



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Análisis de dispersión de contaminantes emitidos por motores que utilizan petróleo crudo como combustible

Autor: Milly Elizabeth Zambrano Chávez

Tutor: Mireia Udina Sistach

Curso académico: 2017 - 2018

Máster en Energías Renovables
y Sostenibilidad Energética

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



Índice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Objetivos | 2 |
| 1.1.1 | General | 2 |
| 1.1.2 | Específicos | 2 |
| 1.2 | Antecedentes | 2 |
| 2 | Marco conceptual | 6 |
| 2.1 | Generadores Estacionarios marca Hyundai HiMSEN | 6 |
| 2.1.1 | Descripción del diseño del motor | 7 |
| 2.1.2 | Emisión de gases de escape y parámetros optimizados | 9 |
| 2.2 | Contaminantes en la atmósfera | 9 |
| 2.2.1 | Dióxido de Azufre (SO ₂) | 10 |
| 2.2.2 | Óxidos de Nitrógeno (NO _x) | 10 |
| 2.3 | Parámetros Meteorológicos | 11 |
| 2.3.1 | Viento | 11 |
| 2.3.2 | Estabilidad Atmosférica | 12 |
| 2.4 | Marco Legislativo Ambiental Ecuatoriano | 13 |
| 3 | Metodología | 15 |
| 3.1 | Ubicación de Fuente de Emisiones y Estaciones Meteorológicas Cercanas a la Fuente | 15 |
| 3.2 | Datos Meteorológicos de la Región | 17 |
| 3.3 | Producción de Contaminantes | 17 |
| 3.3.1 | Emisiones de SO ₂ | 17 |
| 3.3.2 | Emisión de NO _x | 18 |
| 3.4 | Modelo de Dispersión | 19 |
| 3.4.1 | Modelo Gaussiano como metodología del análisis | 19 |
| 3.4.2 | Categorías de Estabilidad Atmosférica | 21 |
| 4 | Resultado | 22 |
| 4.1 | Planteamiento de Escenarios con Variación de Condiciones Meteorológicas | 22 |
| 4.2 | Análisis del Modelo de Pluma de Gauss para los Casos Planteados | 23 |
| 4.2.1 | Análisis para los Dióxidos de Azufre (SO ₂) | 24 |
| 4.2.2 | Análisis para los Óxidos de Nitrógeno (NO _x) | 27 |
| 5 | Conclusiones | 29 |
| 6 | Bibliografía | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 7 Anexos | 34 |
| Anexo 1: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas Anuario 2013..... | 34 |
| Anexo 2: Datos Meteorológicos de la Estación San José de Payamino - M1221. (INAMHI, 2017) | 35 |
| Anexo 3: Histórico de datos meteorológico de anuarios 2011 – 2013, estación San José de Payamino - M1221. (INAMHI, 2014), (INAMHI, 2015), (INAMHI, 2017) | 36 |
| Anexo 4: Tabla de datos de Modelo Gaussiano para SO ₂ y NO _x | 37 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Datos principales para grupo de generadores H21/32 | 8 |
| Tabla 2. Composición típica de gases de escape en relación de volumen..... | 9 |
| Tabla 3. Concentraciones de contaminantes criterio que definían los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire antes de su Reforma en el 2015 | 14 |
| Tabla 4. Concentraciones de contaminantes criterio que definen actualmente los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire..... | 14 |
| Tabla 5. Coordenadas de la central de generación Oso B y de la red de estaciones meteorológicas de la provincia de Orellana. | 15 |
| Tabla 6. Características del generador usadas para cálculo de producción de contaminantes | 17 |
| Tabla 7. Categorías de dispersión de Pasquill-Gifford-Turner para condiciones de día y noche. Fuente: (Stull, 1988)..... | 22 |
| Tabla 8. Escenarios para la evaluación del modelo gaussiano | 23 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Consumo de Combustibles de Empresas Autogeneradoras (TEP). Fuente: ARCONEL, 2017 | 3 |
| Figura 2. Ubicación del Campo Oso, dentro de los límites del Bloque 7. Fuente: Petroamazonas EP | 6 |
| Figura 3. Atmosfera estándar (línea discontinua) en la troposfera, y su alteración por mezcla turbulenta en la capa límite (línea continua). Fuente: Wallace & Hobbs, 2006. | 12 |
| Figura 4. Mapa de la provincia de Orellana y ubicaciones de las coordenadas de la central de generación Oso B y la red meteorológica de la provincia. | 16 |
| Figura 5. Intercambio referencial de NO _x – SFOC. Fuente: HYUNDAI, 2003 | 18 |
| Figura 6. Esquema simplificado de la hipótesis del modelo Gaussiano. Fuente: (Turner, 1970) | 20 |

| | |
|--|----|
| Figura 7. Consideraciones meteorológicas para establecer escenarios de estudio..... | 24 |
| Figura 8. Curvas de dispersión de SO ₂ durante el día para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación..... | 25 |
| Figura 9. Curvas de dispersión de SO ₂ durante la noche para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación. | 26 |
| Figura 10. Curvas de dispersión de NO _x durante el día para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación..... | 27 |
| Figura 11. Curvas de dispersión de NO _x durante la noche para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación. | 28 |

Resumen

La contaminación atmosférica es causada por la variación de concentración de los gases que componen la atmósfera. Esta variación se da principalmente como consecuencia de la actividad humana, que, desde la época de la Revolución Industrial, ha incrementado el uso desmedido de combustibles fósiles para la generación de energía. En este estudio se analizó la dispersión de contaminantes emitidos por seis conjuntos de generadores Hyundai compuesto por motores de la marca Hyundai HiMSEN, acoplados en una misma estructura de diseño denominada HYUNDAI HiMSEN H21/32, con 1.800 kW de potencia nominal, que utilizan petróleo crudo como combustible en la Central de Generación Oso B, que pertenece a una industria petrolera ubicada en Ecuador, provincia de Orellana, y demanda energía eléctrica para abastecer su operación.

La metodología de estudio utilizada es el modelo de dispersión de Pluma de Gauss para los contaminantes SO_2 y NO_x , tomando en cuenta las siguientes consideraciones: la ubicación del foco emisor y de las estaciones meteorológicas, los datos meteorológicos de la provincia de Orellana, la emisión de los contaminantes SO_2 y NO_x por los motores, y las categorías de dispersión de Pasquill-Gifford-Turner; con el fin de compararlos con la legislación ecuatoriana de calidad del aire, estipulada en el Acuerdo Ministerial No. 097-A de 30 de julio de 2015, en los Anexos del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, y así determinar su cumplimiento. Los valores de emisión en la boca de la chimenea fueron 7.574 mg/s de SO_2 y 30.000 mg/s de NO_x ; sin embargo, el modelo implementado buscó determinar su concentración a diferentes distancias y condiciones meteorológicas establecidas en 15 escenarios. Los escenarios se establecieron con variaciones meteorológicas durante el día y la noche, distintas intensidades de radiación (débil, moderada, intensa) durante el día y cobertura de nubes (cielo cubierto o despejado) por la noche, con tres casos de velocidad de viento (0,5 m/s; 2,0 m/s; 5,0 m/s).

Los escenarios que mostraron mayor concentración fueron los ocurridos en la noche, debido a la ausencia de radiación solar, y vientos en calma (0,5 m/s), provocando que se supriman los movimientos verticales debido a la estabilidad atmosférica. Las altas concentraciones mencionadas, se dieron a distancias de 1 kilómetro de la fuente de emisión, cuyos resultados fueron de 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 y 3.168 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_x , superando en cuatro y tres veces, respectivamente, el valor umbral para los contaminantes SO_2 (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y NO_x (1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), según la legislación mencionada.

Abstract

Air pollution is caused by the variation of gases concentration that take place up in the atmosphere, this variation is mainly due to human activity, which, since the Industrial Revolution, has increased the excessive use of fossil fuels for energy generation. This study presents the dispersion of pollutants emitted by six sets of Hyundai generators composed of Hyundai HiMSEN brand motors, coupled in the same design structure called HYUNDAI HiMSEN H21/32, with 1.800 kW of nominal power, which use crude oil as fuel in the Generation Plant Oso B, which belongs to an oil industry located in Ecuador, province of Orellana, and demands electricity to supply its operation.

The methodology used was the Gauss Plume dispersion model for SO_2 and NO_x pollutants, with the following considerations: location of both the emitting source and meteorological stations, Orellana's meteorological data, engines emission of SO_2 and NO_x pollutants, and Pasquill-Gifford-Turner dispersion categories; in order to compare them with the Ecuadorian legislation on air quality, stipulated in the Ministerial Agreement No. 097-A of July 30th, 2015, in the Annexes of Unified Text of Secondary Environmental Legislation. The emission values at the mouth of the chimney were 7.574 mg/s of SO_2 and 30.000 mg/s of NO_x ; however, the model implemented sought to determine its concentration at different distances and meteorological conditions established in 15 scenarios. The scenarios were established with meteorological variations during the day and night, at different intensities of radiation (weak, moderate, intense) during the day and cloud coverage (covered or clear skies) at night, with three wind speed cases (0,5 m/s; 2,0 m/s; 5,0 m/s).

The scenarios that showed the highest concentration were those that occurred during the night, due to the absence of solar radiation, and calm winds presence (0,5 m/s), causing vertical movements to be suppressed due to atmospheric stability. These higher concentrations occurred at 1-kilometer distance from the emission source, whose results were 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of SO_2 and 3.168 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of NO_x , exceeding the threshold value for pollutants by four and three times, SO_2 (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and NO_x (1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), according to the mentioned legislation.

1 Introducción

El aire seco está conformado por: 20,946% de oxígeno y 78,084% de nitrógeno, que suman un total de 99,030% del volumen de aire (Wallace & Hobbs, 2006); el resto de volumen se complementa con otros gases considerados como gases traza. Dichos gases están presentes en la atmósfera en cantidades de mezcla menor al 1% en volumen, siendo el argón (Ar) el más abundante con 0,934%. Estos gases minoritarios tienen un impacto notable, ya que la variación de su concentración da lugar a la contaminación atmosférica (Jiménez, 2004); entre ellos: óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM10 y PM2,5) y ozono (O_3); estos gases, al igual que el dióxido de carbono y el metano (constituyentes de los gases de efecto invernadero) son de origen antropogénico; no obstante, pueden ser emitidos por fuentes naturales como la actividad fotosintética de plantas y microorganismos, fuentes geotérmicas naturales y erupciones volcánicas (Monson & Holland, 2001).

A nivel mundial, la combustión de carburantes para generar energía es la principal causa de emisión de gases contaminantes a la atmósfera; el problema de estos gases surge desde el inicio de la revolución industrial (año 1750), en donde las actividades humanas produjeron un incremento del 40% en la concentración atmosférica de dióxido de carbono, proveniente de la quema de carbón, petróleo y gas natural, además de la deforestación y de la erosión del suelo (Mann, 2014).

En el año 2016 las emisiones de carbono fueron estables. Es el tercer año consecutivo en el que se ha visto un crecimiento escaso o nulo de las emisiones de carbono, marcando un contraste con los 10 años anteriores, cuyas emisiones crecieron casi un 2,5% por año (BP, 2017). Parte de esta desaceleración refleja un crecimiento de las mejoras en la eficiencia energética y en la combinación de combustibles. Existen otros contaminantes generados por la combustión de carburantes, que son vertidos directamente a la atmósfera, y afectan la calidad del aire local.

Así, surge la necesidad de establecer e implementar un marco regulatorio que ayude a controlar la calidad del aire, estableciendo límites de concentración de contaminantes en la atmósfera. El control es importante que se lleve a cabo en lugares influenciados con industrias cercanas que demandan grandes cantidades de energía eléctrica, y utilizan combustibles fósiles para su generación.

El control de la calidad del aire nace a raíz de los efectos de los contaminantes atmosféricos, y el deterioro de la calidad del aire. Francia e Inglaterra fueron los primeros países que iniciaron la promulgación de leyes, demostrando la necesidad de realizar

controles a la calidad del aire; y fue en Londres, en el año 1899, que se creó la National Society for Clean Air and Environmental Protection (NSCA). Sin embargo, episodios trágicos ocurrieron en Europa, como en Londres, año 1952, donde una espesa capa de polución ocasionó la muerte de más de 4.000 personas, y en Bélgica, en el año 1930, una espesa niebla cubrió la mayor parte del país durante 3 días. De igual manera en Nueva York, en el año 1953, un gran episodio de contaminación atmosférica provocó la muerte de 4.000 personas. Dichos episodios, obligaron a los países industrializados a generar leyes cada vez más estrictas, y fue en el año 1970, que en Estados Unidos se crea la Environmental Protection Agency (EPA), cuyas normas y leyes sirvieron de fundamento para la creación de políticas ambientales en la mayoría de los países de América Latina (CEPAL, 2014).

Ecuador en su aplicación y participación en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, a través del Ministerio de Ambiente, se plantea lineamientos y guías específicas para afrontar el cambio climático.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

- Analizar la dispersión de los contaminantes SO₂ y NO_x debido a la actividad de una industria petrolera, donde generan energía eléctrica mediante motores que funcionan a petróleo crudo como combustible, en un campo petrolero ubicado en la región amazónica del Ecuador.

1.1.2 Específicos

- Estimar la producción de los contaminantes SO₂ y NO_x en las chimeneas de los generadores, a partir de las características de motores HYUNDAI HiMSEN diseñados a operar con crudo.
- Establecer escenarios posibles de acuerdo a la ubicación de los generadores, y a la meteorología propia del lugar.
- Incorporar la emisión de SO₂ y NO_x, y los escenarios establecidos en un modelo de pluma gaussiana para analizar el comportamiento de dispersión de los contaminantes a diferentes distancias de la fuente.
- Evaluar la calidad del aire con la legislación vigente en Ecuador

1.2 Antecedentes

La generación de energía Eléctrica en la República del Ecuador depende de fuentes renovables y no renovables, constituida con aporte de las empresas generadoras, autogeneradoras y distribuidoras con generación. Las empresas generadoras son las que explotan económicamente una o varias centrales de generación y entregan su

producción en el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), en un sistema aislado o en una red de distribución. Por su parte, la generación eléctrica de las empresas autogeneradoras se destina al abastecimiento de su demanda, pudiendo eventualmente, producir excedentes de generación y ser puestos a disposición de la demanda nacional, estas se ven representadas mayoritariamente por las empresas petroleras. Las empresas distribuidoras por mandato expreso de la ley asumen la obligación de prestar el servicio público de energía eléctrica a los clientes finales, dentro de su área de prestación de servicio.

A nivel nacional, al año 2016, se registraron 8.226,42 MW de potencia nominal y 7.606,88 MW de potencia efectiva, 60% constituida por fuentes renovables y 40% por fuentes fósiles. En el mismo año, la producción de energía a nivel nacional fue de 27.313,86 GWh, únicamente las empresas autogeneradoras produjeron 4.771,41 GWh, siendo la energía térmica la de mayor aporte con 3.564,51 GWh que representó el 74,71% de la producción de energía de las empresas autogeneradoras. El combustible más utilizado para generación de energía fue el crudo con 333.222,37 TEP¹, y representa el 27,70% del total de combustible consumido por empresas autogeneradoras (ARCONEL, 2017). (Figura 1.)

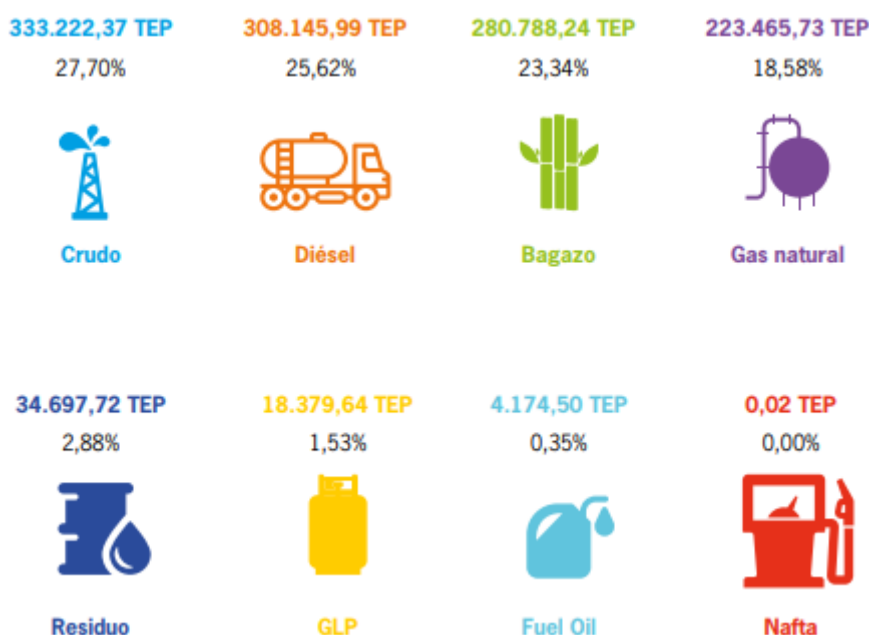


Figura 1. Consumo de Combustibles de Empresas Autogeneradoras (TEP). Fuente: ARCONEL, 2017

Ecuador inicia su producción petrolera a niveles comerciales en el año 1925 y las exportaciones en 1928, durante casi 40 años se concentró la explotación en la Península de Santa Elena; sin embargo, durante este periodo, empresas extranjeras empezaron a

¹ TEP: Toneladas Equivalentes de Petróleo

realizar exploración en la región Amazónica (Petroecuador, 2006). El descubrimiento de hidrocarburos en la Amazonía ecuatoriana reactivó interés de compañías extranjeras por exploración y explotación en 1968. El país pasó a manejar todas las fases de la industria en 1971, que estuvieron en manos de transnacionales; en 1972 se crea la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana (CEPE), misma que construyó la actual infraestructura petrolera y descubrió más campos petrolíferos, para luego convertirse en accionista del consorcio CEPE-Texaco. En 1989 se crea la Empresa Estatal Petróleos del Ecuador (Petroecuador) y asume la totalidad de las actividades del consorcio CEPE-Texaco, las refinerías de Anglo y Repetrol, y el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano. La empresa Petroamazonas Ecuador S.A. se creó como subsidiaria de Petroecuador en el 2007, tres años después pasa a ser empresa pública (Petroamazonas EP); a finales del 2012 Petroamazonas EP se fusiona con Petroproducción (filial de Petroecuador). Hasta la actualidad, Petroamazonas EP se considera la empresa estatal encargada de la administración de exploración y explotación de la mayor parte de los recursos petroleros de Ecuador, y las actividades de transporte, refinación y comercialización en poder de Petroecuador.

El Producto Interno Bruto (PIB) ecuatoriano se compone principalmente por los ingresos procedentes del comercio exterior, especialmente de las actividades petroleras. Durante el 2016, Ecuador experimentó una contracción anual del PIB de -1,5%, el punto más bajo de la tendencia decreciente observada desde el 2012. Este resultado ha sido consecuencia, entre otros factores, de la reducción del precio del petróleo ecuatoriano en el mercado internacional que inició en el 2015 –el precio promedio fue de US\$35 por barril en 2016– y la apreciación del dólar. A ello se sumó el impacto del sismo de 7,8 grados Richter del 16 de abril (INEC; CEPAL, 2017).

Durante el 2017 se exportaron un total de 135,49 millones de barriles de crudo, equivalente a 6.189,82 millones de USD (BCE, 2018). Si bien la actividad petrolera ha tenido una reducción de su peso en el PIB, ésta ha contribuido en promedio con más del 50% de las exportaciones totales en la última década (INEC; CEPAL, 2017).

Actualmente, la empresa líder en producción petrolera es Petroamazonas EP, que opera gran parte de los bloques en la Amazonía y es también de las más grandes empresas autogeneradoras de electricidad de Ecuador, y no se encuentra interconectada en su totalidad con el Sistema Nacional Interconectado (SNI), lo cual aún se encuentra en etapa de proyecto. Los generadores de electricidad de Petroamazonas consumen distintos combustibles, fuelóleo, gas natural, diésel y crudo, siendo los dos últimos de mayor consumo en el 2017. En el último año, el consumo de diésel y crudo fue de 52,2

y 50,9 millones de galones, respectivamente, y representan 172,4 y 173,2 mil TEP (ARCONEL, 2017). Los proyectos en marcha de interconexión al SNI reducirán el volumen de diésel empleado en el conjunto de sus operaciones (MH, 2017), quedando el crudo como combustible principal para alimentación de los generadores de Petroamazonas.

Para que se dé un proceso de contaminación, es necesario que se produzca una emisión a la atmósfera de una cantidad dada de contaminante desde un foco de contaminación o fuente de emisión. El contaminante se ve sometido a reacciones físicas y químicas, a través de procesos de difusión, dispersión o dilución, con o sin reacción química.

El presente estudio se enfoca en el análisis de la calidad del aire en puntos cercanos a una fuente de generación eléctrica que funciona a crudo en el Campo Oso, ubicado en la provincia de Orellana. (Figura 2)

Los combustibles fósiles como el diésel y fuelóleo son utilizados como fuente de energía primaria para la producción de energía eléctrica en la industria petrolera, energía que es necesaria para los procesos de bombeo y traslado de fluidos; otra de las fuentes de emisiones de GEI es la quema de gas asociado, normalmente desechado comúnmente en la industria petrolera.

Desde el 2009 Petroamazonas EP está implementando el Programa Optimización de la Generación Eléctrica y Eficiencia Energética (OGE&EE), para generar electricidad a través de la implementación del Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero (SEIP) y satisfacer la demanda eléctrica tanto en procesos propios de la industria como de las comunidades que se encuentran dentro del área de influencia (PNUD Ecuador, 2018). El Programa OGE&EE tiene previsto a futuro la utilización de los combustibles: gas asociado, excedentes energía hidroeléctrica, y crudo.

Dentro de los bloques que opera la empresa Petroamazonas EP, se encuentra el Bloque 7, ubicado en la provincia de Orellana. El campo Oso se encuentra en el sector suroeste del Bloque 7, sobre el margen occidental del Río Napo. Una de las centrales de generación eléctrica se denomina Oso B, implementada por motores estacionarios de marca Hyundai que funcionan a crudo como combustible, con una potencia nominal de 1,8 MW cada uno, en total 14,4MW. Este patio de generación arrancó el 28 de enero de 2018, suple en parte la demanda de las facilidades de producción, y posterior tendrán la capacidad de interconexión al SEIP (Petroamazonas EP, 2015).

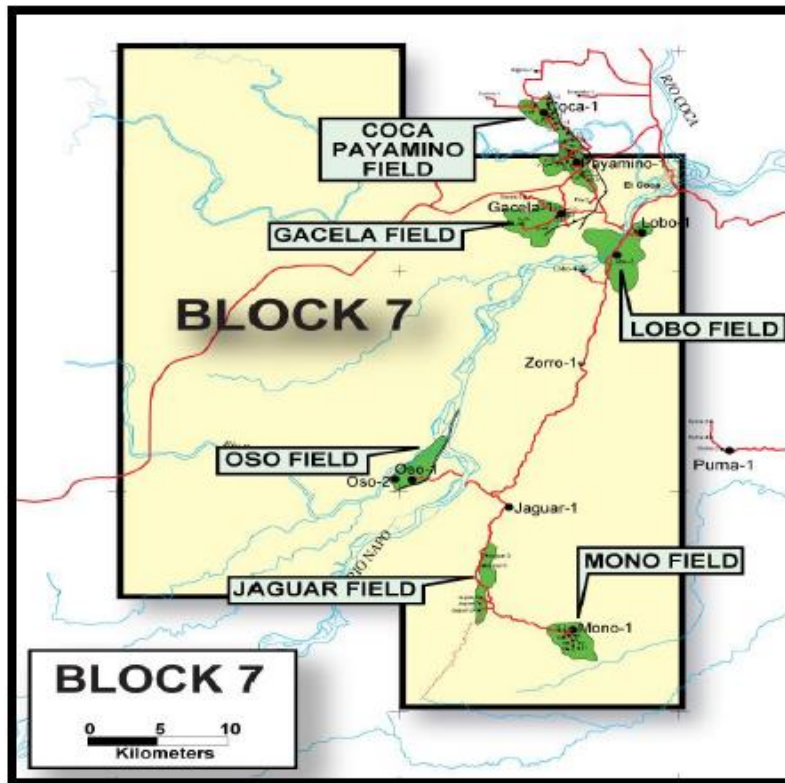


Figura 2. Ubicación del Campo Oso, dentro de los límites del Bloque 7. Fuente: Petroamazonas EP

2 Marco conceptual

En este apartado se introduce: el diseño del conjunto generador HYUNDAI HiMSEN H21/32, las respectivas especificaciones técnicas del motor, y la emisión de gases contempladas en su diseño. Además, identificar cuáles son los contaminantes, la influencia que tiene la meteorología en la dispersión de contaminante en la atmósfera, y finalmente si existe marco regulatorio que controle la calidad del aire.

2.1 Generadores Estacionarios marca Hyundai HiMSEN

Los conjuntos de generadores Hyundai están compuestos por motores Hyundai HiMSEN² que por sus siglas en inglés traducidas al castellano significa “Motor de Velocidad Media de Alta Tecnología”, y generadores también de fabricación Hyundai. Los grupos estacionarios de generación HiMSEN H21/32 se diseñan como un paquete estándar, con tecnología PPS³. La característica de este tipo de tecnología es que son plantas generadoras compactas, donde el motor y el generador son acoplados en una misma estructura dentro de un contenedor, diseñadas para ofrecer energía continua y estable.

² HiMSEN: Hi-Touch and Hi-Tech Medium Speed Engine

³ PPS: Power Plant Station

2.1.1 Descripción del diseño del motor

La familia del conjunto generador estacionario HYUNDAI HiMSEN H21/32 tiene un diseño simple y ligero, adecuado para la aplicación estacionaria con alta confiabilidad y rendimiento. Las características principales de estos motores son resumidas a continuación (ENERFUSA, 2013):

1. Motor de combustible pesado: El motor diésel/crudo debe cumplir con los requisitos de las normas KS⁴ y JIS⁵ reglamentarias del último número, y estándares del fabricante del motor. El motor, junto con el sistema de alimentación externo adecuado, puede funcionar con fuelóleo pesado de viscosidad de hasta 700 cSt a 50 °C, que corresponde a los grados de CIMAC H700 (Recomendación CIMAC N° 21, 2003). La viscosidad del combustible que ingresa al motor debe mantenerse dentro de aprox. 12 - 18 cSt.
2. Motor Económico y Ecológico: Con el menor consumo de combustible y emisiones contaminantes a la atmósfera, sobre todo de NO_x, lo cual está basado en las siguientes especificaciones de diseño:
 - Alta relación de carrera contra diámetro del cilindro ($320/210 = 1,52$).
 - Alta relación de compresión (17).
 - Aire de sobrecarga optimizado con el Ciclo Miller.
 - Alta presión de inyección de combustible (hasta 2.000 bar).
3. Motor confiable y práctico con una estructura simple, ligera y robusta.
 - El número de componentes del motor son minimizados con diseño libre de tubería.
 - La mayoría de los componentes son accesibles para un mantenimiento más fácil.
 - El sistema de alimentación es completamente modularizado con accesibilidad directa.

Como complemento de estos conjuntos de generación de electricidad, se instalan las diferentes unidades auxiliares que posibilitan trabajar con un combustible pesado y que forman parte del diseño, compuestos por:

- MDU (Unidad Diesel Principal)
- HTU (Unidad de tratamiento de Heavy Fuel Oil)
- ETU (Unidad de tratamiento eléctrico)
- WTU (Unidad de tratamiento de agua)

⁴ KS: Korean Industrial Standards

⁵ JIS: Japanese Industrial Standards

- Calderas
- Compresores
- Estaciones de bombas
- Transformadores

Adicional a esta tecnología PPS con motores H21/32, existen motores de mayor porte que permiten mayores niveles de generación como ejemplos la familia H25/33 y H32/40.

La tecnología aplicada en Ecuador es el motor 9H21/32 en modalidad PPS con una capacidad de 1.800 kW por motor, que generalmente se instala en baterías de a 4 motores generadores. (Tabla 1)

Tabla 1. Datos principales para grupo de generadores H21/32

| DATOS PRINCIPALES PARA GRUPO DE GENERADOR H21/32 | |
|---|--|
| Tipo de Motor | 4-tiempos, vertical, inyección directa de acción simple y tipo pistón troncal con turbocompresor e inter-enfriador |
| Configuración del Cilindro | en línea |
| Número de Cilindro | 5 – 6 – 7 – 8 – 9 |
| Velocidad Nominal (rpm) | 720; 750; 900; 1.000 |
| Potencia por Cilindro (kW) | 160; 160; 200; 200 |
| Diámetro del Cilindro (mm) | 210 |
| Carrera del pistón (mm) | 320 |
| Barrido de Volumen por Cilindro (dm ³) | 11,1 |
| Velocidad Media del Pistón (m/s) | 7,7; 8,0; 9,6; 10,7 |
| Presión Efectiva Media (bar) | 24,1; 23,1; 24,1; 21,7 |
| Relación de Compresión | 17,1 |
| Dirección de Rotación del Motor | Sentido de las agujas del reloj, vista desde el lado del generador (No reversible) |
| Orden de Encendido del Cilindro | 5H21/32 1 – 2 – 4 – 3 6H21/32 1 – 4 – 2 – 6 – 3 – 5 7H21/32 1 – 2 – 4 – 6 – 7 – 5 – 3 8H21/32 1 – 3 – 5 – 7 – 8 – 6 – 4 – 2 9H21/32 1 – 3 – 5 – 7 – 9 – 8 – 6 – 4 – 2 |

2.1.2 Emisión de gases de escape y parámetros optimizados

HiMSEN está diseñado para un motor que cumpla con el límite de emisión de NO_x IMO⁶ con un bajo consumo de combustible y un funcionamiento casi sin humo incluso con carga inactiva.

La composición típica de gases de escape en relación de volumen a plena carga son las siguientes:

Tabla 2. Composición típica de gases de escape en relación de volumen

| Compuesto | % del Volumen |
|---|---------------|
| Nitrogen, N ₂ | ~75% |
| Oxygen, O ₂ | ~13% |
| Carbon Dioxide, CO ₂ | ~5% |
| Vapor de Agua, H ₂ O | ~6% |
| Argon, Ar | ~1% |
| Hollín, cenizas, NO _x , CO, HC, etc. | |

Los últimos contaminantes de la tabla 2 se encuentran en menor proporción que el resto; sin embargo, requieren atención cuidadosa para el tratamiento del aceite combustible y las condiciones de operación del motor. Si no hay requisitos especiales del cliente con respecto a la emisión de gases de escape, HiMSEN Genset entrega bajo condiciones de rendimiento optimizado que cumplan con el valor límite de emisiones de NO_x de la IMO.

2.2 Contaminantes en la atmósfera

Cuando una sustancia está en la atmósfera en cantidades superiores a su concentración habitual, se convierte en contaminante atmosférico. Los contaminantes se emiten, transportan y transforman, y finalmente se mide su concentración, lo que da la idea de la calidad del aire del sitio.

Los contaminantes se originan de fuentes de emisión naturales y antropogénicas. Se puede considerar fuentes naturales a sucesos como incendios forestales, procesos biológicos, tormentas, erupciones volcánicas, etc; mientras que las fuentes de origen antropogénico se relacionan a actividades que involucren uso de combustibles fósiles, carbón biosférico, fertilizantes, cultivos de suelos, ganado, y procesos industriales

⁶ IMO: International Maritime Organization

(Wallace & Hobbs, 2006). En este estudio se consideran dos contaminantes de origen antropogénico: los SO_2 y los NO_x ($\text{NO}_2 + \text{NO}$).

2.2.1 Dióxido de Azufre (SO_2)

Los dióxidos de azufre (SO_2) se forman principalmente por la combustión de sustancias que contengan azufre como el carbón o el petróleo, utilizado generalmente en centrales eléctricas y otras instalaciones industriales (origen antropogénico). El SO_2 se utiliza como indicador del grupo más grande de óxidos de azufre gaseoso (SO_x) que se encuentran en la atmósfera.

El SO_x puede reaccionar con otros compuestos en la atmósfera para formar partículas pequeñas. Estas partículas contribuyen a la contaminación, y pueden penetrar profundamente en las partes sensibles de los pulmones causando problemas de salud adicionales.

En concentraciones altas, el SO_x gaseoso puede dañar árboles y plantas, perjudicar el follaje y disminuir el crecimiento. El SO_2 y otros óxidos de azufre contribuyen a la lluvia ácida que puede dañar los ecosistemas sensibles (EPA, 2018).

2.2.2 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) abarcan distintos compuestos gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno; la valencia atómica del nitrógeno determinará el valor de x , variando así su nombre y formulación a óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). La producción de este grupo de NO_x puede ser de forma natural o antropogénico, la actividad humana contribuye grandes cantidades mediante chimeneas de motores diésel o crudo, detonación de dinamita, gravado de dinamita, etc. Del conjunto de NO_x emitidos a la atmósfera el más abundante es el óxido nítrico (NO) y, en menor proporción el dióxido de nitrógeno (NO_2).

Los NO_x reaccionan con otros productos químicos en el aire para formar tanto materia particulada como ozono. Ambos son dañinos cuando se inhalan debido a los efectos en el sistema respiratorio, irritando vías respiratorias o agravar enfermedades como el asma.

Los NO_x también interactúan con el agua, el oxígeno y otras sustancias químicas en la atmósfera para formar lluvia ácida. La lluvia ácida daña ecosistemas sensibles como lagos y bosques.

Además, las partículas de nitrato que resultan de los NO_x hacen que el aire sea confuso y difícil de ver (EPA, 2018).

2.3 Parámetros Meteorológicos

La meteorología influye en la transmisión y transporte de los contaminantes una vez emitidos. Ecuador está ubicado en una zona tropical, cuyo clima se define principalmente por las corrientes marinas cálidas y frías del océano Pacífico, la presencia de la cordillera de los Andes y la influencia de la humedad proveniente de la Amazonía. De acuerdo con la clasificación climática mundial según Köppen, la Amazonía ecuatoriana corresponde a la categoría “Af” (Kriticos, y otros, 2012).

La clasificación climática “Af” representa temperaturas elevadas a lo largo de todo el año. La duración día/noche y la posición de los rayos solares varía mínimamente a lo largo del año, lo que unido al elevado grado de humedad produce un calor asfixiante. Todos los meses la media de temperaturas es superior a los 18°C, la característica fundamental de estos climas en cuanto a las temperaturas es su escasa amplitud térmica anual, es decir, la diferencia entre el mes más frío y el mes más cálido no supera los 3° C.

La información sobre los impactos potenciales del cambio climático y los registros meteorológicos en el país presentan vacíos importantes, dificultando la precisión análisis o tendencias climáticas. Sin embargo, para futuras modificaciones en control y toma de datos será importante identificar la influencia de los parámetros meteorológicos en la dispersión de contaminantes.

Los contaminantes se emiten principalmente en la capa límite, que es la capa de aire más cercana a la superficie, y responde a forzamientos de superficie con una escala de tiempo de aproximadamente una hora o menos. Estos forzamientos corresponden a la fricción superficial, la evaporación y la transpiración, la transferencia de calor, la emisión de contaminantes y la modificación del flujo inducida por el terreno (Stull, 1988).

2.3.1 Viento

Los factores meteorológicos más determinantes en el transporte de contaminantes son: el viento, y la estabilidad atmosférica, que principalmente depende del perfil de temperatura ambiental. El viento es el movimiento en masa del aire de acuerdo con la variación de presión atmosférica, y se puede clasificar en diversas categorías (viento medio, turbulencia u ondas) que pueden existir por separado o en presencia de cualquiera de las otras. Cada uno puede hallarse en la capa límite, donde el transporte de humedad, calor, *momentum* y contaminantes está dominado en la horizontal por el viento medio y en la vertical por la turbulencia.

El viento medio es responsable de un transporte horizontal muy rápido, o advección. Los vientos horizontales en la capa límite son de 2 a 10 m/s, mientras que cerca del

suelo son más lentos por efecto de la fricción. Los vientos medios verticales son menores, generalmente del orden de milímetros a centímetros por segundo.

La turbulencia ocurre con gran frecuencia cerca del suelo, siendo una de las características que diferencia la capa límite del resto de la atmósfera. Fuera de la capa límite, la turbulencia se encuentra principalmente en las nubes convectivas, y cerca de la corriente en chorro, donde las fuertes cizalladuras del viento pueden crear turbulencia del aire limpio (Stull, 1988).

2.3.2 Estabilidad Atmosférica

Dependiendo de la estructura de temperatura vertical dentro de la capa límite, la mezcla turbulenta puede variar a distintas alturas a través del consumo boyante o la producción de temperatura. De hecho, es en última instancia el perfil de temperatura que determina la profundidad de la capa límite.

La troposfera es estáticamente estable en promedio, con un gradiente de temperatura potencial de $3,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Figura 3), pero el calentamiento solar de la Tierra causa que las térmicas se eleven desde la superficie, generando turbulencia, y modificando el gradiente de temperatura en la parte más baja de la tropósfera. La turbulencia generada por los procesos cerca del suelo mezcla el aire de la superficie de valores relativamente bajos de temperatura potencial, con aire a mayor temperatura potencial desde altitudes más altas. La mezcla resultante tiene una temperatura potencial intermedia que es relativamente uniforme con la altura. La mezcla de baja altitud crea un salto de temperatura entre el aire de la capa límite y el aire más caliente en altura, este salto de temperatura corresponde a la inversión de tope de la capa límite (Wallace & Hobbs, 2006). En este estrato es donde tiene lugar la dispersión de los contaminantes.

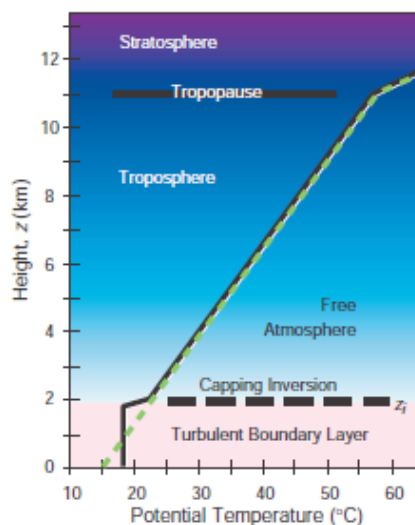


Figura 3. Atmósfera estándar (línea discontinua) en la troposfera, y su alteración por mezcla turbulenta en la capa límite (línea continua). Fuente: Wallace & Hobbs, 2006.

El grado de estabilidad atmosférica se define por la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire circundante, pudiendo causar movimiento vertical de la porción. Este movimiento se caracteriza por cuatro condiciones básicas que describen la estabilidad general de la atmósfera: inestable, estable, neutral, y extremadamente estable.

En condiciones inestables un contaminante puede moverse con facilidad hacia arriba o hacia abajo, mientras que en condiciones estables se impide el movimiento vertical. Las condiciones neutrales establecen un límite entre las condiciones inestable y estable, es decir, no estimula ni impide el movimiento porque el gradiente vertical de la temperatura del ambiente es el mismo que el gradiente vertical adiabático seco. Las condiciones extremadamente estables se dan cuando una capa de aire cálido entrapa el aire frío cercano a la superficie, impidiendo el movimiento vertical; esta condición también es conocida como inversión, y se relaciona con la concentración de contaminantes en el ambiente (Jacob, 1999).

2.4 Marco Legislativo Ambiental Ecuatoriano

En el año 2003, el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria de la normativa Ambiental de la República del Ecuador, en su Libro VI, Anexo 4, tiene como objetivo principal preservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general. Para cumplir con este objetivo, esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire.

Para efectos de la norma, el Ministerio del Ambiente del Ecuador establece la regulación para los contaminantes: partículas sedimentables, material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones (PM10), material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrones (PM2,5), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃).

La Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable acreditada ante el Sistema Único de Manejo Ambiental establecerá un Plan de Alerta, de Alarma y de Emergencia ante Situaciones Críticas de Contaminación de Aire, basado en el establecimiento de tres niveles de concentración de contaminantes. La ocurrencia de estos niveles determinará la existencia de los estados de Alerta, Alarma y Emergencia, cuando uno o más de los contaminantes criterio exceda la concentración establecida en la legislación (tabla 3).

Tabla 3. Concentraciones de contaminantes criterio que definían los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire antes de su Reforma en el 2015⁷

| CONTAMINANTE Y PERIODO DE TIEMPO | ALERTA | ALARMA | EMERGENCIA |
|---|---------------|---------------|-------------------|
| Monóxido de Carbono Concentración promedio en 8 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 15.000 | 30.000 | 40.000 |
| Ozono Concentración promedio en 1 hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 300 | 600 | 800 |
| Dióxido de Nitrógeno Concentración promedio en una hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 1.200 | 2.300 | 3.000 |
| Dióxido de Azufre Concentración promedio en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 800 | 1.600 | 2.100 |
| Material Particulado PM10 Concentración en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 250 | 400 | 500 |

Posteriormente, el Acuerdo Ministerial No. 061, publicado en la Edición Especial del Registro Oficial No. 316 de 4 de mayo de 2015, se reforma el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria; no incluye la reforma de los Anexos. Por lo cual en el Acuerdo Ministerial No. 097-A de 30 de julio de 2015, se expiden la reforma de los anexos del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (tabla 4).

Tabla 4. Concentraciones de contaminantes criterio que definen actualmente los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire⁸

| CONTAMINANTE Y PERIODO DE TIEMPO | ALERTA | ALARMA | EMERGENCIA |
|---|---------------|---------------|-------------------|
| Monóxido de Carbono Concentración promedio en 8 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 15.000 | 30.000 | 40.000 |
| Ozono Concentración promedio en 8 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 200 | 400 | 600 |
| Dióxido de Nitrógeno Concentración promedio en una hora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 1.000 | 2.000 | 3.000 |
| Dióxido de Azufre Concentración promedio en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 200 | 1.000 | 1.800 |
| Material Particulado PM10 Concentración en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 250 | 400 | 500 |
| Material Particulado PM2,5 Concentración en 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 150 | 250 | 350 |

⁷ Todos los valores de concentración expresados en microgramos por metro cúbico de aire, a condiciones de 25°C y 760 mm Hg.

⁸ Todos los valores de concentración expresados en microgramos por metro cúbico de aire, a condiciones de 25°C y 760 mm Hg.

3 Metodología

Para la evaluación de la calidad del aire en la zona cercana a la industria, se consideran las herramientas de monitoreo y de un modelo de dispersión de contaminantes. La recopilación de datos consta de información meteorológica, y la producción de contaminantes estimados en base a las características de los motores de generación. Luego de reunir el input necesario, se establece un modelo de dispersión de contaminantes para diagnosticar o prever la concentración de un determinado contaminante en un punto (x, y, z, t).

En este capítulo, se establece la metodología de análisis iniciando con la ubicación geográfica de la fuente emisora y las estaciones meteorológicas disponibles que provean información, determinación de la producción de los contaminantes (SO₂ y NO_x) y el modelo de dispersión que mejor se ajusta al estudio (modelo de Pluma de Gauss).

3.1 Ubicación de Fuente de Emisiones y Estaciones Meteorológicas Cercanas a la Fuente

La provincia de Orellana se encuentra en la Amazonía ecuatoriana, está conformada por cuatro cantones que son: Loreto, Orellana, La Joya de los Sachas y Aguarico. El cantón Loreto es donde se ubica los generadores que proveen parcialmente electricidad al campo Oso, y los que se analizan en el presente estudio.

La central de generación está conformada por ocho conjuntos de generación, de los cuales operan seis y los dos restantes sirven de apoyo cuando se realizan mantenimiento o en caso de emergencia.

Las coordenadas de la central de generación Oso B, y de la red de estaciones meteorológicas de la provincia se encuentran detalladas en la tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas de la central de generación Oso B y de la red de estaciones meteorológicas de la provincia de Orellana.

| Estación | Tipo de Estación | Código | Latitud | Longitud |
|----------------------|-------------------------|--------|--------------|--------------|
| Oso B | Central de Generación | - | 0° 41' 17,9" | 77° 8' 36,9" |
| Loreto | Pluviométrica | M0563 | 0° 41' 33" | 77° 18' 42" |
| Huaticocha | Pluviométrica | M1171 | 0° 44' 43" | 77° 29' 1" |
| San José de Payamino | Climatológica Principal | M1221 | 0° 30' 14" | 77° 19' 3" |
| Cononaco | Pluviómetro | M1232 | 0° 59' 34" | 76° 56' 15" |
| Nuevo Rocafuerte | Agrometeorológica | M007 | 0° 55' 0" | 75° 25' 0" |

Las coordenadas geográficas en GMS⁹, en el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84), y se pueden visualizar en el mapa de acuerdo con la figura 4 (INAMHI, 2017). El mapa de Ecuador y la red de estaciones meteorológica de todo el país se encuentra en el Anexo 1.

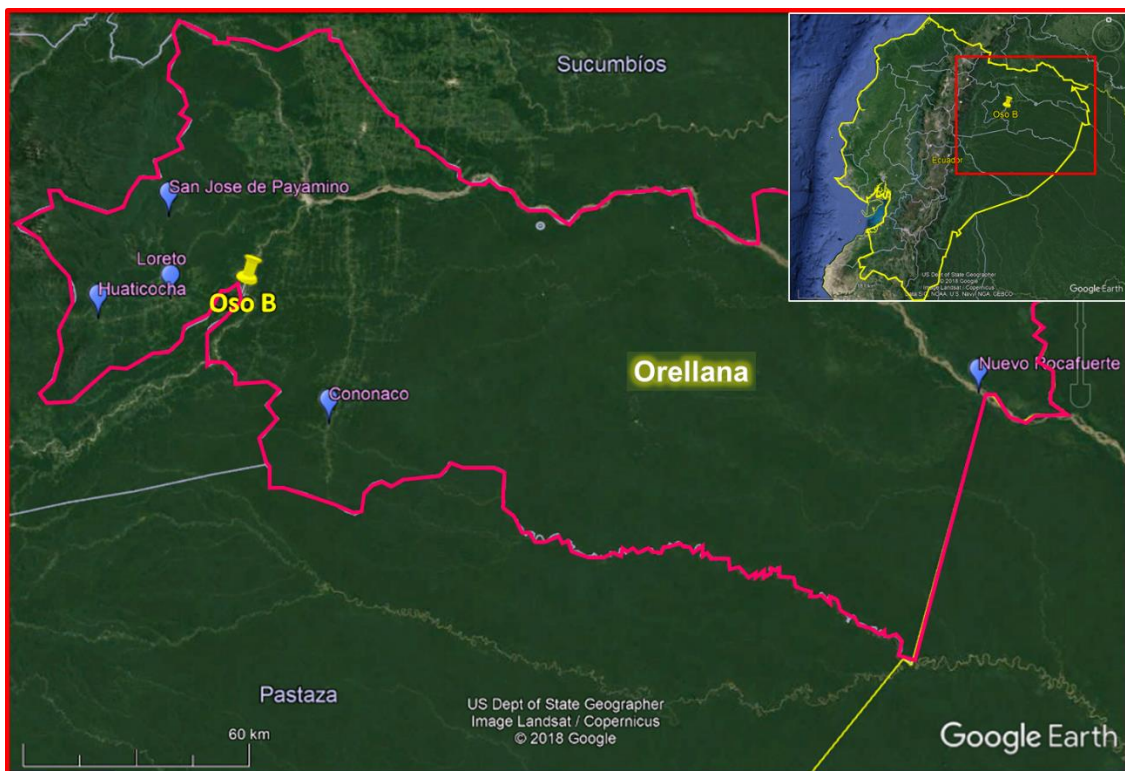


Figura 4. Mapa de la provincia de Orellana y ubicaciones de las coordenadas de la central de generación Oso B y la red meteorológica de la provincia.

La provincia de Orellana no cuenta con información sistematizada acerca de la calidad del aire al nivel urbano ni a nivel rural, a pesar de que exista la legislación nacional que regule las emisiones de gases a la atmósfera. La razón principal es que la información meteorológica de la región amazónica es limitada debido a que existen pocas estaciones de monitoreo (GAPO, 2011).

Las estaciones meteorológicas más cercanas a la central de generación Oso B son Loreto (M0563) y San José de Payamino (M1221), a distancias de aproximadamente 18,91 y 28,20 kilómetros, respectivamente. Sin embargo, la estación Loreto es de tipo pluviométrica, y por ello se utilizan los datos registrados oficialmente en la estación meteorológica principal de San José de Payamino (INAMHI, 2017).

⁹ GMS: Grados, minutos, segundos

3.2 Datos Meteorológicos de la Región

El monitoreo de datos en la estación San José de Payamino muestra que la temperatura media ambiente mínima registrada en el Anuario Meteorológico 2013 es de 19,1°C y la máxima es de 32,1°C (INAMHI, 2017).

De la misma forma, se puede determinar que mayoritariamente la velocidad y frecuencia de vientos en la zona es de calmas (Anexo 2). Los vientos con velocidades mayor a 4 m/s son muy esporádicas durante el año, pero pueden existir según lo registrado en informes de años anteriores (Anexo 3). Por eso, los escenarios consideran:

- Situación diurna a 32,1°C de temperatura ambiente o situación nocturna a 19,1°C de temperatura ambiente
- Radiación solar: débil / moderada / intensa, o nubosidad nocturna: cubierto / despejado
- Velocidad de viento de 0,5 m/s (calma), 2 m/s y 5 m/s.

3.3 Producción de Contaminantes

La producción de contaminantes se determina considerando el patio de generación de los seis conjuntos de generadores como un solo foco de emisión, y de acuerdo con las características del equipo Hyundai HiMSEN modelo 9H21/32 (HYUNDAI, 2015).

Tabla 6. Características del generador usadas para cálculo de producción de contaminantes

| | |
|---|--------------------------------|
| Tipo de motor | 9H21/32 |
| Tipo de generador | HHI |
| Potencia nominal del motor | 1.800 kW |
| Consumo de combustible del motor (SFOC¹⁰) | 187 g/kWh |
| Caudal de entrada del aire | 12.960 kg/h |
| Velocidad de flujo del gas de escape | 13.300 kg/h |
| Densidad del gas de escape | 0,53 kg/m ³ a 370°C |
| Emisiones de NO_x | 10 g/kWh |
| Altura de chimenea | 15,575 m |
| Diámetro de la chimenea | 0,508 m |

3.3.1 Emisiones de SO₂

Las emisiones de SO₂ depende del contenido de azufre del crudo utilizado como combustible. El contenido de azufre del crudo en el campo Oso según informes de laboratorio es de 1,35%, dato que se asemeja con la calidad del crudo ecuatoriano (Petroecuador, 2018).

¹⁰ SFOC: Specific Fuel Oil Consumption

Las características de diseño de cada equipo es el mismo, y de acuerdo con las especificaciones del modelo HYUNDAI HiMSEN instalado, el consumo específico de crudo es 187g/kWh, y el contenido de azufre del crudo a considerar es de 1,35%. La producción del contaminante es de 1.262 mg/s por unidad de generación y equivale a 7.574 mg/s de SO₂ total en la planta de generación.

Cálculo:

$$\begin{aligned} \text{Crudo} \cdot \text{Contenido de Azufre} &= 187 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \cdot 1.800 \text{ kW} \cdot 1,35\% S_2 \cdot \frac{1\text{h}}{3.600 \text{ s}} \cdot \frac{1.000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \\ &= 1.262 \text{ mg/s de SO}_2 \text{ por cada equipo} \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{Producción total} = 7.574 \text{ mg/s de SO}_2$$

3.3.2 Emisión de NO_x

La cantidad de emisión de NO_x depende de las condiciones de funcionamiento del motor, típicamente una temperatura de combustión alta y un consumo específico de combustible. El diseño de un motor se debe optimizar para cumplir con los requisitos específicos; sin embargo, un motor en servicio también se puede optimizar aún más con respecto a la emisión de NO_x, si es necesario. En este caso, el intercambio con SFOC podría considerarse de la siguiente manera (HYUNDAI, 2003):

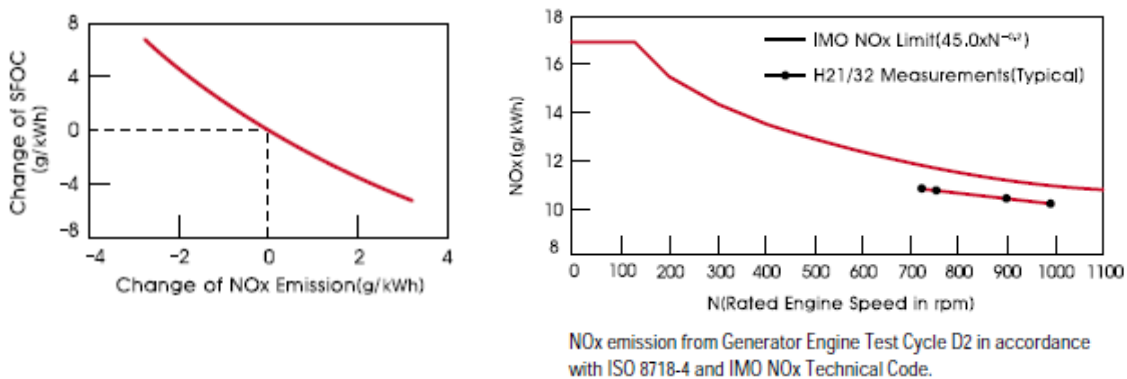


Figura 5. Intercambio referencial de NO_x – SFOC. Fuente: HYUNDAI, 2003

SFOC por sus siglas en inglés significa el consumo específico de fuelóleo, y al igual que la velocidad del motor, se relaciona directamente con las emisiones de NO_x. Por lo tanto, a mayor velocidad y mayor eficiencia del combustible, menores serán las emisiones de NO_x (figura 5). Para el presente estudio, el diseño de cada equipo es de SFOC igual a 187 g/kWh y emisiones de NO_x igual a 10 g/kWh.

Si se considera la entrada de aire y las características del equipo de generación indicadas en la tabla 6, la producción de NO_x es de 5.000 mg/s por cada equipo, y

considerando que 6 equipos normalmente operativos, resulta un total de 30.000 mg/s de NO_x.

Cálculo:

$$NO_x = 10 \frac{g}{kWh} \cdot 1.800 kW \cdot \frac{1h}{3.600 s} \cdot \frac{1.000 mg}{1 g} = 5.000 mg/s$$

→ **Producción Total = 30.000 mg/s de NO_x**

3.4 Modelo de Dispersión

La atmósfera es un sistema complejo donde se involucran procesos químicos y físicos simultáneamente, por lo que un modelo de dispersión es una aproximación matemática de la atmósfera real. Los modelos de dispersión atmosférica expresan matemáticamente las ecuaciones que describen el movimiento de la atmósfera.

Los modelos de investigación que simulan los procesos físicos son los modelos de diagnóstico y los modelos de pronóstico. Los modelos de diagnóstico representan las condiciones en un determinado instante a partir de una cierta cantidad de datos; mientras que los modelos de pronóstico caracterizan una predicción de la evolución de la atmósfera a partir de unas condiciones iniciales y de contorno.

En este estudio se utilizará el modelo gaussiano que representa un modelo de diagnóstico.

3.4.1 Modelo Gaussiano como metodología del análisis

Para el desarrollo del presente tema de investigación se opta por un modelo Gaussiano, mismo que representa un modelo de diagnóstico para estimar el impacto de contaminantes no reactivos, simulando el comportamiento de las plumas emitidas desde fuentes a una altura definida de la chimenea (Buitrago Arango, 2003).

El modelo Gaussiano o modelo de pluma de Gauss consiste en un modelo que considera una dispersión del contaminante C en forma de función gaussiana en tres dimensiones del espacio (figura 6). Este modelo estima el impacto de contaminantes no reactivos puntuales a diferentes distancias "X" de la fuente o chimenea. La fuente puede emitir de forma continua o esporádica.

Como se puede observar en la figura 6, los gases ascienden verticalmente hasta llegar a una altura efectiva formando una columna de humo, y por efectos de la velocidad del viento y la turbulencia atmosférica forma el llamado "penacho" o "pluma". Mientras los gases emitidos se van mezclando con el aire, la pluma aumenta su diámetro viajando a sotavento. La densidad de los gases es menor que la del aire exterior, por lo tanto, se

produce la flotabilidad que al combinarse con el *momentum* se origina el fenómeno de elevación de la pluma ($He = Hg + \Delta h$). Este fenómeno permite que los contaminantes emitidos al ambiente se eleven a una altura considerable y haya una dispersión de los contaminantes antes de llegar al suelo (Páez Pérez, 2007).

Como este estudio está enfocado a la dispersión de contaminantes desde una fuente industrial petrolera, el modelo gaussiano se considera adecuado, a pesar de sus limitaciones.

El modelo gaussiano no es válido en condiciones inestables, dadas estas condiciones el perfil de contaminante en la vertical es altamente no gaussiano. Otra limitación de este modelo es que no es válido para contaminantes reactivos. Por lo tanto, será válido para el SO_2 que es un contaminante poco reactivo, pero con una mayor incertidumbre para los NO_x , que son un contaminante muy reactivo.

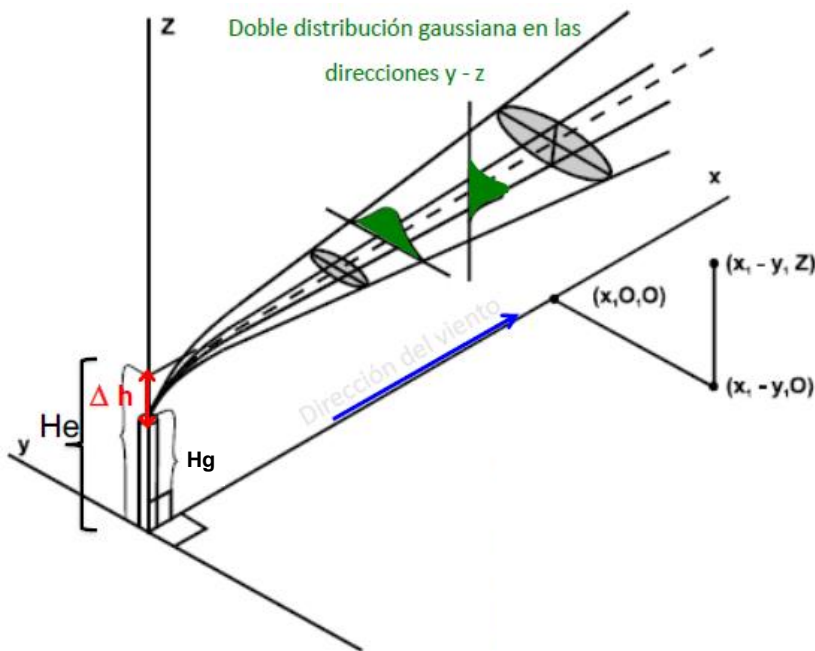


Figura 6. Esquema simplificado de la hipótesis del modelo Gaussiano. Fuente: (Turner, 1970)

Los factores involucrados se relacionan en la ecuación planteada inicialmente por O. G. Sutton en 1932 (Sánchez, Siabato, & Cely, 2002):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \cdot u \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-He}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+He}{\sigma_z}\right)^2} \right\}$$

Donde:

$C(x, y, z)$ Es la concentración del contaminante en cualquier punto a X metros en la dirección del viento desde la fuente, Y metros lateralmente desde

| | |
|----------------------|--|
| | el eje de la pluma y Z metros sobre el suelo. Unidades: microgramos por metro cúbico, $\mu g/m^3$ |
| <i>Q</i> | Es la cantidad o masa de la emisión por unidad de tiempo. Unidades: gramos por segundo, <i>g/s</i> |
| <i>u</i> | Es la velocidad del viento. Unidades: metros por segundo, <i>m/s</i> |
| <i>He</i> | Es la altura efectiva de la fuente sobre el nivel del suelo. Unidades: metros, <i>m</i> |
| $\sigma_y; \sigma_z$ | Son las desviaciones estándar de una pluma estadísticamente normal en las dimensiones lateral y vertical, respectivamente. |

Se puede notar que la ecuación calcula la concentración de contaminantes en un punto relativo al eje de la pluma depende principalmente de las desviaciones estándar respecto a los ejes, el viento y la altura efectiva. Estos tres factores también son considerados en las categorías de Pasquill. La distribución gaussiana y la elevación de la pluma depende de la estabilidad atmosférica del viento.

El modelo permite variar las condiciones meteorológicas (según clasificación de estabilidad de Pasquill), intensidad de viento y temperatura; por lo tanto, el presente trabajo desarrolla distintos escenarios para identificar los de mayor impacto. Adicionalmente, cada escenario se analiza a diferentes distancias de la fuente ($x = 100$ m, 250 m, 500 m, 750 m, 1 km, 2 km, 3 km, 4 km, 5 km, 6 km, 7 km, 8 km, 9 km, 10 km), debajo del penacho ($y = 0$), y en el suelo ($z = 0$).

Para el proceso del análisis, es necesario conocer cierta información del foco emisor: temperatura ambiente, categoría de las condiciones atmosféricas, altura y diámetro de la chimenea, velocidad y temperatura de los gases, y tasa de emisión.

3.4.2 Categorías de Estabilidad Atmosférica

La estabilidad atmosférica es un punto clave para estimar el grado de dispersión de los contaminantes en el aire a partir del lugar donde se emite. Los coeficientes de dispersión propuestos por Pasquill clasifica de manera sencilla las condiciones atmosféricas, utilizando mediciones de velocidad de viento, cobertura de nubes e insolación, y especificar los parámetros de difusión σ_y y σ_z ¹¹ (Kahl & Chapman, 2018). Las categorías de estabilidad son indicadores de turbulencia atmosféricas por efectos mecánicos y térmicos. Se clasifican en *A, B, C, D, E, F*, siendo la *A* la más inestable y *F* la más estable. Las categorías más desfavorables para la dispersión de contaminantes son las categorías *E* y *F*.

¹¹ σ_y y σ_z : Desviaciones estándar de la dispersión de contaminantes horizontal y vertical

Durante el día la insolación depende de la altura solar, y la existencia de nubes crea una disminución de energía entrante y saliente; durante la noche depende únicamente de la nubosidad. La clasificación de las categorías se encuentra detallada en la siguiente tabla:

Tabla 7. Categorías de dispersión de Pasquill-Gifford-Turner para condiciones de día y noche. Fuente: (Stull, 1988)

| Velocidad del viento en la superficie z=10 m (m s ⁻¹) | Insolación durante el día | | | Cubierta de nubes durante la noche | |
|---|---------------------------|----------|------|------------------------------------|-------|
| | Fuerte | Moderada | Leve | ≥ 4/8 nubes bajas o nublado fino | ≤ 3/8 |
| <2 | A | A-B | B | - | - |
| 2-3 | A-B | B | C | E | F |
| 3-5 | B | B-C | C | D | E |
| 5-6 | C | C-D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D |

Así pues, durante el día con poco viento se favorece la inestabilidad y la mezcla vertical, mientras que si el viento horizontal aumenta la inestabilidad se reduce. Durante la noche se producen los casos de máxima estabilidad, peor situación para la dispersión.

4 Resultado

Este estudio analiza diversos escenarios planteados en base a la variabilidad existente en los datos meteorológicos de la zona donde se ubican los generadores en el campo petrolero, considerando la emisión de SO₂ y NO_x.

4.1 Planteamiento de Escenarios con Variación de Condiciones Meteorológicas

En base a la información meteorológica real medida por instituciones públicas del país, y tomando en cuenta la limitación de datos en la zona de estudio, se decide plantear diversos escenarios que podrían presentarse con distintas condiciones meteorológicas (tabla 8).

Los escenarios planteados cumplen con variaciones en los siguientes parámetros: horario (día / noche), intensidad de radiación para el día (débil, moderada o intensa) o nubosidad para la noche, viento medio horizontal (0,5 m/s; 2 m/s; y 5 m/s).

Tabla 8. Escenarios para la evaluación del modelo gaussiano

| | Horario | Temperatura ambiente (°C) | Radiación/Nubosidad | Velocidad de viento (m/s) |
|---------|---------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| Caso 1 | Día | 32,1 | Débil | 0,5 |
| Caso 2 | Día | 32,1 | Débil | 2 |
| Caso 3 | Día | 32,1 | Débil | 5 |
| Caso 4 | Día | 32,1 | Moderada | 0,5 |
| Caso 5 | Día | 32,1 | Moderada | 2 |
| Caso 6 | Día | 32,1 | Moderada | 5 |
| Caso 7 | Día | 32,1 | Intensa | 0,5 |
| Caso 8 | Día | 32,1 | Intensa | 2 |
| Caso 9 | Día | 32,1 | Intensa | 5 |
| Caso 10 | Noche | 19,1 | Sin nubes | 0,5 |
| Caso 11 | Noche | 19,1 | Sin nubes | 2 |
| Caso 12 | Noche | 19,1 | Sin nubes | 5 |
| Caso 13 | Noche | 19,1 | Nuboso | 0,5 |
| Caso 14 | Noche | 19,1 | Nuboso | 2 |
| Caso 15 | Noche | 19,1 | Nuboso | 5 |

Cada escenario planteado se simulará para la emisión de dos contaminantes (SO₂ y NO_x). Y el cálculo se realizará para distintas distancias a la fuente: 100 m, 250 m, 500 m, 750 m, 1 Km, 2 Km, 3 Km, 4 Km, 5 Km, 6 Km, 7 Km, 8 Km, 9 Km, 10 Km.

4.2 Análisis del Modelo de Pluma de Gauss para los Casos Planteados

Una vez que se establece las condiciones de los casos planteados, se generan datos de evaluación del modelo gaussiano a las distintas distancias de la fuente (Anexo 4). A fin de mejorar la visualización del comportamiento de los casos, las curvas generadas se asocian en dos grupos: durante el día y durante la noche. En cada grupo los escenarios varían dependiendo de la intensidad de radiación o nubosidad, y velocidad del viento.

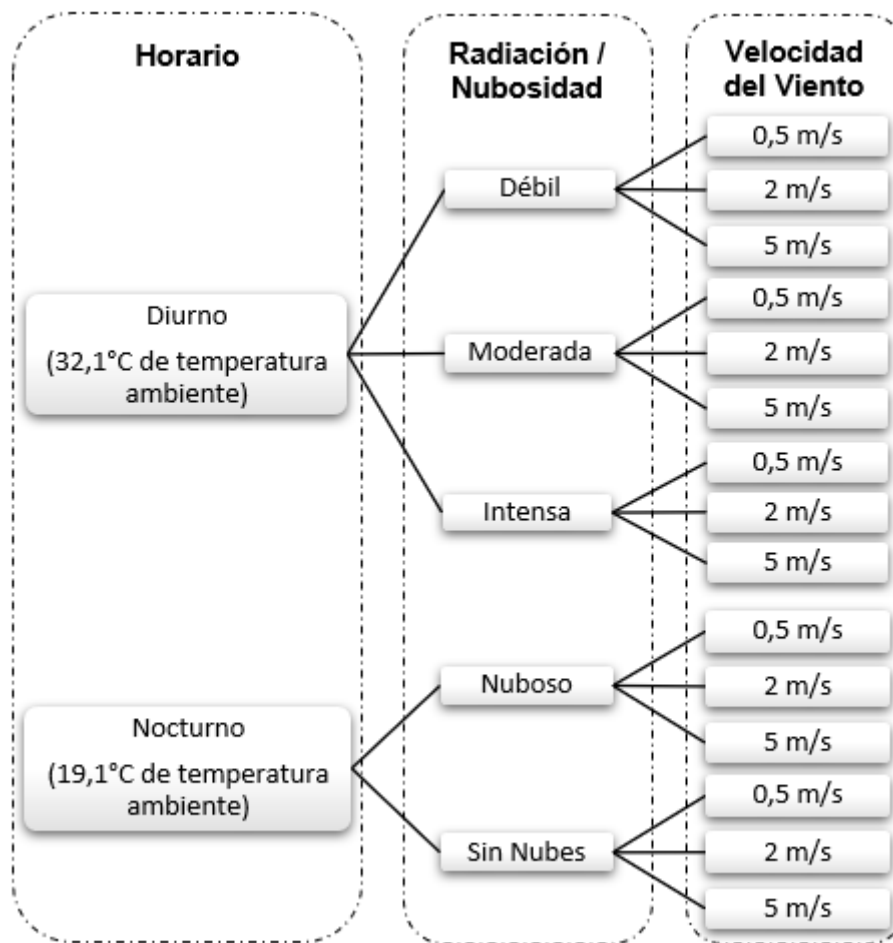


Figura 7. Consideraciones meteorológicas para establecer escenarios de estudio

4.2.1 Análisis para los Dióxidos de Azufre (SO₂)

El contaminante de mayor cuidado según los límites establecidos por el Ministerio del Ambiente es el SO₂ (200 µg/m³), sin embargo, se dan mayor número de casos en el que las condiciones meteorológicas no favorece a una dispersión apropiada. En las figuras 8 y 9 se modelan gráficamente los resultados de la evaluación de la dispersión de SO₂ en los escenarios planteados desde la fuente hasta distancias de 3 Km, ya que a recorridos superiores la concentración se reduce notablemente, considerando que el contaminante llega a tocar el suelo.

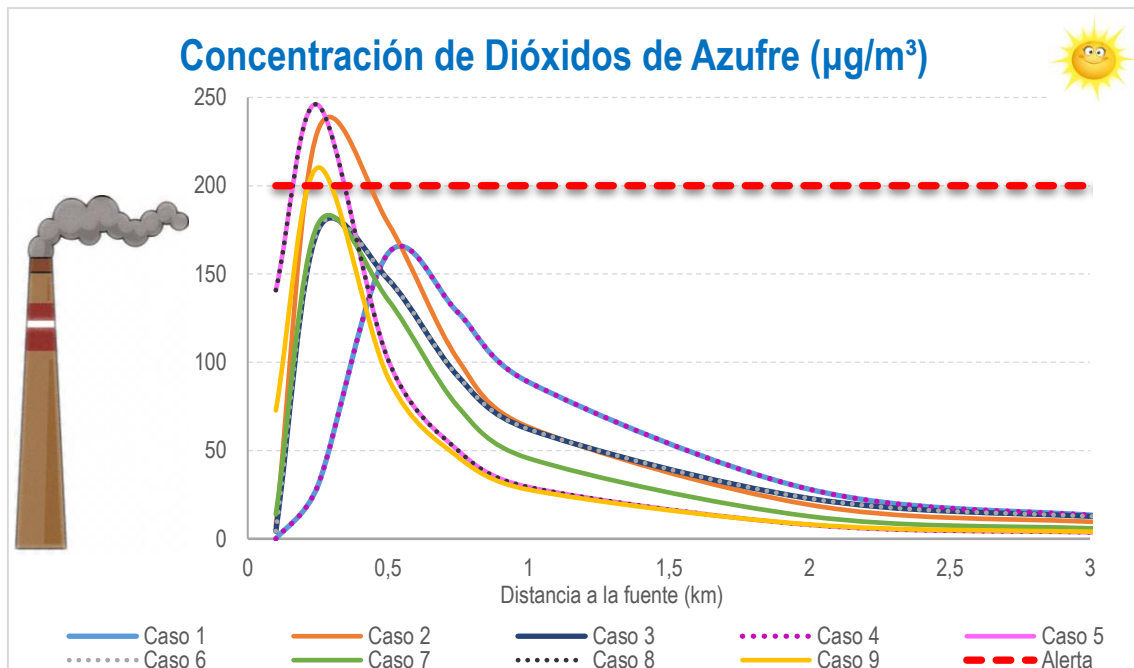


Figura 8. Curvas de dispersión de SO_2 durante el día para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación.

En la figura 8 se muestra los escenarios que posiblemente ocurren durante las horas diurnas, notando que a distancias superiores a 2 km las concentraciones de SO_2 tienen un comportamiento relativamente bajo, inferior a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observan tres curvas que sobrepasan el límite permisible para concentraciones de dióxido de azufre para cortas distancias a la fuente (menos de 500 m), estas corresponden a los Casos 2, 5, 8 y 9. Para los Casos 5 y 8, se muestran las curvas sobrepuestas debido a que entre ellas únicamente varía la intensidad solar de moderada a intensa, lo cual tiene el mismo impacto sobre la dispersión del contaminante.

Los escenarios que describen una dispersión mayormente favorable son los Casos 1 y 4, estas dos curvas muestran igual dispersión y sus concentraciones más altas llegan a valores bajo límite de alerta e inferiores a el resto de los escenarios. Expresado de otra manera, los contaminantes se dispersan mejor a una temperatura ambiente de $32,1^\circ\text{C}$ en el día, con radiación solar de débil a moderada, y con velocidad del viento imperceptible (calmas).

Al contrario, los peores escenarios que podrían darse en el día alcanzan niveles que superan el límite de alerta. Los pronósticos más altos de concentración durante la dispersión de contaminante NO_x son los Casos 2, 5, 8, y 9, a distancias menores de 500 metros a la fuente. Se podría deducir que, en horarios de la mañana, a temperatura ambiente alrededor de $32,1^\circ\text{C}$, velocidad del viento superior a 2 m/s y radiación

moderada a intensa son condiciones que no favorecen a una dispersión apropiada, es decir, la inestabilidad se reduce si el viento horizontal aumenta.

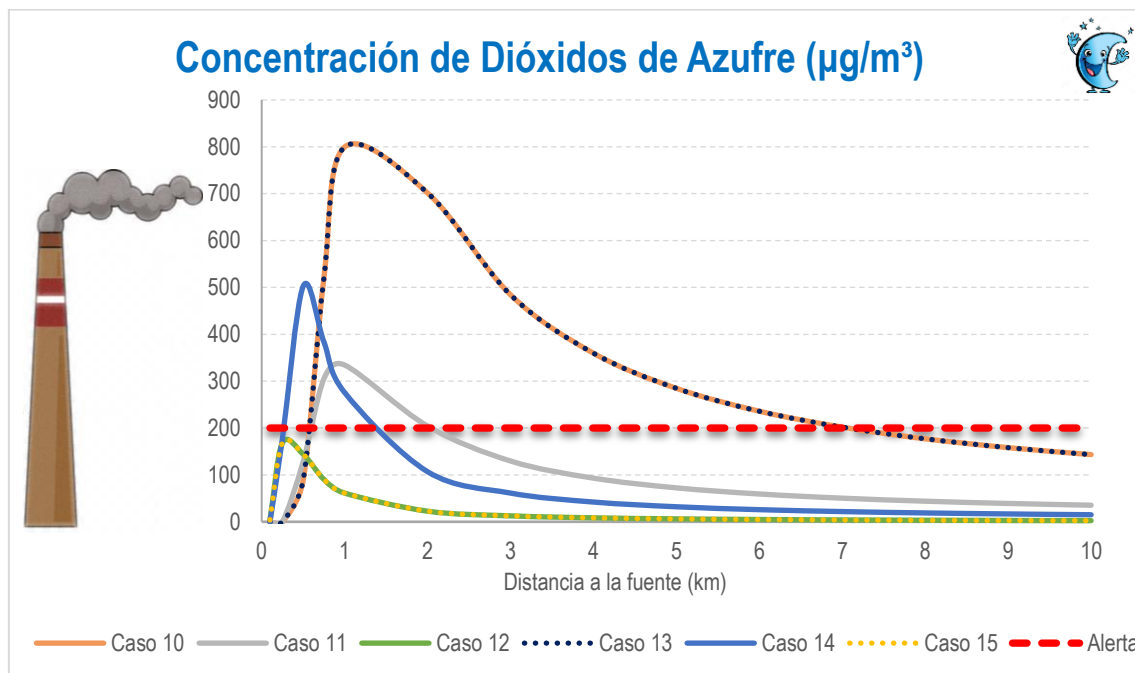


Figura 9. Curvas de dispersión de SO_2 durante la noche para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación.

En la figura 9, se establecen los escenarios durante la noche cuando hay ausencia de radiación solar, se ve influenciada por la cobertura de nubes, y alcanza las temperaturas más bajas del día. La mayoría de los escenarios nocturnos superan el nivel de alerta ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para distancias a pocos kilómetros de la fuente.

Los escenarios cuyas concentraciones altas llegan a valores inferiores al límite de alerta durante la dispersión de contaminante son los Casos 12 y 15, es decir, en la noche con cielo despejado o cubierto y con velocidad del viento superior a 5 m/s los contaminantes se dispersan mejor.

Los peores escenarios en la noche que alcanzan los niveles más altos de concentración durante la dispersión de contaminante SO_2 son los Casos 10 y 13; ya sea con el cielo cubierto o sin nubes, y la velocidad del viento esté o no en calma, los niveles de concentración alcanzan valores extremadamente altos superando el límite de alerta, hasta 7 km de distancia a la fuente. Estos valores extremos de concentración del contaminante varían entre 200 a $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir que llegan a cuatro veces más que el umbral estipulado en la legislación.

Los escenarios no tan extremos como son los Casos 11 y 14 también son pronósticos que superan los límites permisibles y crean concentraciones altas a distancias inferiores de 1 km de la fuente de emisión.

4.2.2 Análisis para los Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Aunque los NO_x son contaminantes muy reactivos, también se realiza la estimación de su concentración con el modelo gaussiano. En las figuras 10 y 11 se puede apreciar el comportamiento de la dispersión del contaminante en cada escenario, desde la fuente hasta distancias más alejadas, considerando que los óxidos de nitrógeno tocan el suelo, la concentración es el valor correspondiente a $z = 0$, es decir en la superficie. Durante el día, se nota cómo la concentración disminuye a medida que se aleja de la fuente.

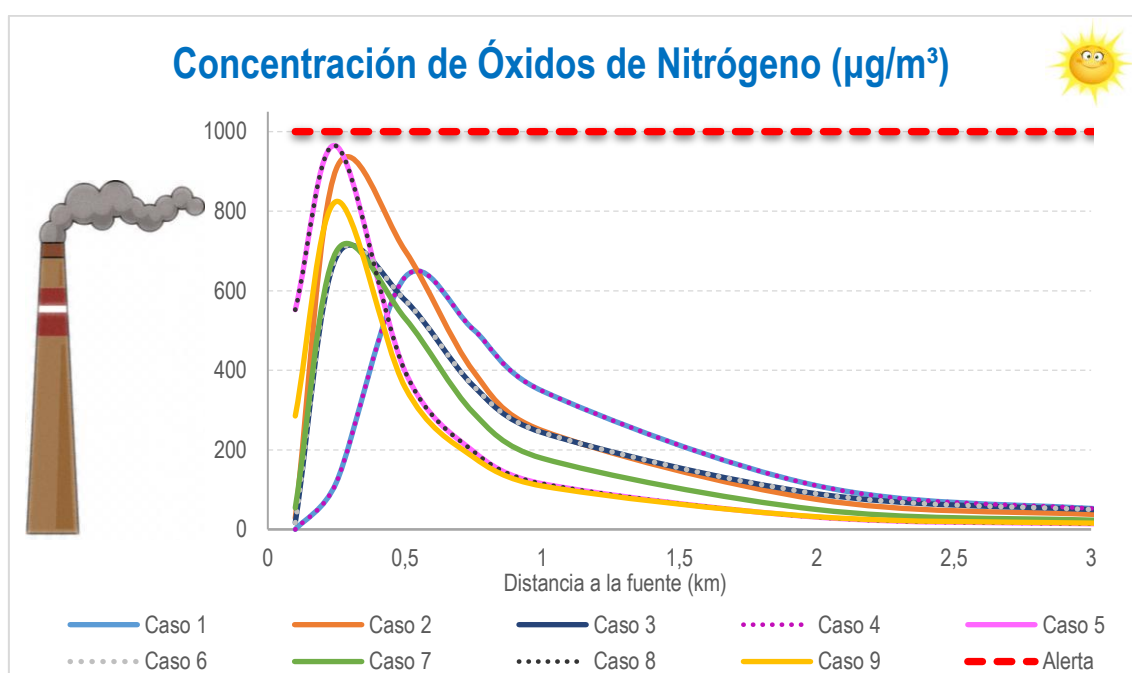


Figura 10. Curvas de dispersión de NO_x durante el día para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación.

En la figura 10, para todos los escenarios planteados se observa que a distancias superiores a 2 km las concentraciones de NO_x tienen un comportamiento relativamente bajo. Para ciertos casos, las curvas generadas muestran similitudes en todas las distancias estimadas. La curva del Caso 1 describe el mismo comportamiento que el Caso 4, al igual que el Caso 3 con el Caso 6, y el Caso 5 con el Caso 8, en todas las parejas de escenarios se plantea la misma velocidad de viento entre sí, pero distinta intensidad de radiación, por lo que se determina que el factor más influyente es la velocidad del viento.

Los escenarios cuyas concentraciones llegan a valores más bajos son los Caso 1 y Caso 4, es decir, en el día con radiación solar de débil a moderada y con velocidad del viento imperceptible (calmas) los contaminantes se dispersan favorablemente.

Al contrario, los peores escenarios que en el día alcanzan los niveles más altos de concentración durante la dispersión de contaminante NO_x son los Casos 2, 5 y 8; es decir, mientras sea de día, en cualquier intensidad de radiación, y velocidad del viento cercana a 2 m/s, los niveles de concentración alcanzan valores cercanos al límite de alerta, porque el movimiento horizontal inhibe la mezcla vertical asociada a la convección.

Al evaluar la dispersión de óxidos de nitrógeno, se observa que en todos los casos planteados en el día, ninguno sobrepasa el nivel de alerta ($1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo cual no ocurre durante la noche.

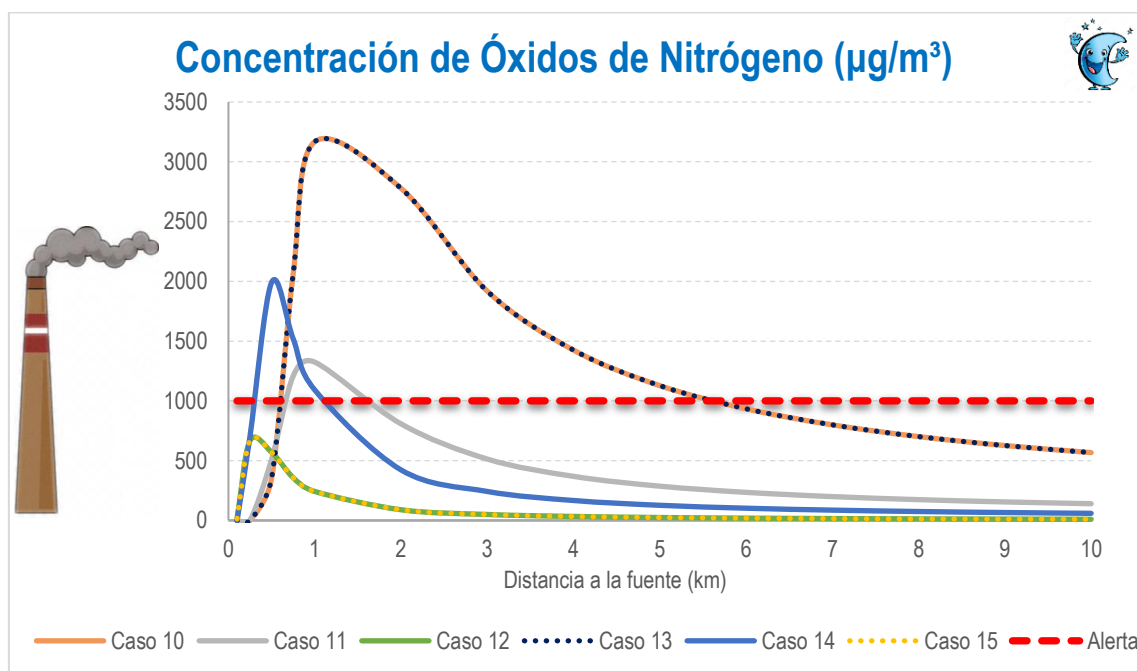


Figura 11. Curvas de dispersión de NO_x durante la noche para cada caso (tabla 8). La línea discontinua representa el límite según la legislación.

En la figura 11, se establecen los escenarios durante la noche cuando hay ausencia de radiación solar y se ve influenciada por la cobertura de nubes. A diferencia del día, la mayoría de los escenarios nocturnos superan el nivel de alerta. Durante la noche, sin radiación solar se suprimen los movimientos verticales por el predominio de la estabilidad atmosférica.

Igual que en la figura anterior, existen parejas de casos que describen la misma trayectoria y niveles de concentración del contaminante, la curva Caso 10 coincide con los valores de concentración que el Caso 13, y el Caso 12 con el Caso 15.

Los escenarios cuyas concentraciones altas llegan a valores inferiores al límite de alerta para la dispersión de contaminante son los Casos 12 y 15, es decir, en la noche con cielo despejado o cubierto y con velocidad del viento cercana a 5 m/s los contaminantes se dispersan mejor.

Al contrario, los peores escenarios en la noche que alcanzan los niveles más altos de concentración durante la dispersión de contaminante NO_x son los Casos 10 y 13; ya sea con el cielo cubierto o sin nubes, y la velocidad del viento esté en calma o no, los niveles de concentración alcanzan valores extremadamente altos superando el nivel de alerta, y superando tres veces el umbral de alerta a una distancia de 1 Km de la fuente.

Los escenarios no tan extremos como son los Casos 11 y 14 también son pronósticos que superan los límites permisibles y crean concentraciones altas a distancias inferiores de 1 km de la fuente de emisión.

5 Conclusiones

- En el presente trabajo se ha evaluado la dispersión de contaminantes desde un foco emisor de una industria dedicada a la actividad petrolera, donde requieren generar electricidad y su energía primaria es el petróleo, usando un modelo de dispersión de pluma gaussiana para estimar las distribuciones posibles de los contaminantes SO_2 y NO_x , tomando en cuenta condiciones meteorológicas de la región amazónica de Ecuador.
- Dentro del proceso a determinar la calidad del aire, fue necesario estimar la producción de los contaminantes emitidos por seis equipos de generación (7.574 mg/s de SO_2 y 30.000 mg/s de NO_x), basándose en las características de diseño de los motores de las unidades HYUNDAI HiMSEN tipo 9H21/32. Este modelo fue incorporado al esquema de autogeneración de electricidad que posee una empresa dedicada a la producción y explotación de petróleo.
- Se analizó la información meteorológica disponible en la región, sin embargo, esta presenta vacíos importantes que dificultaron establecer condiciones frecuentes del lugar. Por esta razón, se consideró establecer diversos escenarios que permitan cubrir la variabilidad de los datos meteorológicos disponibles, siendo estos los casos que podrían ocurrir mientras los motores se encuentran operativos.

- Los escenarios de condiciones meteorológicas incluyen dos momentos del día (día y noche), con tres intensidades de radiación de día y dos coberturas de nubes de noche. Se consideran tres condiciones de viento para cada momento del día e intensidad de radiación.
- Una vez que se pudo estimar la producción de SO₂ y NO_x, establecer los escenarios, e identificar los parámetros de diseño de los motores, se pudo integrar en un integraron los datos en un modelo de pluma gaussiana. La aplicación del modelo de pluma gaussiana resultó ser una herramienta útil para estimar y predecir la dispersión de los contaminantes no reactivos emitidos provenientes de las emisiones de un patio de generación que funciona a crudo como combustible.
- El resultado obtenido muestra escenarios que pueden ocurrir, en los que las condiciones meteorológicas perjudiquen la dispersión de los contaminantes, como ocurre en la noche, debido a la ausencia de radiación solar, y vientos en calma (0,5 m/s), provocando que se supriman los movimientos verticales debido a la estabilidad atmosférica. Las altas concentraciones mencionadas, se dieron a distancias de 1 kilómetro de la fuente de emisión, cuyos resultados fueron de 800 µg/m³ de SO₂ y 3.168 µg/m³ de NO_x, superando en cuatro y tres veces, respectivamente, el valor umbral para los contaminantes SO₂ (200 µg/m³) y NO_x (1.000 µg/m³), según la legislación mencionada.

6 Bibliografía

- ARCONEL. (2017). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2016*. Quito: Agencia de Regulación y Control de Electricidad.
- BCE. (2018). *Reporte del Sector Petrolero. IV Trimestre 2017*. Quito: Banco Central del Ecuador.
- BP. (2017). *BP Statistical Review of World Energy 2017*. BP.
- Buitrago Arango, J. H. (2003). *Aplicación del Modelo Gaussiano para Determinar la Calidad del Aire de Manizales. Tesis de Máster*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- CEPAL. (2014). *La dimensión Ambiental en el Desarrollo de América Latina*. Obtenido de Comisión Económica para América Latina y el Caribe: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2262/S2001612_es.pdf
- ENERFUSA. (27 de Diciembre de 2013). *Generación Eléctrica*. Obtenido de Electrógenos Hyundai: <http://www.enerfusa.com/electrogenos-hyundai/>

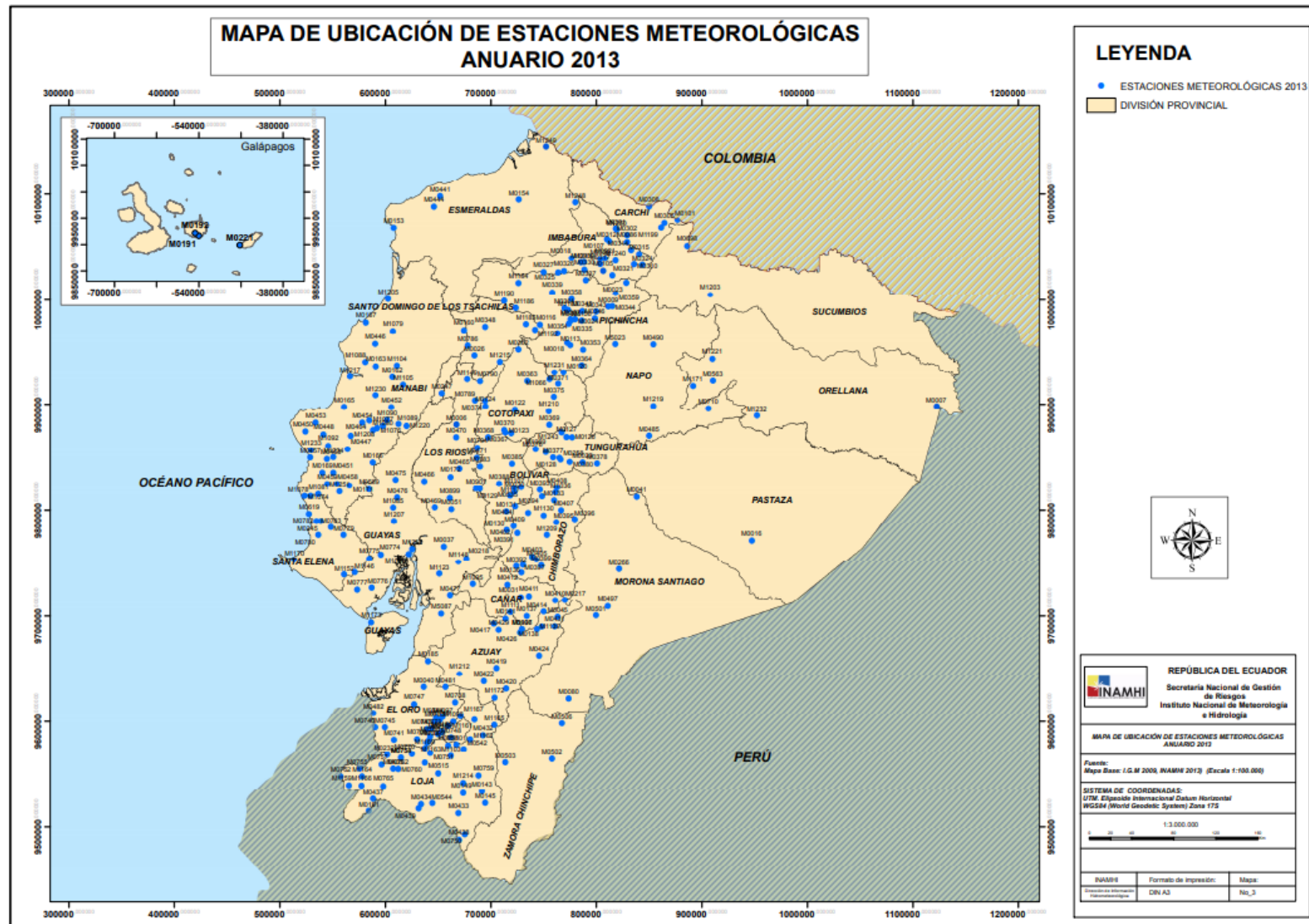
- EPA. (18 de Abril de 2018). Review of the Primary National Ambient Air Quality Standards for Oxides of Nitrogen. *Federal Register*. Estados Unidos: Environmental Protection Agency. Obtenido de <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2018-04-18/pdf/2018-07741.pdf>
- EPA. (2018). *Sulfur Dioxide (SO₂) Pollution*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#effects>
- GAPO. (2011). *Plan de Desarrollo de la Provincia de Orellana*. Puerto Francisco de Orellana: Gobierno Autónomo Provincial de Orellana.
- HYUNDAI. (Junio de 2003). Hi-Touch Medium Speed Engine Brochure - HIMSEN. Korea: HYUNDAI Heavy Industries CO. LTD.
- HYUNDAI. (Abril de 2015). Petroamazonas 27.2MW MPU. *Technical Engine Specification for Diesel Generator Engine*. Quito, Ecuador.
- INAMHI. (2014). *Anuario Meteorológico 2011*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- INAMHI. (2015). *Anuario Meteorológico 2012*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- INAMHI. (2017). *Anuario Meteorológico 2013*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- INEC; CEPAL. (2017). *Panorama Laboral y Empresarial 2017*. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censo.
- Jacob, D. J. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. New Jersey: Princeton University Press.
- Jiménez, R. (2004). Development and Application of UV-Visible and Mid-IR Differential Absorption Spectroscopy Techniques for Pollutant Trace Gas Monitoring. *Tesis Doctoral*. Lausana: EPFL.
- Kahl, J. D., & Chapman, H. L. (2018). Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation. *Atmospheric Environment*, 187, 196-209.
- Kriticos, D. J., Webber, B. L., Leriche, A., Ota, N., Macadam, I., Bathols, J., & Scott, J. K. (2012). CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 53-64.

- Mann, M. E. (Abril de 2014). *Earth Will Cross the Climate Danger Threshold by 2036*. Obtenido de Scientific American: <https://www.scientificamerican.com/article/earth-will-cross-the-climate-danger-threshold-by-2036/>
- MH. (5 de Septiembre de 2017). *Hito histórico: por primera vez, el sistema petrolero ecuatoriano usa energía del Sistema Nacional Interconectado (SNI)*. Obtenido de Ministerio de Hidrocarburos: <https://www.hidrocarburos.gob.ec/hito-historico-por-primera-vez-el-sistema-petrolero-ecuatoriano-usa-energia-del-sistema-nacional-interconectado-sni/>
- Monson, R. K., & Holland, E. A. (2001). Biospheric Trace Gas Fluxes and Their Control Over Tropospheric Chemistry. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 547-576.
- Páez Pérez, C. (2007). *Gestión de la Calidad del Aire*. Quito: Escuela Politécnica Nacional .
- Petroamazonas EP. (2015). *Filosofía de Operación y Control NCG a crudo Oso B*. Quito: Petroamazonas.
- Petroecuador. (2006). *Hitos de la Industria Petrolera 1829 - 2005*. Relaciones Institucionales de Petroecuador.
- Petroecuador. (2018). *Informe Estadístico Enero - Diciembre 2017*. Quito: EP Petroecuador.
- PNUD Ecuador. (Junio de 2018). *Low Emission Capacity Building Programme*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Ecuador: http://www.ec.undp.org/content/dam/ecuador/docs/documentos%20proyectos%20ambiente/pnud_ec%20Optimizaci%C3%B3n,%20Generaci%C3%B3n%20El%C3%A9ctrica%20y%20Eficiencia%20Energ%C3%A9tica.pdf
- Sánchez, A. H., Siabato, W. L., & Cely, J. W. (2002). Modelo de Calidad del Aire para Bogotá. *Ingeniería*, 7(1), 65-71.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Turner, B. (1970). *ATMOSPHERIC DISPERSION ESTIMATEES*. U.S. Department of Health, Education, and Welfare.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. Washington: Elsevier.

7 Anexos

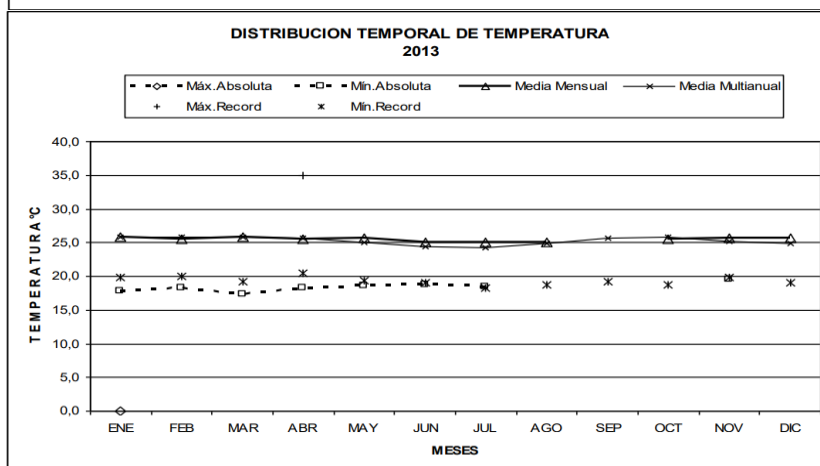
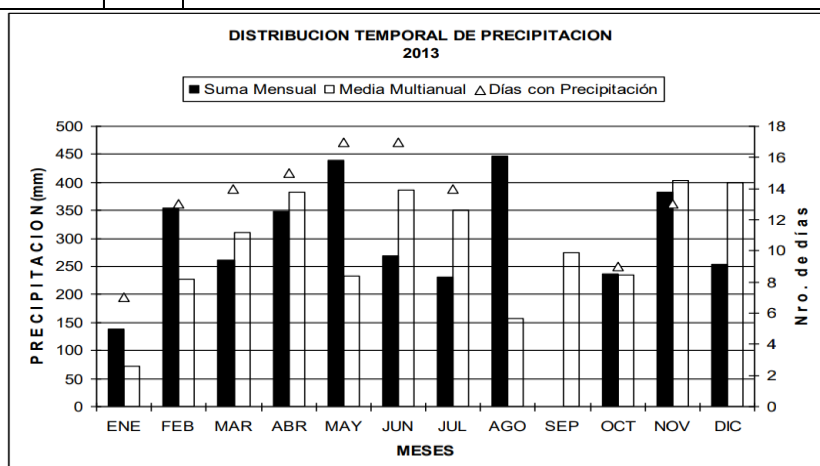
Anexo 1: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas Anuario 2013



Anexo 2: Datos Meteorológicos de la Estación San José de Payamino - M1221. (INAMHI, 2017)

| M1221 SAN JOSÉ DE PAYAMINO INAMHI | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|----|--------|----------------------|--------|---------|---------------------|------------------------|--------------------|--------|-------|----------------------------------|--------------|-----------------|-------|
| MES | HELIOFANIA (Horas) | TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C) | | | HUMEDAD RELATIVA (%) | | | PUNTO DE ROCÍO (°C) | TENSIÓN DE VAPOR (hPa) | PRECIPITACIÓN (mm) | | | Número de días con precipitación | | | |
| | | ABSOLUTAS | | MEDIAS | Máxima | Mínima | Mensual | | | Máxima | Mínima | Media | | Suma Mensual | Máxima en 24hrs | Media |
| ENERO | 59,8 | 17,8 | 3 | 19,2 | 25,9 | 99 | 1 | 96 | 25 | 98 | 25,6 | 33,5 | 138,4 | 55,2 | 18 | 7 |
| FEBRERO | 39,8 | 18,2 | 23 | 19,2 | 25,5 | | | | | 98 | 25,2 | 32,6 | 353,5 | 64,2 | 11 | 13 |
| MARZO | 67,3 | 17,4 | 11 | 19,1 | 25,9 | 100 | 12 | 71 | 20 | 98 | 25,5 | 33,2 | 262,1 | 34,8 | 14 | 14 |
| ABRIL | 69,5 | 18,2 | 4 | 19,4 | 25,5 | 100 | 18 | 90 | 1 | 98 | 25,2 | 32,8 | 348,3 | 63,5 | 12 | 15 |
| MAYO | 63,7 | 18,6 | 1 | 20,9 | 25,6 | | | | | 98 | 25,3 | 32,8 | 439,5 | 94,2 | 9 | 17 |
| JUNIO | 88,3 | 18,8 | 12 | 20,2 | 25,1 | | | | | 98 | 24,8 | 32,0 | 268,4 | 36,4 | 13 | 17 |
| JULIO | 78,9 | 18,4 | 7 | 31,8 | 19,6 | 25,0 | | | | 98 | 24,7 | 31,9 | 230,2 | 52,3 | 9 | 14 |
| AGOSTO | 89,4 | | | 32,1 | 19,6 | 25,0 | | | | 98 | 24,8 | 31,9 | 447,6 | | | |
| SEPTIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OCTUBRE | 157,5 | | | 20,2 | 25,5 | | | | | 98 | 25,3 | 33,0 | 237,2 | 55,4 | 3 | 9 |
| NOVIEMBRE | 107,5 | 19,6 | 1 | 20,9 | 25,7 | | | | | 97 | 25,3 | 32,8 | 382,9 | 70,6 | 3 | 13 |
| DICIEMBRE | 77,2 | | | 20,5 | 25,7 | | | | | 97 | 25,3 | 33,0 | 353,3 | | | |
| VALOR ANUAL | | | | | | | | | | | | | | | | |

| MES | EVAPORACIÓN (mm) | | NUBOSIDAD MEDIA (Octas) | VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIA DE VIENTO | | | | | | | | | | | | | | | | Vel. Mayor Observada (m/s) | VELOCIDAD MEDIA (Km/h) | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|-----------------|-------------------------|--|----|-----|----|-----|----|-----|----|-------|---------|-----|---|-----|---|-----|---|----------------------------|------------------------|-----|---|-----|---|-----|---|----|----|-----|-----|-----|
| | Suma Mensual | Máxima en 24hrs | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | CALMA | Nro OBS | DIR | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ENERO | | | 6 | 3,0 | 4 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 94 | 93 | 4,0 | N | 0,2 |
| FEBRERO | | | 6 | 4,0 | 1 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 2,0 | 2 | 0,0 | 0 | 96 | 84 | 4,0 | N | 0,2 | | | | | | | | |
| MARZO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,3 | |
| ABRIL | | | 6 | 3,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 5,0 | 2 | 0,0 | 0 | 3,0 | 2 | 0,0 | 0 | 93 | 90 | 6,0 | S | 0,2 | | | | | | | | |
| MAYO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | | |
| JUNIO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | | |
| JULIO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | | |
| AGOSTO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | | |
| SEPTIEMBRE | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,3 | | |
| OCTUBRE | | | 6 | 4,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 3,0 | 2 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 94 | 90 | 6,0 | N | 0,3 | | | | | | | | |
| NOVIEMBRE | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,3 | | |
| DICIEMBRE | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | | |
| VALOR ANUAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



Anexo 3: Histórico de datos meteorológico de anuarios 2011 – 2013, estación San José de Payamino - M1221. (INAMHI, 2014), (INAMHI, 2015), (INAMHI, 2017)

| M1221 | | SAN JOSÉ DE PAYAMINO | | | | | | | | | | | INAMHI | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--|--------|----------------------|------------|-------|---------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------|--|-------|-------|-------|------|--------------------------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| AÑO | MES | HELOFANIA (Horas) | TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C) | | | | HUMEDAD RELATIVA (%) | | | PUNTO DE ROCIÓ (°C) | TENSIÓN DE VAPOR (hPa) | PRECIPITACIÓN (mm) | | Número de días con precipitación | | | | | | | | | | | |
| | | | ABSOLUTAS | | MEDIAS | | Máxima día | Mínima día | Media | | | Suma Mensual | Máxima en 24hrs día | | | | | | | | | | | | |
| | | | Máxima | Mínima | Máxima | Mínima | Mensual | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2011 | ENERO | 112,0 | 18,2 | 25 | 32,8 | 20,4 | 25,7 | | | | 29,4 | 417,8 | 100,9 | 27 | 13 | | | | | | | | | | |
| | FEBRERO | 65,7 | | | 31,7 | 19,7 | 25,0 | 99 | 4 | 64 | 1 | 93 | 23,6 | 30,3 | 444,9 | | | | | | | | | | |
| | MARZO | 82,4 | | 18,8 | 27 | 32,5 | 20,1 | 24,8 | | | | 96 | 24,0 | 30,0 | 581,6 | 57,3 | 1 | 24 | | | | | | | |
| | ABRIL | 82,6 | 33,0 | 19 | | 32,0 | 19,4 | 24,9 | | | | 94 | 23,8 | 30,4 | 451,0 | | | | | | | | | | |
| | MAYO | 75,9 | | 17,4 | 1 | 32,0 | 19,4 | 25,0 | | | | 95 | 24,1 | 29,4 | 247,3 | | | | | | | | | | |
| | JUNIO | 71,0 | | 17,0 | 20 | | 19,0 | 25,1 | | | | 91 | 23,5 | | 248,2 | | | | | | | | | | |
| | JULIO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | AGOSTO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | SEPTIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | OCTUBRE | 127,0 | | 16,2 | 27 | | 18,3 | 25,3 | | | | 94 | 24,3 | 31,1 | 197,8 | | | | | | | | | | |
| | NOVIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | DICIEMBRE | 68,1 | | | | 31,7 | 20,0 | 25,0 | | | | 91 | 23,4 | 29,1 | 378,6 | 62,2 | 13 | 14 | | | | | | | |
| VALOR ANUAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2012 | ENERO | 96,3 | | | 31,9 | 19,6 | 25,6 | | | | 90 | 23,7 | 29,6 | 417,8 | 100,9 | 27 | 13 | | | | | | | | |
| | FEBRERO | 48,5 | | | 32,0 | 18,8 | 24,6 | | | | 92 | 23,1 | 28,4 | 444,9 | | | | | | | | | | | |
| | MARZO | 46,9 | | 18,2 | 1 | 31,6 | 19,4 | 24,8 | | | | 94 | 23,8 | 29,7 | 581,6 | 57,3 | 1 | 24 | | | | | | | |
| | ABRIL | 55,1 | | | | 32,1 | 20,0 | 25,2 | | | | 97 | 24,7 | 31,8 | 451,0 | | | | | | | | | | |
| | MAYO | 89,7 | | | | 31,7 | 19,5 | 24,6 | | | | 96 | 24,0 | 30,5 | 247,3 | | | | | | | | | | |
| | JUNIO | 104,4 | | 17,2 | 30 | 31,5 | 19,2 | 25,1 | | | | 95 | 24,3 | 31,1 | 248,2 | | | | | | | | | | |
| | JULIO | 39 | | | | 31,2 | 18,8 | 24,5 | | | | | | | 350,0 | | | | | | | | | | |
| | AGOSTO | 82,8 | | | | 32,9 | 18,6 | 24,7 | | | | 97 | 24,4 | 31,4 | 194,9 | | | | | | | | | | |
| | SEPTIEMBRE | 117,4 | | 17,0 | 2 | 33,8 | 19,2 | 25,0 | 99 | 1 | 70 | 5 | 97 | 24,6 | 31,8 | 184,4 | 50,0 | 9 | 8 | | | | | | |
| | OCTUBRE | 140,9 | | | | 34,1 | 20,8 | 25,8 | | | | 97 | 25,2 | 32,8 | 345,5 | | | | | | | | | | |
| | NOVIEMBRE | 140,7 | 35,0 | 1 | | 33,9 | 19,5 | 26,1 | 100 | 10 | 64 | 27 | 91 | 24,4 | 30,9 | 273,4 | 83,2 | 16 | 8 | | | | | | |
| | DICIEMBRE | 69,8 | 33,5 | 1 | 17,2 | 28 | 33,1 | 18,9 | 25,4 | 100 | 10 | 68 | 2 | 91 | 23,7 | 29,5 | 404,9 | 70,5 | 16 | 16 | | | | | |
| VALOR ANUAL | 10315 | | | | 32,5 | 19,4 | 25,1 | | | | | | | 4143,9 | | | | | | | | | | | |
| 2013 | ENERO | 59,8 | | 17,8 | 3 | | 19,2 | 25,9 | 99 | 1 | 96 | 25 | 98 | 25,6 | 33,5 | 138,4 | 55,2 | 18 | 7 | | | | | | |
| | FEBRERO | 39,8 | | | | 18,2 | 23 | 19,2 | 25,5 | | | | 98 | 25,2 | 32,6 | 353,5 | 64,2 | 11 | 13 | | | | | | |
| | MARZO | 67,3 | | 17,4 | 11 | | 19,1 | 25,9 | 100 | 12 | 71 | 20 | 98 | 25,5 | 33,2 | 262,1 | 34,8 | 14 | 14 | | | | | | |
| | ABRIL | 69,5 | | 18,2 | 4 | | 19,4 | 25,5 | 100 | 18 | 90 | 1 | 98 | 25,2 | 32,8 | 348,3 | 63,5 | 12 | 15 | | | | | | |
| | MAYO | 63,7 | | 18,6 | 1 | | 20,9 | 25,6 | | | | | 98 | 25,3 | 32,8 | 439,5 | 94,2 | 9 | 17 | | | | | | |
| | JUNIO | 88,3 | | 18,8 | 12 | | 20,2 | 25,1 | | | | | 98 | 24,8 | 32,0 | 268,4 | 36,4 | 13 | 17 | | | | | | |
| | JULIO | 78,9 | | 18,4 | 7 | 31,8 | 19,6 | 25,0 | | | | 98 | 24,7 | 31,9 | 230,2 | 52,3 | 9 | 14 | | | | | | | |
| | AGOSTO | 89,4 | | | | 32,1 | 19,6 | 25,0 | | | | 98 | 24,8 | 31,9 | 447,6 | | | | | | | | | | |
| | SEPTIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | OCTUBRE | 157,5 | | | | | 20,2 | 25,5 | | | | 98 | 25,3 | 33,0 | 237,2 | 55,4 | 3 | 9 | | | | | | | |
| | NOVIEMBRE | 107,5 | | 19,6 | 1 | | 20,9 | 25,7 | | | | 97 | 25,3 | 32,8 | 382,9 | 70,6 | 3 | 13 | | | | | | | |
| | DICIEMBRE | 77,2 | | | | | 20,5 | 25,7 | | | | 97 | 25,3 | 33,0 | 353,3 | | | | | | | | | | |
| VALOR ANUAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AÑO | MES | EVAPORACIÓN (mm) | | NUBOSIDAD MEDIA (Octas) | VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIA DE VIENTO | | | | | | | | | | | | | | Vel. Mayor Observada (m/s) DIR | VELOCIDAD MEDIA (Km/h) | | | | | |
| | | Suma | Máxima en 24hrs día | | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | CALMA | Nro OBS | | | | | | | | | | | |
| | | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | % | | | | | | | | |
| 2011 | ENERO | | | 6 | 2,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 97 | 93 | 2,0 | W | | | |
| | FEBRERO | | | 6 | 3,5 | 5 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 5,0 | 2 | 0,0 | 0 | 93 | 84 | 6,0 | W | 0,5 | | |
| | MARZO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,5 | |
| | ABRIL | | | 5 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 4,0 | 1 | 0,0 | 0 | 5,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 97 | 90 | 6,0 | S | 0,6 | | |
| | MAYO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,5 | |
| | JUNIO | | | 6 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 4,0 | 1 | 0,0 | 0 | 6,0 | 1 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 98 | 90 | 6,0 | S | 0,4 | | |
| | JULIO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | AGOSTO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | SEPTIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | OCTUBRE | | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,5 | |
| | NOVIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | DICIEMBRE | | | | 6 | 2,0 | 7 | 0,0 | 0 | 2,6 | 11 | 0,0 | 0 | 2,0 | 2 | 0,0 | 0 | 3,1 | 12 | 0,0 | 0 | 69 | 93 | 6,0 | W |
| VALOR ANUAL | | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2012 | ENERO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | FEBRERO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | MARZO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | ABRIL | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,5 | |
| | MAYO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | JUNIO | | | 6 | 3,4 | 6 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 2,5 | 4 | 0,0 | 0 | 2,8 | 6 | 0,0 | 0 | 84 | 90 | 4,0 | N | 0,4 |
| | JULIO | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | AGOSTO | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | SEPTIEMBRE | | | 6 | 3,3 | 3 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 2,7 | 3 | 0,0 | 0 | 3,2 | 6 | 0,0 | 0 | 88 | 90 | 4,0 | W | 0,5 |
| | OCTUBRE | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| | NOVIEMBRE | | | 6 | 3,6 | 6 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 3,3 | 3 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 90 | 90 | 6,0 | N | 0,4 |
| | DICIEMBRE | | | 6 | 5,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 2,5 | 4 | 0,0 | 0 | 4,0 | 3 | 0,0 | 0 | 90 | 93 | 6,0 | W | 0,4 |
| VALOR ANUAL | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,0 | |
| 2013 | ENERO | | | 6 | 3,0 | 4 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 94 | 93 | 4,0 | N | 0,2 | |
| | FEBRERO | | | 6 | 4,0 | 1 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 2,0 | 2 | 0,0 | 0 | 96 | 84 | 4,0 | N | 0,2 |
| | MARZO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,3 | |
| | ABRIL | | | 6 | 3,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 5,0 | 2 | 0,0 | 0 | 3,0 | 2 | 0,0 | 0 | 93 | 90 | 6,0 | S | 0,2 |
| | MAYO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | |
| | JUNIO | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | |
| | JULIO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | |
| | AGOSTO | | | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,2 | |
| | SEPTIEMBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | OCTUBRE | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,3 | |
| | NOVIEMBRE | | | 6 | 4,0 | 2 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 3,0 | 2 | 0,0 | 0 | 2,0 | 1 | 0,0 | 0 | 94 | 90 | 6,0 | N | 0,3 |
| | DICIEMBRE | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,4 | |
| VALOR ANUAL | | | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Anexo 4: Tabla de datos de Modelo Gaussiano para SO₂ y NO_x

| Concentraciones Dióxido de Azufre, C (µg/m ³) | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Distancia (km) | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alerta | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Caso 1 | 0,0 | 29,9 | 160,1 | 126,7 | 87,9 | 27,8 | 13,3 | 7,9 | 5,2 | 3,8 | 2,9 | 2,3 | 1,8 | 1,5 |
| Caso 2 | 7,1 | 229,0 | 177,0 | 100,1 | 62,7 | 19,1 | 9,6 | 6,0 | 4,2 | 3,1 | 2,5 | 2,0 | 1,7 | 1,5 |
| Caso 3 | 4,3 | 173,1 | 145,4 | 90,9 | 61,5 | 22,6 | 12,6 | 8,4 | 6,2 | 4,8 | 3,9 | 3,3 | 2,8 | 2,5 |
| Caso 4 | 0,0 | 29,9 | 160,1 | 126,7 | 87,9 | 27,8 | 13,3 | 7,9 | 5,2 | 3,8 | 2,9 | 2,3 | 1,8 | 1,5 |
| Caso 5 | 139,4 | 243,3 | 100,3 | 49,4 | 29,0 | 7,8 | 3,6 | 2,1 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| Caso 6 | 4,3 | 173,1 | 145,4 | 90,9 | 61,5 | 22,6 | 12,6 | 8,4 | 6,2 | 4,8 | 3,9 | 3,3 | 2,8 | 2,5 |
| Caso 7 | 13,7 | 176,5 | 134,0 | 73,8 | 45,1 | 12,6 | 5,9 | 3,5 | 2,3 | 1,7 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,7 |
| Caso 8 | 139,4 | 243,3 | 100,3 | 49,4 | 29,0 | 7,8 | 3,6 | 2,1 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| Caso 9 | 72,0 | 208,1 | 90,2 | 45,8 | 27,5 | 8,0 | 4,0 | 2,5 | 1,7 | 1,3 | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,6 |
| Caso 10 | 0,0 | 0,0 | 88,4 | 519,9 | 799,7 | 701,4 | 484,2 | 359,6 | 284,7 | 235,8 | 201,9 | 177,0 | 158,1 | 143,3 |
| Caso 11 | 0,0 | 0,1 | 128,3 | 304,7 | 334,3 | 204,0 | 129,7 | 93,1 | 72,4 | 59,3 | 50,4 | 43,9 | 39,1 | 35,3 |
| Caso 12 | 3,9 | 168,4 | 144,1 | 90,4 | 61,2 | 22,6 | 12,6 | 8,4 | 6,2 | 4,8 | 3,9 | 3,3 | 2,8 | 2,5 |
| Caso 13 | 0,0 | 0,0 | 88,4 | 519,9 | 799,7 | 701,4 | 484,2 | 359,6 | 284,7 | 235,8 | 201,9 | 177,0 | 158,1 | 143,3 |
| Caso 14 | 0,0 | 177,4 | 502,4 | 383,7 | 275,7 | 106,8 | 61,2 | 42,1 | 32,0 | 25,8 | 21,8 | 18,9 | 16,7 | 15,0 |
| Caso 15 | 3,9 | 168,4 | 144,1 | 90,4 | 61,2 | 22,6 | 12,6 | 8,4 | 6,2 | 4,8 | 3,9 | 3,3 | 2,8 | 2,5 |

| Concentraciones Óxidos de Nitrógeno, C (µg/m ³) | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Distancia (km) | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Alerta | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Caso 1 | 0,0 | 118,5 | 634,3 | 501,9 | 348,1 | 110,0 | 52,7 | 31,1 | 20,8 | 14,9 | 11,3 | 8,9 | 7,3 | 6,0 |
| Caso 2 | 28,0 | 907,1 | 701,0 | 396,7 | 248,4 | 75,5 | 37,9 | 23,6 | 16,5 | 12,5 | 9,9 | 8,1 | 6,8 | 5,9 |
| Caso 3 | 16,8 | 685,7 | 576,1 | 360,0 | 243,6 | 89,6 | 50,0 | 33,3 | 24,5 | 19,2 | 15,6 | 13,1 | 11,2 | 9,8 |
| Caso 4 | 0,0 | 118,5 | 634,3 | 501,9 | 348,1 | 110,0 | 52,7 | 31,1 | 20,8 | 14,9 | 11,3 | 8,9 | 7,3 | 6,0 |
| Caso 5 | 552,3 | 963,6 | 397,3 | 195,6 | 114,9 | 30,9 | 14,4 | 8,4 | 5,6 | 4,0 | 3,0 | 2,4 | 1,9 | 1,6 |
| Caso 6 | 16,8 | 685,7 | 576,1 | 360,0 | 243,6 | 89,6 | 50,0 | 33,3 | 24,5 | 19,2 | 15,6 | 13,1 | 11,2 | 9,8 |
| Caso 7 | 54,1 | 699,0 | 530,7 | 292,5 | 178,7 | 50,0 | 23,4 | 13,7 | 9,1 | 6,5 | 5,0 | 3,9 | 3,2 | 2,6 |
| Caso 8 | 552,3 | 963,6 | 397,3 | 195,6 | 114,9 | 30,9 | 14,4 | 8,4 | 5,6 | 4,0 | 3,0 | 2,4 | 1,9 | 1,6 |
| Caso 9 | 285,1 | 824,5 | 357,4 | 181,2 | 109,1 | 31,9 | 15,9 | 9,9 | 6,9 | 5,2 | 4,1 | 3,4 | 2,8 | 2,4 |
| Caso 10 | 0,0 | 0,0 | 350,3 | 2.059,5 | 3.167,7 | 2.778,6 | 1.918,0 | 1.424,6 | 1.127,7 | 934,2 | 799,6 | 701,3 | 626,4 | 567,7 |
| Caso 11 | 0,0 | 0,6 | 508,0 | 1.207,1 | 1.324,3 | 808,1 | 513,7 | 368,7 | 286,6 | 234,8 | 199,5 | 174,0 | 154,8 | 139,9 |
| Caso 12 | 15,3 | 667,0 | 570,6 | 357,9 | 242,6 | 89,4 | 49,9 | 33,3 | 24,5 | 19,1 | 15,6 | 13,1 | 11,2 | 9,8 |
| Caso 13 | 0,0 | 0,0 | 350,3 | 2.059,5 | 3.167,7 | 2.778,6 | 1.918,0 | 1.424,6 | 1.127,7 | 934,2 | 799,6 | 701,3 | 626,4 | 567,7 |
| Caso 14 | 0,0 | 702,5 | 1.990,1 | 1.519,9 | 1.092,1 | 423,1 | 242,5 | 166,8 | 126,7 | 102,4 | 86,2 | 74,7 | 66,1 | 59,5 |
| Caso 15 | 15,3 | 667,0 | 570,6 | 357,9 | 242,6 | 89,4 | 49,9 | 33,3 | 24,5 | 19,1 | 15,6 | 13,1 | 11,2 | 9,8 |