igualmente dentro de los límites máximos permitidos por la legislación ecuatoriana (88).

Mientras que en el sector de la Propicia el valor que se obtuvo fue de 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en el sector Brisas del Mar Alto (Las Palmas) el valor obtenido fue de 55,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el sector de Tachina a la altura del restaurant Las Hamacas se registró una concentración de 58,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que son valores que están permitidos por la ley de Ecuador, pero que sobrepasan los límites máximos permitidos expuestos por la OMS en donde se indica que no debe sobrepasar los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (88) (76).

En cuanto a las concentraciones de PM 2,5 μm del presente estudio tampoco sobrepasan los valores máximos permisibles por la legislación ecuatoriana pues el valor más alto fue de 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este estudio concuerda con un estudio que se llevó a cabo en Cuba en el año 2012 en el cual se obtuvo valores de 0,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (89).

En dicho estudio también se menciona que las variaciones de concentraciones de PM 10 μm y PM 2,5 μm se deben a los horarios de toma de datos, a la distancia de los puntos respecto a las fuentes de emisión y a la dirección del viento, pues unas zonas pueden ser más sensibles a una mala calidad de aire; advierte además que en las horas de la tarde es donde por lo general donde hay ocurrencia de las concentraciones más altas (89).

Del mismo modo, un estudio realizado en Manta en el año 2017 en el Terminal Pesquero obtuvo como valores más alto de MP 2,5 μm concentraciones promedio de 8,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 7,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ los cuales están dentro de los rangos que se permiten en la legislación ecuatoriana (90).

Del presente estudio se puede resaltar que las concentraciones de PM 10 μm que fueron las más altas se ubican por el lado de los barrios de la Propicia, Barrio 15 de Marzo y Codesa.

Conforme a los factores meteorológicos de interés para evaluar la dispersión de los contaminantes son la velocidad, dirección del viento, temperatura, humedad, turbulencia, estabilidad atmosférica y los efectos topográficos, pues varían según el lugar. En un estudio de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo que se realizó en la Refinería de Esmeraldas así como en el presente la dispersión de la mayoría de contaminantes que emana la Refinería ha tenido mayor concentración en los barrios La Propicia, 15 de Marzo, La Concordia, Codesa, Julio Estupiñán, Las Acacias, entre otros (91).

En este mismo estudio se indica que esta entidad no genera material particulado, conforme a unos análisis de muestreadores pasivos que se emplearon en el año 2019, que solo se genera emisión de vapor desde la torre de desodorización de la planta de refinación que contienen agua sin contaminantes atmosféricos, creando nube de vapor que genera una percepción errónea de contaminantes atmosféricos; por el contrario, lo que sí se encontró en grandes proporciones fueron las concentraciones de azufre, las mismas que sobrepasaban los límites máximos permisibles que constan en la legislación ecuatoriana e internacional (91).

CONCLUSIONES

- Conforme a los resultados obtenidos, las concentraciones de MP 10 μm registraron los valores más altos a lo largo del muestreo, en las orientaciones detrás y delante a distancias menores de 4 km.
- Según las concentraciones de material particulado de 10 μm en las chimeneas de la Refinería, la concentración más alta obtuvo un valor de 12,80 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) en la orientación “detrás” a una distancia de -1 km, mientras que en la orientación “delante” la concentración más alta fue de 18,00 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) a una distancia de 1 km. Por otro lado, la mayor concentración de MP 2.5 μm fue de 6,2 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) a una distancia de -1 km en la orientación “detrás” y la mayor concentración en una distancia de 1 km en la orientación “delante” fue de 9,7 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$).
- En cuanto a las medidas meteorológicas, la concentración máxima de MP 2,5 μm fue de 22 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y de 37 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) respecto al MP 10 μm . El valor medio del viento, la humedad relativa y la temperatura fue de 8,1 km/h, 56,8% y 30,1 °C respectivamente.
- Los datos que se obtuvieron a lo largo del estudio no siguen un comportamiento gaussiano, lo cual se deba al hecho de que el material particulado pueda proceder de otras fuentes de emisión, pues el lugar en donde se recogieron los datos es una zona bastante transitada y pudo haber influido de manera importante en que los datos estuvieran más dispersos.

RECOMENDACIONES

- Se deben realizar más monitoreos en zonas aledañas a la Refinería Esmeraldas, para contar con una base de datos para investigaciones futuras, porque así se podrán hacer mejores comparaciones de los datos anteriores con los actuales.
- Probar el uso de otros modelos atmosféricos que se usan en la actualidad para obtener resultados que permitan establecer diversas realidades de las fuentes de emisiones que generan sustancias contaminantes en las áreas circundantes a la Refinería y el resto de la ciudad.
- Realizar otras investigaciones para establecer nuevas metodologías que permitan determinar los factores de emisión cercanos a la Refinería Esmeraldas para conocer de manera más profunda qué contaminantes se emiten a la atmósfera y sus posibles efectos en el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Description I, Prevention P, Characteristics W. Industry Description and Practices. *Environment*. 2007;307–11.
2. Ragothaman A, Anderson WA. Air quality impacts of petroleum refining and petrochemical industries. *Environ - MDPI*. 2017;4(3):1–16.
3. Rao BPS, Ansari MF, Pipalatkhar P, Kumar A, Nema P, Devotta S. Monitoring and assessment of particulate matter and poly aromatic hydrocarbons (PAHs) around a petroleum refinery. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2007 Aug;79(2):197–201.
4. Ragothaman A, Anderson WA. Air Quality Impacts of Petroleum Refining and Petrochemical Industries. *Environments*. 2017 Sep;4(3):66.
5. Wan R. Who's Most at Risk? How Much Pollution Is In Our Air? 2018.
6. D'Amato G, Pawankar R, Vitale C, Lanza M, Molino A, Stanziola A, et al. Climate change and air pollution: Effects on respiratory allergy. Vol. 8, *Allergy, Asthma and Immunology Research*. Korean Academy of Asthma, Allergy and Clinical Immunology; 2016. p. 391–5.
7. Deepanjan Majumdar AB. Measurements on Stationary Source Emissions and Assessing Impact on Ambient Air Quality around Two Indian Refineries. *Air Pollut Control Div*. 2015;7(2):1–16.
8. De Santis F, Fino A, Menichelli S, Vazzana C, Allegrini I. Monitoring the air quality around an oil refinery through the use of diffusive sampling. *Anal Bioanal Chem*. 2004 Feb;378(3):782–8.
9. Karbassi AR, Abbaspour M, Sekhavatjou MS, Ziviyar F, Saeedi M. Potential for reducing air pollution from oil refineries. *Environ Monit Assess*. 2008;145(1–3):159–66.
10. Tenías JM, Ballester F, Pérez-hoyos S, Rivera ML. Air pollution and hospital emergency room admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Valencia, Spain. *Arch Environ Health*. 2002;57(1):41–7.
11. Argyropoulos CD, Sideris GM, Christolis MN, Nivolianitou Z, Markatos NC. Modelling pollutants dispersion and plume rise from large hydrocarbon tank fires in neutrally stratified atmosphere. *Atmos Environ*. 2010 Feb;44(6):803–13.
12. De Agostini A, Cortis P, Cogoni A. Monitoring of Air Pollution by Moss Bags around an Oil Refinery: A Critical Evaluation over 16 Years. *Atmosphere (Basel)*. 2020 Mar;11(3):272.
13. HARIDOSS S. EFFECT OF AIR POLLUTANTS AND ITS EMISSION CONTROL STRATEGIES IN PETROLEUM REFINERIES. *J Ind Pollut Control*. 2017 Jun;33(1):1019–23.
14. Ozymy J, Jarrell ML. Upset over Air Pollution: Analyzing Upset Event Emissions at Petroleum Refineries. *Rev Policy Res*. 2011 Jul;28(4):365–82.
15. Substance Research Centers H, Outreach Program S. Environmental Impact of the Petroleum Industry Environmental Update #12. 2009.

16. Zeise L. API | Particulate Matter. Environmental Principles. 2015.
17. Marafi M, Stanislaus A, Furimsky E. Developments in Petroleum Refining. In: Handbook of Spent Hydroprocessing Catalysts. Elsevier; 2017. p. 7–25.
18. Braniš M, Řezáčová P, Domasová M. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom. Environ Res. 2005 Oct;99(2):143–9.
19. Valencia O. F, Caballero H. J. Estudio del material particulado de tamaño menos a 10 micras (PM 10) en el aire ambiente de la zona aledaña a la Universidad Libre-Sede Calendaria. J Air Pollut Control Assoc. 2018;
20. Chen B, Kan H. Air pollution and population health: A global challenge. In: Environmental Health and Preventive Medicine. 2008. p. 94–101.
21. Holubcik M, Jnadacka J, Horak J. Particulate matter from combustion of different types of dendromass in small fireplace. J Air Pollut Control Assoc. 2014;(February).
22. Campos-Ramos AA, Aragon-Pina A, Alastuey A, Galindo-Estrada I, Querol X. Levels, composition and source apportionment of rural background PM₁₀ in western Mexico (state of Colima). Atmos Pollut Res. 2011;2(4):409–17.
23. Pineda-Martínez LF, Carbajal N, Campos-Ramos A, Aragón-Piña A, García AR. Dispersion of atmospheric coarse particulate matter in the San Luis Potosí, Mexico, urban area. Atmosfera. 2014 Jan;27(1):5–19.
24. Du L, Batterman S, Parker E, Godwin C, Chin JY, O'Toole A, et al. Particle concentrations and effectiveness of free-standing air filters in bedrooms of children with asthma in Detroit, Michigan. Build Environ. 2011 Nov;46(11):2303–13.
25. Srithawirat T, Latif MT, Sulaiman FR. Indoor PM₁₀ and its heavy metal composition at a roadside residential environment, Phitsanulok, Thailand. Atmosfera. 2016 Oct;29(4):311–22.
26. Middleton D. The petroleum refining industry—air pollution problems and control methods. J Air Pollut Control Assoc. 2012;14(1):30–3.
27. Pehnec G, Jakovljević I, Godec R, Sever Štrukil Z, Žero S, Huremović J, et al. Carcinogenic organic content of particulate matter at urban locations with different pollution sources. Sci Total Environ. 2020 Sep;734.
28. Gallego-Álvarez I, García-Rubio R, Martínez-Ferrero J. Environmental performance concerns in Latin America: Determinant factors and multivariate analysis. Rev Contab Account Rev. 2018 Jul;21(2):206–21.
29. Álvarez M. API | Particulate Matter. Environmental Health and Preventive Medicine. 2017.
30. Olite F. Introduction to Air Pollution. Environmental Principles. 2011.
31. Cogoni A. Introduction to Air Pollution. Atmospheric Environment. 2014. p. 12–5.
32. Issn LA. Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm₁₀. Luna Azul. 2012;(34):195–213.

33. Yang SN, Hsieh CC, Kuo HF, Lee MS, Huang MY, Kuo CH, et al. The effects of environmental toxins on allergic inflammation. Vol. 6, Allergy, Asthma and Immunology Research. Korean Academy of Asthma, Allergy and Clinical Immunology; 2014. p. 478–84.
34. Stavropoulou IME. Refinery Emission Reduction Factsheet. 2016.
35. Khan MN, Sarwar A. Chemical composition of wet precipitation of air pollutants: A case study in Karachi, Pakistan. *Atmosfera*. 2014 Jan;27(1):35–46.
36. Draxler RR. Determination of atmospheric diffusion parameters. *Atmos Environ*. 1976;10(2):99–105.
37. Zannetti P, Zannetti P. Gaussian Models. In: *Air Pollution Modeling*. Springer US; 1990. p. 141–83.
38. Bhattacharya R. Atmospheric Dispersion Member of IAEA’s Expert Mission to Malaysia Email: rbhattacharya@aerb.gov.in 1 Contents. 2017.
39. Zhang Z. Atmospheric Model - an overview | ScienceDirect Topics. *Atmosfera*.
40. Pasquill F. Atmospheric dispersion of pollution. *Q J R Meteorol Soc*. 1971 Oct;97(414):369–95.
41. Macouzet P. Dispersal of air pollutants — European Environment Agency. *Air Pollution*. 2014.
42. Watson AY, Bates RR, Kennedy D. Atmospheric Transport and Dispersion of Air Pollutants Associated with Vehicular Emissions. *J Ind Pollut Control*. 1988;
43. Moore J. The Atmosphere | Earth Science. *Air Pollution Modeling*. 2019.
44. Lindroth R, Wang X. Atmospheric Pollutant - an overview | ScienceDirect Topics. *Atmosfera*. 2011.
45. Nathanson JA. air pollution | Effects, Causes, Definition, & Facts | Britannica. *Journal of Research in Medical Sciences*. 2015.
46. NUÑEZ C. Air pollution, facts and information. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2013.
47. Mackenzie J. Air Pollution Facts, Causes and the Effects of Pollutants in the Air | NRDC. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2016.
48. Ghorani-Azam A, Riahi-Zanjani B, Balali-Mood M. Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. Vol. 21, *Journal of Research in Medical Sciences*. Isfahan University of Medical Sciences(IUMS); 2016.
49. Sharp T. Earth’s Atmosphere: Composition, Climate & Weather | Space. *Space.com*. 2017.
50. Hutchinson Restelli; Saah Graedel. Atmospheric (Air) Pollutants | Encyclopedia.com. *Journal of Research in Medical Sciences*. 2018. p. 12–5.
51. Farahani HJ, Peterson GA, Westfall DG. This Page Intentionally Left Blank. In: *Advances in Agronomy*. 1998. p. 197–223.

52. Seigneur C. Atmospheric Dispersion. In: Air Pollution. Cambridge University Press; 2019. p. 95–124.
53. Linares C. Common air pollutants and their health effects - Air quality. Journal of Industrial Pollution Control. 2014.
54. Pielke R. atmosphere | Definition, Layers, & Facts | Britannica. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2013.
55. Sánchez G. What Is The Atmosphere? - Universe Today. Air Pollution. 2018.
56. Han J. Layers of the atmosphere | NIWA. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2017.
57. Doršner K. 10.1 The Atmosphere and Atmospheric Pollution | Environmental Biology. Journal of Industrial Pollution Control. 2010.
58. Sunyer J. Atmosphere | National Geographic Society. National Geographic. 2019.
59. Government of Canada, Canadian Space Agency, Communications Directorate IS and NM. CSA - What is the Atmosphere. J Ind Pollut Control. 2017;
60. Salcedo RLR. IMDIS - An integrated approach to Gaussian dispersion modeling. Environ Softw. 1991 Dec;6(4):202–19.
61. Explained GMM. (PDF) ON THE ATMOSPHERIC DISPERSION AND GAUSSIAN PLUME MODEL. Journal of Industrial Pollution Control. 2011.
62. Contreras O. Dispersion Models. Journal of Industrial Pollution Control. 2015.
63. Kondo MC, Gross-Davis CA, May K, Davis LO, Johnson T, Mallard M, et al. Place-based stressors associated with industry and air pollution. Heal Place. 2014 Jul;28:31–7.
64. Wan R. Who's Most at Risk? How Much Pollution Is In Our Air? 2014.
65. Javed W, Wexler AS, Murtaza G, Ahmad HR, Basra SMA. Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan. Atmosfera. 2015 Apr;28(2):99–116.
66. Veigle WJ, Head JH. Derivation of the Gaussian Plume Model. J Air Pollut Control Assoc. 1978;28(11):1139–40.
67. Douglas J V., Bianco S, Edlund S, Engelhardt T, Filter M, Günther T, et al. STEM: An open source tool for disease modeling. Heal Secur. 2019 Jul;17(4):291–306.
68. Gribonval R. Gaussian Model - an overview | ScienceDirect Topics. Air Pollution Modeling. 2013.
69. Moitra A. Gaussian Mixture Models. In: Algorithmic Aspects of Machine Learning. 2018. p. 107–31.
70. Khairuzzaman MQ. Modelación de Calidad del Aire. Air Pollut Model. 2016;4(1):64–75.
71. McGonagle J, Pilling G, Dobre A. Gaussian Mixture Model | Brilliant Math & Science Wiki. Air Pollution Modeling. 2016.

72. Gonzalez Sn BG. SIMULACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. 2013.
73. FONSECA M. ESTUDIO DEL IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LAS FUENTES PUNTUALES EN LA CIUDAD DE PINAR DEL RÍO. *Atmosfera*. 2016;634.
74. Cabrera J. Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica [Internet]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso; 2012. Available from: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-3000/UCF3110_01.pdf
75. Ordoñez-Sánchez YC, Reinoso-Valladares M, Hernández-Garces A, Canciano-Fernández J. Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio. *Rev Cuba Química*. 2018;30(1):90–103.
76. Vivar E. Cuantificación de material particulado PM10 y su efecto toxicológico-ambiental, en la ciudad de Azogues [Internet]. Universidad de Cuenca; 2014. Available from: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20939>
77. Correa Delgado PRESIDENTE LA REPUBLICA DEL ECUADOR R DE. DIOS, PATRIA Y LIBERTAD. 2018.
78. ACEVEDO B. Tracking Global Oil Refineries and their Emissions | *FracTracker. Atmosphere*. 2019.
79. Shilenje ZW, Ongoma V. Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono | Observatorio del Principio 10. *Atmosfera*. 2014. p. 377–84.
80. Khan MN, Sarwar A. Preámbulo | Secretaría del ozono. *Atmosfera*. 2014. p. 35–46.
81. Franco JF, Pacheco J, Belalcázar LC, Behrentz E. What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? | UNFCCC. *Atmosfera*. 2014.
82. Arellano J, Krüger A. Protocolo de Kioto - Objetivos para el primer período de compromiso | CMNUCC. 2015.
83. Código Orgánico del Ambiente. El Código Orgánico del Ambiente (COA) – Ministerio del Ambiente y Agua. 2016.
84. Ríos-Rojas JF, Aperador-Rodríguez D. Decreto N° 3.516 - Norma de Calidad del Aire Ambiente (Anexo IV, Libro VI: De la Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente). 2017.
85. Rivera C, Stremme W. Límites máximos permisibles para emisiones a la atmósfera provenientes de fuentes fijas para actividades hidrocarburíferas | Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios. 2018.
86. Friedrich MM, Bezanilla A. Acuerdo Ministerial No 061 Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria | Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios. 2019.
87. PNUMA. Perspectivas del medio ambiente Urbano: GEO Esmeraldas [Internet]. Esmeraldas; 2008. 1–113 p. Available from: file:///C:/Users/DELL/Downloads/-Perspectivas_del_Medio_Ambiente_Urbano_-_GEO_Esmeraldas-2008GEO_Esmeraldas_2008_1.pdf.pdf
88. Viteri R, Paredes M. Modelación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos So2 y

- Pm10, emitidos por la Refinería Estatal de Esmeraldas en el año 2015. Revista Cigmipa [Internet]. 2015;1–60. Available from: https://www.researchgate.net/publication/334599395_revista_cigmipa_23-paAnalisis_de_la_dispersion_de_Contaminantes_Atmosfericos_SO2_y_PM10_emitidos_por_la_Refineria_Estatal_de_Esmeraldas_en_el_ano_2015/link/5d34a4ab299bf1995b3f8f06/download
89. Hernandez MF. Estudio del impacto en la calidad del aire de las fuentes puntuales en la ciudad de pinar del río. Rev Bras Meteorol [Internet]. 2013;28(1):1–12. Available from: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/RmhtTLLB3VNG3NQFyC3pVrD/?format=pdf&lang=es>
90. Autoridad Portuaria de Manta, Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Reporte De Evaluación De Impacto Ambiental Y Social Para La Reconstrucción Y Ampliación Del Terminal Pesquero Y De Cabotaje De La Ciudad De Manta, Provincia De Manabí. 2018;1–301. Available from: <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6030/1/T-UTEQ-0028.pdf>
91. Ortiz H. Distribución espacial del azufre en la atmósfera en zonas aledañas a la Refinería de Esmeraldas, a partir de muestreadores pasivos. Periodo 2018-2019 [Internet]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo; 2012. Available from: <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6030/1/T-UTEQ-0028.pdf>