



**COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DIRECCIÓN COOPERATIVA DE INGENIERIA Y
PROYECTO DE INFRAESTRUCTURA**

ESTUDIO DE DISPERSIÓN DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA



**CUATRO UNIDADES MÓVILES ELÉCTRICAS A INSTALARSE
EN LA CCI BCS**

	CONTENIDO	Pág.
1.	GENERALIDADES	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Objetivo General	4
1.2.1	Objetivos Particulares	4
1.2.2	Escenarios	5
1.3	Área de estudio	6
1.4	Procedimiento de Análisis	7
2.	INFORMACIÓN PROCESADA	8
2.1	Características del relieve	8
2.2	Condiciones de operación. Unidad móviles eléctricas	9
2.3	Meteorología	12
	2.3.1 Temperatura	13
	2.3.2 Movimiento horizontal de los gases	15
	2.3.3 Rosa de vientos	15
	2.3.4 Estabilidad atmosférica	17
	2.3.5 Altura de capa de mezclado	19
3	MODELO DE DISPERSIÓN	20
3.1	Descripción	20
3.2	Requisitos de datos de entrada	21
3.3	Clasificación del medio urbano o rural	22
3.4	Dominio de cálculo	23

	CONTENIDO	Pág.
3.5	Tratamiento de vientos en calma	24
3.6	Calidad del aire en la ciudad de La Paz, BCS	24
4.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO A LA CALIDAD DEL AIRE	27
4.1	Resultados. Impactos a la calidad del aire	27
4.2	Análisis de resultados	28
4.3	Conclusiones	34
5	REFERENCIAS	35

	LISTA DE TABLAS	Pág.
1	Capacidad de las unidades móviles eléctricas para la CCI Baja California Sur	1
2	Niveles máximos permisibles establecidos por la autoridad Estatal ambiental	4
3	Geometría de la chimenea y características de las emisiones de los gases de combustión con la operación de diésel	11
4	Estabilidad atmosférica, 2018	18
5	Resultados del monitoreo perimetral efectuado de julio a diciembre de 2019	26
6	Resultados de la modelación de la dispersión del SO ₂ , NO ₂ y PM10	28
7	Valores estimados más concentraciones de fondo en la ciudad de La Paz BCS	33

LISTA DE FIGURAS		Pág.
1	Ubicación de las cuatro Unidades Móviles Eléctricas dentro de la CCI Baja California Sur	
2	Área de estudio	6
3	Topografía de la zona de estudio	8
4	Malla de receptores	9
5	Temperaturas promedio mensual, 2018	14
6	Temperaturas máximas y mínimas mensuales, 2018	14
7	Rosa de vientos anual, 2018	16
8	Altura de capa de mezclado, 2018	20
9	Ubicación de la estaciones de medición de la calidad del aire	25
10	Curvas de isoconcentración del SO ₂ a 24 horas por la operación de cuatro unidades móviles de eléctricas. Diésel 0.05%	29
11	Curvas de isoconcentración del SO ₂ por la operación de cuatro unidades móviles de eléctricas a 24 horas. Diésel 0.5%	30
12	Curvas de isoconcentración del NO ₂ por la operación de cuatro unidades móviles eléctricas	31
13	Curvas de isoconcentración del PM10 por la operación de cuatro unidades móviles de eléctricas	32

1 GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El Sistema Aislado Baja California Sur presenta déficit de energía eléctrica, principalmente en la época de verano, lo cual ha ocasionado problemática social con reclamos de la ciudadanía e industriales de la zona por cortes de energía eléctrica. En el año 2019 el Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE) declaró once estados operativos de emergencia por margen de reserva menor al 4% con cortes de energía para mantener la estabilidad del Sistema; dentro de esos once estados se encuentra Baja California Sur (BCS). Esta condición de estado de emergencia para BCS se debió principalmente a un incremento en la demanda de energía de la región, a la dificultad para dar mantenimiento en las unidades por el margen de reserva y al rezago en los mantenimientos de las unidades base. Derivado de lo anterior, se tiene la necesidad de instalar unidades generadoras móviles eléctricas que permitan incrementar los recursos de generación de energía en la zona, con tecnologías más eficientes y amigables con el medio ambiente, lo cual se traduce en menores precios de generación de energía eléctrica.

La configuración respecto a la capacidad de las unidades de móviles eléctricas a instalarse en el predio de la CCI Baja California Sur se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Capacidad de las unidades móviles eléctricas para la CCI Baja California Sur

CENTRAL DE COMBUSTIÓN INTERNA BAJA CALIFORNIA SUR				
Concepto	Unidad 3 CTG Lechería	Turbogas Nueva	07BCSBCU-U07	Unidad 4 CTG Lechería
Capacidad Instalada	32.0 MW	44.0 MW	26.0 MW	42.0 MW
Capacidad Neta	31.910 MW	43.500 MW	25.850 MW	41.910 MW
Combustible	Diésel	Diésel	Diésel	Diésel
Interconexión a la red	Transformador de 89.6 MVA		Transformador de 94.1 MVA	

** Información proporcionada por CFE Generación EPS III

Para evaluar los posibles impactos a la atmosfera por la operación de las cuatro unidades móviles eléctricas se realizó el presente estudio denominado “*Estudio de dispersión de emisiones atmosféricas de cuatro unidades móviles eléctricas a instalarse en la CCI BCS*”. Este estudio de dispersión se realizó mediante la aplicación de un modelo de atmosférico que toma en cuenta las variables de operación de las cuatro unidades móviles eléctricas, la topografía existente en la zona de estudio, las condiciones costeras, así como los parámetros meteorológicos tanto de superficie y de altura registrados en el año de 2018.

Para estimar los posibles impactos a la calidad del aire por las emisiones derivadas de la combustión del diésel en las cuatro unidades móviles eléctricas se empleó el modelo de dispersión de contaminantes gaussiano denominado AERMOD que desarrolló la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos (USEPA), los valores máximos estimados por este modelo de dispersión se compararon con los límites permisibles de calidad del aire que establece la autoridad ambiental para verificar el grado de cumplimiento de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, BCS.

La ubicación de las cuatro unidades móviles eléctricas se planeó estratégicamente desde el punto de vista operativo y ambiental para lograr menores impactos al medio ambiente ya que se utilizará la infraestructura y servicios ya existentes en la CCI Baja California Sur, lo anterior además de obedecer los criterios de planeación propios de la CFE que busca siempre la optimización de los costos y beneficios para el Sector Eléctrico Nacional y de la región. En la figura 1 se muestra la ubicación de las cuatro unidades móviles eléctrica a instalarse dentro del predio de la CCI BCS.

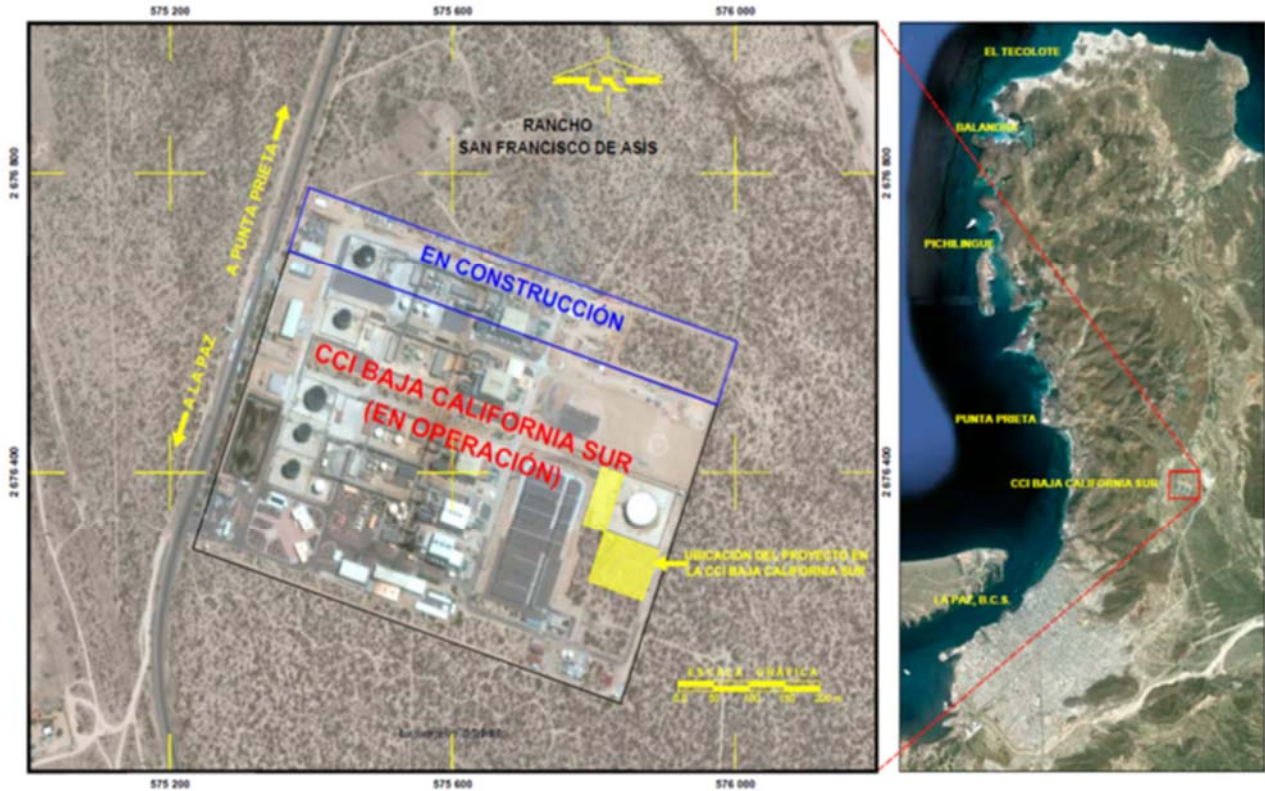


Figura 1. Ubicación de las cuatro Unidades Móviles Eléctricas dentro de la CCI Baja California Sur.

Por ser unidades de respaldo, las unidades móviles de eléctricas operarán de manera intermitente principalmente durante los picos de demanda de verano. Estas unidades operarán con diésel y se planea operar posteriormente con gas natural. Las emisiones derivadas por la combustión con diésel son bióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NOx), y partículas suspendidas totales (PST). Cabe señalar para las unidades móviles de emergencia con capacidades menores a 45 MW aún no existe normativa que regule las emisiones a la atmósfera generadas durante la operación de las mismas. Sin embargo en la actualización de la Licencia Ambiental Única LAU-03/00001-2018, la Delegación Federal en Baja California Sur de la SEMARNAT establece en su condicionante No. VI. Que en la operación de unidades aeroderivadas, generadores de emergencia y bombas contra incendio deberán ajustarse a los siguientes niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes para operación de calentamiento directo, tabla 2.

Tabla 2. Niveles máximos permisibles establecidos por la autoridad Estatal ambiental

Contaminante	Niveles máximos permisibles	Monitoreo
Óxidos de Nitrógeno	2 300 ppm al 5% de oxígeno base seca, 1 atm. Y 25°C	Mensual
Bióxido de Azufre	2 200 ppm al 5% de oxígeno base seca, 1 atm. Y 25°C	Anual

Es importantes mencionar que la CCI Baja California Sur realiza mediciones periódicas de sus emisiones en chimeneas y monitoreos de la calidad del aire en la ciudad de La Paz cuyos reportes se entregan a la autoridad ambiental del Estado.

1.2 Objetivo General

Estimar el posible impacto a la calidad del aire de manera espacial y temporal por emisiones de bióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas suspendidas totales (PST) generadas por la combustión del diésel en la operación de cuatro unidades móviles eléctricas que serán utilizadas como unidades de respaldo con una capacidad total de generación de 148 MW a instalarse dentro del predio de la CCI Baja California Sur, localizada en el llano Laguna del Coyote, Baja California Sur.

1.2.1 Objetivos Particulares

- Definir el área de influencia a evaluar, considerando variables de topográficas, de la zona a analizar, los datos meteorológicos de la zona, así como los parámetros de operación de las cuatro unidades móviles eléctricas.
- Estimar las concentraciones del bióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas suspendidas totales (PST) de manera espacial y temporal en el área de influencia de las emisiones generadas por la combustión del diésel, mediante un modelo de dispersión de emisiones a la atmósfera.

- Identificar las posibles zonas de impacto mediante gráficos de rosa de vientos, perfiles de viento e isolíneas de concentración de los productos de combustión a partir de la información meteorológica, topográfica y de la zona costera, así como de las condiciones de operación de las cuatro unidades móviles de emergencia.
- Comparar los valores estimados por el modelo con los límites máximos permisibles de calidad del aire establecido por la autoridad ambiental en las respectivas normas de calidad del aire.

1.2.2 Escenarios

En este estudio se desarrollaron los siguientes escenarios para estimar los posibles impactos a la calidad del aire por las emisiones de las cuatro unidades móviles eléctricas de manera espacial y temporal a instalarse dentro del predio de la CCI Baja California Sur.

- Estimar las concentraciones de los óxidos de nitrógeno a una hora y sin equipo de control de emisiones considerando una malla topográfica cartesiana de 25 X 25 km para determinar el posible impacto en las zonas aledañas de la central termoeléctrica CCI Baja California Sur y a la ciudad de La Paz, BCS.
- Estimar las concentraciones del Bióxido de Azufre a 24 horas, considerando un porcentaje de 0.05% de azufre en el diésel y una malla topográfica cartesiana de 25 X 25 km para determinar el posible impacto en las zonas aledañas de la central termoeléctrica CCI Baja California Sur y a la ciudad de La Paz, BCS.
- Estimar las concentraciones del Bióxido de Azufre a 24 horas, considerando un porcentaje de 0.5% de azufre en el diésel y una malla topográfica cartesiana de 25 X 25 km para determinar el posible impacto en las zonas aledañas de la central termoeléctrica CCI Baja California Sur y a la ciudad de La Paz, BCS.
- Estimar las concentraciones de las Partículas Suspendidas Totales a 24 horas, considerando una malla topográfica cartesiana de 25 X 25 km para determinar el posible impacto en las zonas aledañas de la central termoeléctrica CCI Baja California Sur y a la ciudad de La Paz, BCS.

1.3 Área de estudio

En el presente informe se estableció un área cartesiana de 25 X 25 km para estimar la dispersión de las concentraciones de los NO_x, del SO₂ y las PST de manera espacial y temporal por la operación de las cuatro unidades móviles eléctricas tomando como centro del área de estudio la ubicación de la unidad móvil eléctrica UME-2. Este punto central se localiza en las coordenadas en grados decimales de latitud Norte 24° 11.841', longitud Oeste 110° 15.189' y una altitud de 105 metros sobre el nivel medio del mar.

El área de estudio cubre a toda la ciudad de La Paz, al llano La laguna del coyote donde se localiza la CCI BCS, el cual se ubica a aproximadamente 8.5 kilómetros del centro de la ciudad de la Paz. También abarca los cerros y lomeríos que sirven como barreras naturales que protegen a la zona urbana de La Paz. Figura 2.



Figura 2. Área de estudio

1.4 Procedimiento de Análisis

Para evaluar los posibles impactos a la calidad del aire por las emisiones al aire ocasionado por la operación de las cuatro unidades móviles eléctricas, las cuales operarán con diésel como combustible principal para la generación de energía eléctrica, se utilizó un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos avalado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) denominado AERMOD. El modelo es recomendado por la USEPA para radios de afectación menores a 50 km y en donde se presentan cambios de cobertura agua, suelo.

En la ejecución del modelo de dispersión se utilizó información topográfica digitalizada de la zona de estudio y se empleó una malla de 25 X 25 km tomando como centro de referencia la ubicación de la UME-02, lo anterior de acuerdo a los criterios de dominio de cálculo y clasificación de zona urbana y/o rural establecidos por la guía de modelos matemáticos de dispersión de la USEPA.

Para el presente estudio se emplea información meteorológica horaria tanto de superficie como de altura de capa de mezclado perteneciente a la estación meteorológica del Aeropuerto de la Paz, BCS, Manuel Márquez, así como información meteorológica de la estación localizada en la central termoeléctrica Punta Prieta de CFE. Tanto la información de superficie como la de altura de capa de mezcla fueron proporcionadas por el departamento de Hidrometeorología de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE, dicha información corresponden al año de 2018.

2. INFORMACIÓN PROCESADA

2.1 Características del relieve

El área en donde se instalarán las cuatro unidades de móviles eléctricas se localiza en el llano La Laguna el Coyote, Baja California Sur y se encuentra localizada aproximadamente a 8.5 km en dirección al noreste del centro de la ciudad de La Paz, BCS, en la región UTM 12, con altitudes que varían de los 90 a los 322 m.s.n.m. La topografía de la región, así como el tipo de suelo, incluyendo el cuerpo de agua fueron introducidos al modelo de dispersión porque constituyen un factor importante que influye en el fenómeno de la dispersión de las emisiones contaminantes a la atmósfera ya que la turbulencia atmosférica del tipo mecánico se origina por el movimiento del viento sobre la superficie terrestre y también por la superficie marítima cuyos valores de reflexión de radiación solar, temperatura y humedad son determinantes en la dispersión de las emisiones contaminantes por sobre grandes cuerpos de agua, figura 3.

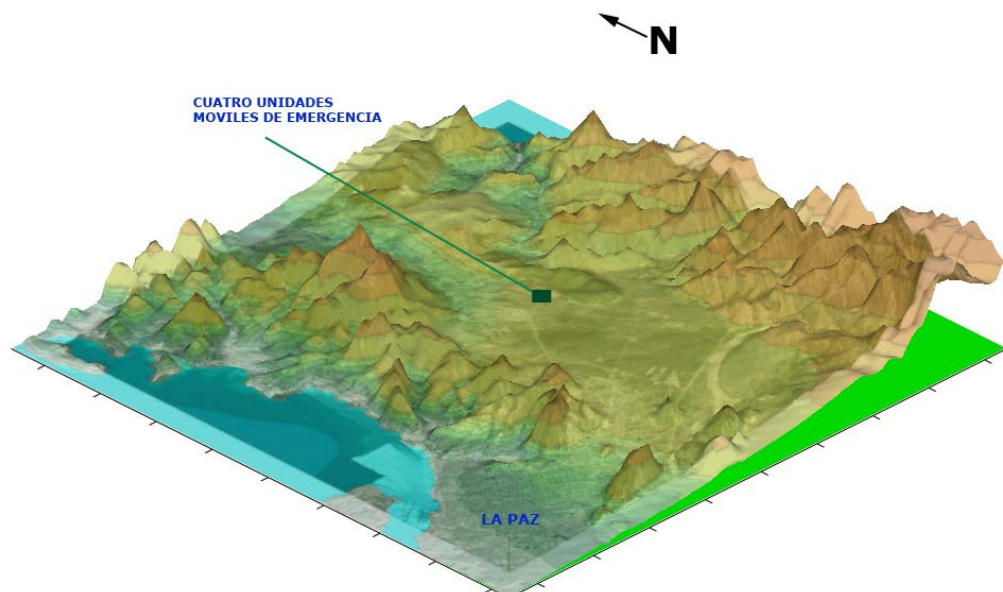


Figura 3. Topografía de la zona de estudio

Con el propósito de contar con un área de amplia cobertura que permita evaluar los impactos a la calidad del aire de la ciudad de La Paz, BCS se establece un dominio de cálculo con una malla cartesiana rectangular de 25 x 25 km con receptores a cada 500 metros. Figura 4.



Figura 4. Malla de receptores.

2.2 Condiciones de operación. Unidades móviles eléctricas

Las cuatro unidades móviles eléctricas cuentan con una capacidad de generación total de 148 MW y emplearán diésel como combustible principal, con un consumo promedio de 400 litros/Wh por unidad móvil, las emisiones generadas durante el proceso de combustión son SO_2 , NO_x y PST. Para la estimación del impacto a la calidad del aire por las cuatro unidades móviles se consideraron las condiciones más críticas; esto es, el funcionamiento de las unidades de emergencia al 100% de carga durante todo el año.

En la tabla 3 se describen las características para las unidades de emergencia, indicando su geometría y las condiciones de operación respectivamente.

Las tasas de emisión de los NO_x y SO₂ que se indica en esta tabla 3 fueron calculadas a partir de los análisis de los resultados más recientes obtenidos mediante la medición directa en la chimenea de la unidad móvil eléctrica que se encuentra actualmente en operación en la CCI Baja California Sur y mediante balances de masa y de energía. Para la tasa de emisión de las PST se utilizaron los factores de emisión de la guía para elaborar el inventario de emisiones de gases por la operación de centrales de generación que consumen combustibles fósiles CFE SPA00-55 normalizada para la CFE. Cabe señalar que además de considerarse la capacidad de las unidades de generación también se tomó en cuenta los consumos promedio de diésel y las referencias para este combustible de la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, la cual establece las especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental. Los porcentos de azufre considerado en el diésel para la modelación de la dispersión del SO₂ fueron de 0.05% y de 0.5%, este último porcentaje es el contenido máximo de azufre en el diésel industrial.

Tabla 3 Geometría de la chimenea y características de las emisiones de los gases de combustión con la operación de diésel.

Parámetros	Unidades Móviles de Emergencia			
	UME-01	UME-02	UME-03	UME-04
Capacidad MW	30	32	42	44
Tasa de emisión para SO ₂ , g/s (0.05% de Azufre)	1.38	1.70	2.23	2.34
Tasa de emisión para SO ₂ , g/s (0.5% de Azufre)	13.83	17.03	22.35	23.41
Tasa de emisión para NO _x , g/s. SIN CONTROL	11.78	14.50	19.02	19.93
Tasa de emisión para NO _x , g/s CON CONTROL	6.57	8.10	10.62	11.12
Tasa de emisión para PST, g/s	0.33	0.40	0.53	0.56
Temperatura del gas de salida, °C	480	480	480	480
Velocidad del gas de salida, m/s	7.33	9.0	11.8	12.42
Altura de chimenea, m	9.0	9.0	9.0	9.0
Diámetro interior, m	1.97	1.97	1.97	1.97

2.3 Meteorología

El tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera es un ciclo que inicia por su emisión, seguido por su transporte y propagación. El ciclo termina cuando el contaminante se deposita sobre alguna superficie natural o artificial (suelo, agua, vegetación u otros objetos), cuando son arrastrados por la lluvia, o bien, escapan a capas atmosféricas superiores. La dispersión o propagación de un contaminante en la atmósfera es el resultado de 3 mecanismos dominantes: 1) El movimiento general del aire que transporta al contaminante en la dirección del viento, 2) Las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan al contaminante en todas direcciones y 3) Las características aerodinámicas generales de las partículas como el tamaño, forma y peso; y en el caso de los gases es la difusión de masa debido a los gradientes de concentración lo que rige el mecanismo de dispersión. En estos tres mecanismos dominantes de dispersión la meteorología juega un papel de suma importancia.

Los datos meteorológicos de superficie requeridos para el uso del modelo de dispersión AERMOD son: dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, precipitación pluvial, temperatura ambiente y cubierta de nube. Los datos meteorológicos de altura comprenden la recopilación horaria de la altura de capa de mezclado matutina y vespertina. Adicionalmente para una zona se requiere de información que caracteriza la superficie del suelo, de grandes cuerpos de agua y los albedos donde se presentan los grados de reflexión de los rayos solares, la razón de Bowen que es la relación entre el calor latente de evaporación del agua y el calor sensible del mismo y la rugosidad del suelo que está en función del tipo de suelo predominante en la zona de estudio.

La información meteorológica, tanto de superficie como de altura que se emplea para ejecutar el modelo de dispersión fue recopilada por el Departamento de Hidrometeorología de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad. Los registros de información meteorológica de superficie y de altura de capa de mezclado que se utilizan en este estudio corresponden al año 2018.

Para el tratamiento y procesado de la información meteorológica de superficie, de altura de capa de mezclado, de los gradientes de rugosidad, de los gradientes de Bowen y de los albedos de reflexión solar, se utilizó el software AERMET con el cual se obtuvieron las temperaturas promedio, frecuencias de ocurrencia de vientos, la estabilidad atmosférica y la distribución conjunta de intensidad y dirección del viento por categoría de estabilidad para el periodo de estudio, lo que permite analizar el campo de vientos que caracteriza a la zona de estudio, el cual es el transporte de los gases de combustión que emitirán las unidades móviles de eléctricas.

2.3.1 Temperatura

De acuerdo con la información correspondiente a 2018, la temperatura máxima registrada en la zona durante todo el año fue de 39.0°C y la mínima de 6.0°C. En este mismo año se tiene una temperatura promedio de 24.0°C.

Las temperaturas promedio mensual del 2018 para el sitio de estudio se muestran en la Figura 5, en ésta se observa que en los meses de julio y agosto se registraron los promedios más altos de temperatura. Las temperaturas máximas y mínimas mensuales para el año de estudio se observan en la Figura 6. La máxima temperatura registrada durante el 2018 se dio en el mes de octubre, mientras que la mínima temperatura se registró durante el mes de enero.

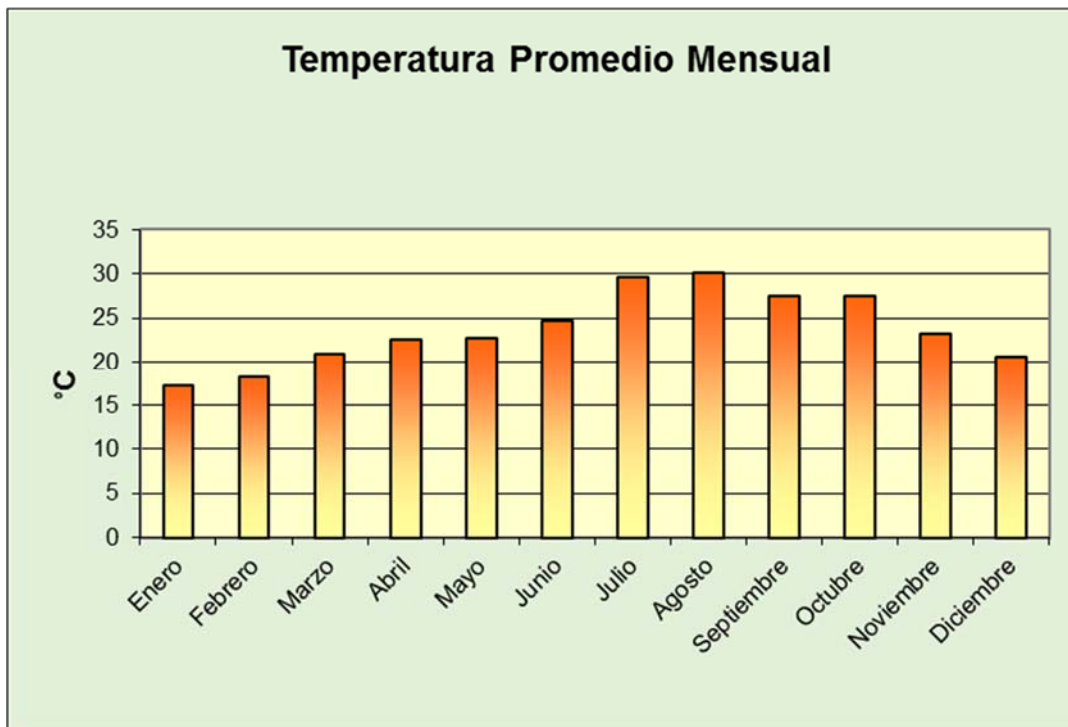


Figura 5. Temperatura promedio mensual, 2018

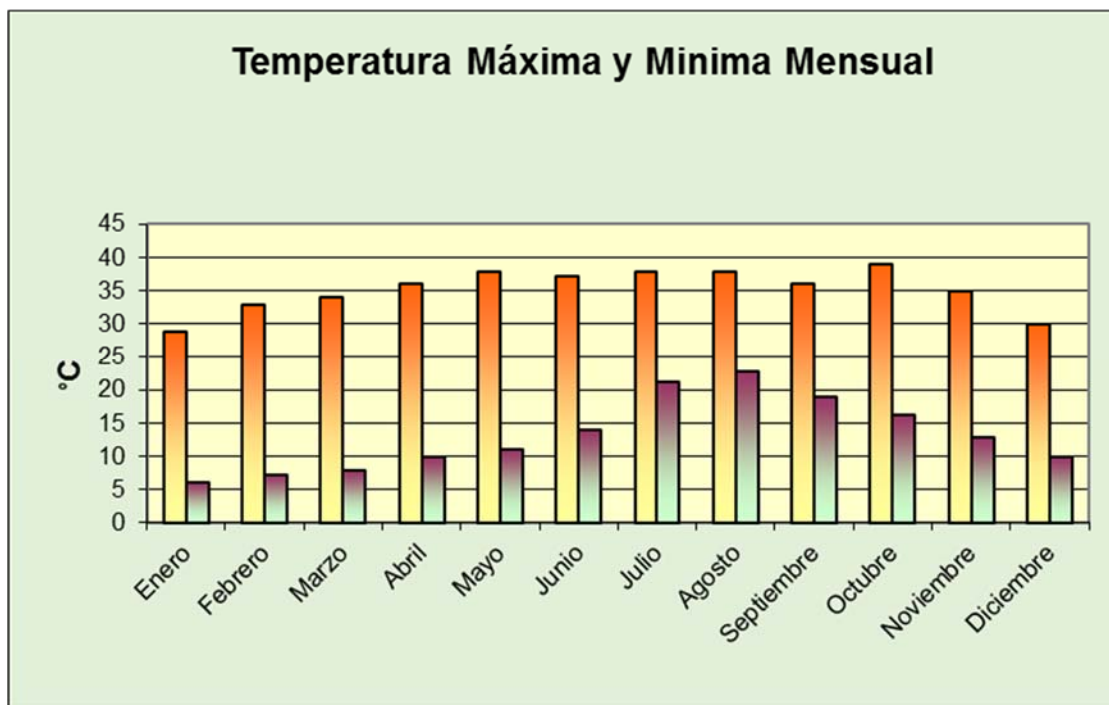


Figura 6. Temperaturas máximas y mínimas mensuales, 2018

2.3.2 Movimiento horizontal de los gases

Para estimar el transporte horizontal de los gases de combustión del diésel en la zona de estudio, los parámetros meteorológicos más importantes de analizar son la dirección y velocidad del viento que predomina en la región de estudio junto con el tipo de suelo y las alturas de capa de mezclado. Mediante el software AERMET se analizaron los datos meteorológicos de superficie, de altura de capa de mezclado y del tipo de uso de suelo para construir las bases de datos que se requieren por el modelo de dispersión atmosférica denominado AERMOD.

2.3.3 Rosa de vientos

Una manera de representar gráficamente la dirección y velocidad del viento es mediante rosa de vientos. La construcción de estos gráficos permite observar las direcciones dominantes del viento, sus frecuencias de ocurrencia y las intensidades con las que se manifiestan; además permiten localizar las probables zonas de impacto que podrían verse afectadas por las emisiones de los gases de combustión proveniente de las cuatro unidades móviles de emergencia.

En la Figura 7 se muestra la rosa de vientos anual, la velocidad de viento promedio anual para el año 2018 fue de 4.13 m/s con un 0.39 % de vientos menores a 1 m/s, es decir vientos en calma. También en la rosa de vientos anual se observa que los vientos dominantes provienen de dos direcciones, norte y sur. En función de la ubicación de los grandes cuerpo de agua (para este sitio se encuentra a norte de la zona de estudio), este comportamiento es típico de una zona con grandes áreas de agua ya que al calentarse más rápidamente la superficie marina que la superficie terrestre el viento viaja de una región de mayor energía a una de menor energía.

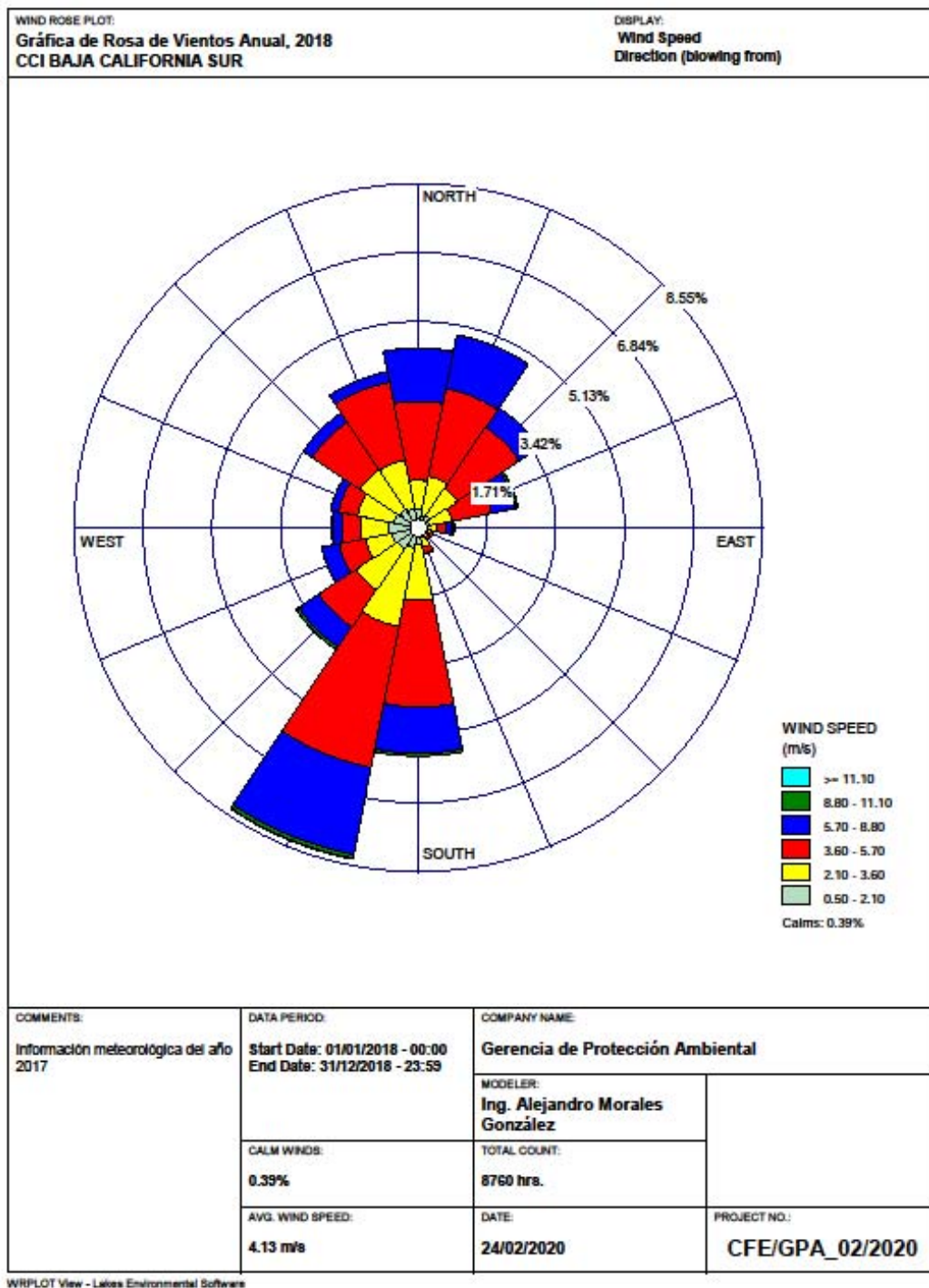


Figura 7. Rosa de vientos anual, 2018

2.3.4 Estabilidad atmosférica

Un fenómeno meteorológico importante, relacionado con la dispersión de los gases de combustión es la estabilidad atmosférica, que permite clasificar de manera discreta a los indicadores de la turbulencia atmosférica y asigna bajo diferentes categorías de estabilidad desde condiciones estables hasta inestables.

En este estudio, la clasificación de estabilidad atmosférica se determinó con el método de Pasquill que requiere información sobre la velocidad del viento, la radiación solar, la fracción del cielo cubierto y la nubosidad. La información meteorológica de altura fue la misma utilizada para el año 2018.

Los criterios de Pasquill asignan los siguientes tipos de estabilidad: A - muy inestable, B - inestable, C - ligeramente inestable, D - neutra, E - ligeramente estable y F - moderadamente estable. La tabla 4 muestra la distribución de frecuencias de las condiciones de estabilidad atmosférica prevaleciente en la zona de influencia de Islas Mujeres en 16 sectores de dirección, las cuales fueron calculadas mediante el procesador de información meteorológica AERMET.

Tabla 4. Estabilidad atmosférica, 2018

Dirección	Estabilidad						Total
	A	B	C	D	E	F	
N	3	48	332	394	172	23	972
NNE	0	27	140	106	92	12	377
NE	1	28	53	64	57	13	216
ENE	0	5	10	11	9	2	37
E	0	0	5	8	3	0	16
ESE	1	2	6	7	3	1	20
SE	0	5	12	18	32	8	75
SSE	0	13	129	263	244	44	693
S	1	79	580	919	651	104	2334
SSW	2	141	260	490	318	40	1251
SW	1	50	86	171	87	14	409
WSW	1	10	33	52	39	9	144
W	1	12	13	19	34	4	83
WNW	1	13	22	28	39	8	111
NW	0	26	68	143	109	13	359
NNW	1	31	209	423	188	15	867
Sub-Total	13	490	1958	3116	2077	310	7964
						V. en Calma	796
						Total	8760

En esta tabla 4 se observa que la mayor frecuencia de ocurrencia de estabilidad corresponde a la categoría D con una frecuencia del 35.6%, que de acuerdo a la clasificación de Pasquill representa una atmósfera tipo neutra, esta condición se presentó durante 130 días del año. El valor de estabilidad que le sigue es de clase E con una frecuencia del 23.7%, lo que representa 87 días del año, a esta categoría le corresponde a una atmósfera ligeramente estable. Finalmente, en orden descendiente se tiene a la clase tipo C que indica una atmósfera ligeramente inestable, está se presentó con una frecuencia del 22.3% lo que equivale a 82 días del año. Los datos correspondientes a las tres categorías de estabildades atmosféricas mencionadas representan el 81.6% del total de datos analizados (299 días); lo anterior nos indica que la zona de estudio presentó un comportamiento de estabilidad atmosférica cercana a la neutra traduciéndose, términos generales, en una dispersión uniforme de la pluma.

2.3.5 Altura de capa de mezclado

Como se mencionó anteriormente los datos meteorológicos de altura fueron proporcionados por el departamento de Hidrometeorología de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE para el año 2018.

La altura de capa de mezclado es la altura sobre el suelo en donde ocurre una mezcla vertical de los gases contaminantes en la atmósfera, la cual varía diariamente y se obtiene a partir de mediciones de radio - sondeo. La altura de capa de mezcla es el nivel máximo que una porción de aire puede ascender, el aire que se encuentra debajo de la altura de mezcla conforma la capa de mezclado, mientras más profunda sea esta capa mayor será el volumen de aire disponible para la dispersión de contaminantes.

En el análisis estadístico de la altura de capa de mezclado indica que ésta desciende hasta valores promedio cercanos hasta los 1 500 m en el mes de septiembre, incrementándose hasta valores máximos promedio de 4 600 m, en el mes de abril. La altura de capa de mezcla promedio anual para la zona de influencia de las cuatro unidades fue de 3 200m.

En general la altura de capa de mezcla que predomina en la zona de estudio es alta, si tomamos como referencia que el espesor de la capa de mezcla más frecuente se encuentra por arriba de los 1 100 m. En la Figura 8 se muestra el comportamiento anual de la altura de capa de mezclado promedio.

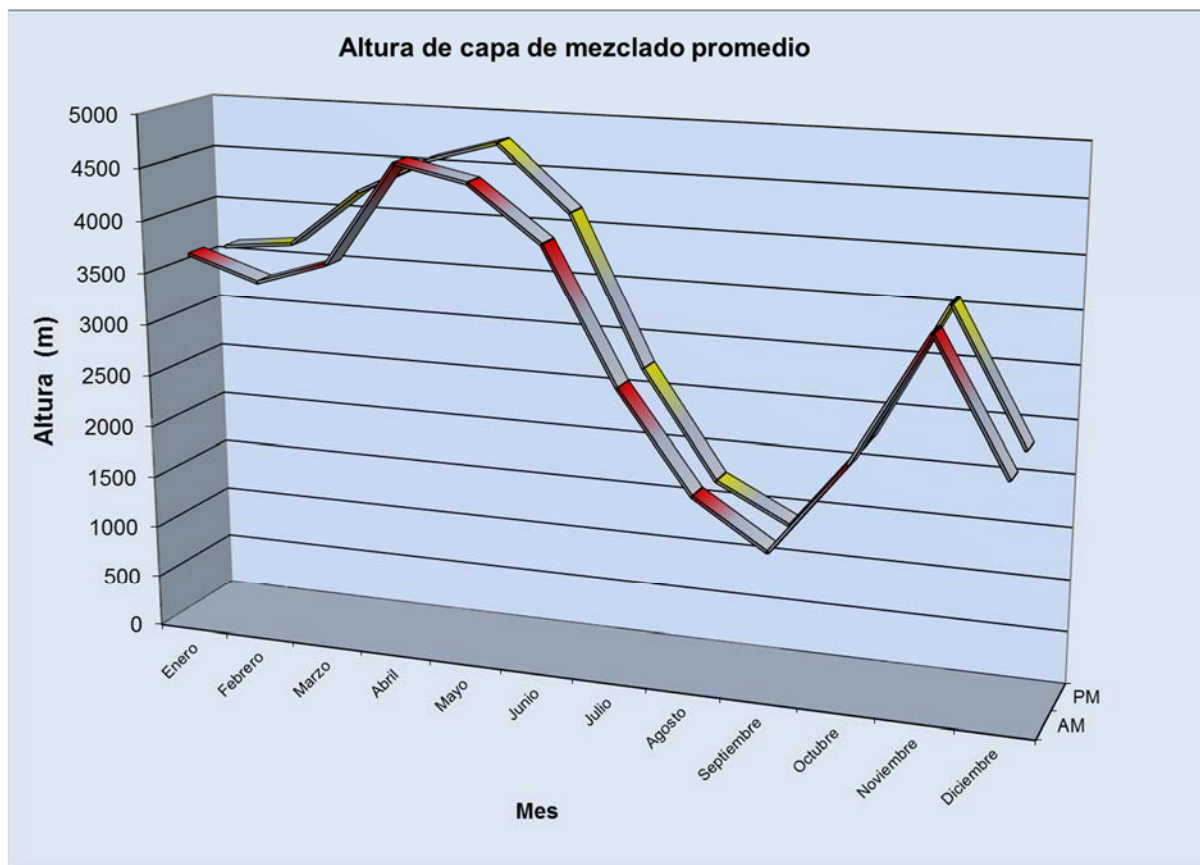


Figura 8. Altura de capa de mezclado, 2018

3 MODELO DE DISPERSIÓN

3.1 Descripción

Para evaluar los posibles impactos a la calidad del aire por las emisiones de las cuatro unidades móviles de emergencia se utilizó el modelo de dispersión aprobado por la EPA denominado AERMOD. Este es un modelo gaussiano de dispersión de contaminantes y es recomendado por la EPA para radios de afectación menores a 50 km en donde se presentan cambios de cobertura: agua - suelo. El modelo, además de ser complejo, ya que considera la topografía de la zona de estudio, requiere el uso de datos continuos en tiempo y espacio para generar resultados válidos como la información meteorológica de datos superficiales y de altura de capa de mezclado.

Para el empleo del software de dispersión de emisiones a la atmósfera denominado AERMOD se requiere un modelo meteorológico denominado AERMET, la caracterización de la fuente de emisión para estimar la dispersión y el transporte de las emisiones contaminantes se realiza con el software denominado AERMOD y finalmente, los cálculos de concentraciones en la zona de estudio se sobreponen en planos digitalizados del Google Earth.

El modelo AERMOD permite simular la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por una o varias fuentes industriales.

En la ejecución de las corridas con el modelo dispersión AERMOD es necesario tomar en cuenta las consideraciones siguientes:

- Que la pluma de gases contaminantes se comporte como una distribución normal.
- Que la tasa de emisión sea constante y continua.
- Que la velocidad y la dirección del viento sean uniformes.

3.2 Requisitos de datos de entrada.

Tres tipos básicos de datos de entrada se requieren para ejecutar el modelo AERMOD, estos son:

- 1) Base de datos con información de las propiedades físico – químicas de los gases emitidos por las chimeneas de desfogue
- 2) Base de datos meteorológicos de la zona de estudio terrestre y marítimo.
- 3) Base de información topográfica del área de estudio

La información requerida para la elaboración de las bases de datos que utiliza el modelo es la siguiente:

- Tasa de emisión de los SO₂, NOX y PST las cuales se pueden obtener mediante medición directa, balances de masa y/o factores de emisión, g/s
- Velocidad de salida de los gases de combustión, m/s
- Temperatura de salida de los gases de combustión, °K
- Altura de las chimeneas de desfogue, m
- Diámetro de las chimeneas de desfogue, m
- Velocidad del viento, m/s
- Dirección del viento
- Temperatura ambiente, °K
- Altura de techo de nube, m
- Porcentaje de cielo cubierto (nubosidad), %
- Altura de capa de mezcla matutina y vespertina, m
- Topografía de la zona de estudio, m
- Albedos de reflexión
- Factores de Bowen (definir al pie de página que es este factor)
- Rugosidad del terreno

3.3 Clasificación del medio urbano o rural

Para clasificar el uso de suelo en la zona de influencia de la unidad de emergencia se empleó el criterio propuesto en la Parte 40 del Código de Reglamentaciones Federales de los E.U.A. (40 CFR, Parte 51) para los modelos matemáticos de dispersión, el cual se define en función de la densidad de habitantes y considera si el ambiente es rural o urbano para la elección de los coeficientes de difusión que se involucran en el cálculo de la dispersión atmosférica.

Debido a que en un radio de 3 kilómetros, tomando como centro ubicación de la unidad móvil UME-09, la densidad de población es menor a 750 habitantes por kilómetro cuadrado, se definió realizar la simulación de la dispersión de los gases y partículas de combustión de las cuatro unidades móviles de emergencia con un tipo de uso de suelo rural.

3.4 Dominio de cálculo

Con relación al dominio de cálculo en la estimación del posible impacto ocasionado por las emisiones de los gases de combustión, el modelo AERMOD considera los siguientes postulados:

- Las simulaciones efectuadas para cada uno de los escenarios, suponen que las fuentes emisoras (chimeneas de desfogue) operan durante todo el año al 100% de carga constante
- La concentración tiende al infinito cuando la distancia “x” tiende a cero
- La concentración tiende a cero cuando x, y o z tienden al infinito, la concentración es cero a grandes distancias de la fuente de emisión
- La concentración del contaminante emana desde fuentes puntuales continuas
- El proceso de dispersión se considera se lleva a cabo en estado estacionario
- Se escoge la principal dirección del transporte por el viento para orientar el eje de las “x”
- El transporte del contaminante debido al viento en la dirección “X” predomina sobre la difusión descendente

3.5 Tratamiento de vientos en calma

Se le llama vientos en calma a aquellos vientos variables y muy ligeros cuya velocidad es menor a 1 m/s (guía para modelos atmosféricos de la EPA). Este tipo de vientos representa un problema específico en la aplicación de los modelos, ya que, el modelo asume que la concentración del contaminante es inversamente proporcional a la velocidad del viento, debido a esto, los resultados que obtiene el modelo al calcular concentraciones durante los periodos de calma pueden generar error y tiende a sobrestimar dichos valores.

De acuerdo con las recomendaciones de la Environmental Protection Agency (EPA), en su guía para modelos atmosféricos y en especial en la aplicación de plumas gaussianas, recomienda la aplicación de velocidades de 1 m/s para periodos de calma y el uso de la dirección del viento de la hora anterior a la que se presenta dicho periodo. Por lo que todos los registros con velocidad menor a 1 m/s se eliminan del cálculo estadístico.

3.6 Calidad del aire en la ciudad de la Paz, BCS

La calidad del aire en la ciudad de La Paz, BCS está determinada principalmente por emisiones provenientes de las fuentes móviles y de algunos comercios con procesos de combustión como restaurantes, hoteles, tortillerías, panaderías, que están instalados dentro de la ciudad. Hacia las afueras de ésta ciudad a más de siete kilómetros de distancias en dirección norte del centro de la ciudad de La Paz se encuentra la central CCI Baja California Sur y a más de ocho kilómetros en esa misma dirección se ubica la Central Punta Prieta, ambas instalaciones son de la CFE en donde se genera energía eléctrica; en estas centrales termoeléctricas se emiten gases de combustión por la quema de combustibles fósiles principalmente NO_x , SO_2 y PST. Sin embargo, es importante señalar que entre la ciudad de La Paz y las instalaciones de la CFE se encuentran barreras topográficas formadas por cerros y lomeríos que sirven de protección natural a la ciudad de la Paz respecto a la dispersión de los contaminantes generados por la CFE en su procesos de generación de energía eléctrica de las dos instalaciones antes mencionadas.

La CFE ha instrumentado un sistema de control de emisiones a la atmósfera que le permite evaluar la calidad del aire de en la ciudad de La Paz y zonas aledañas de sus centrales. En la figura 9 se muestra la ubicación actual de los remolques que contienen las casetas de monitoreo de la calidad del aire, en estas casetas se realizan mediciones diarias de, NO, NO₂, NO_x SO₂, O₃ y PM₁₀, los reportes son enviados a la autoridad ambiental correspondiente para su conocimiento y observaciones y de esta manera cumplir con las condicionantes VIII y IX establecidas en la Licencia Ambiental Única LAU-03/00001-2018 otorgada el 18 de mayo de 2018, referente al cuidado de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, BCS.

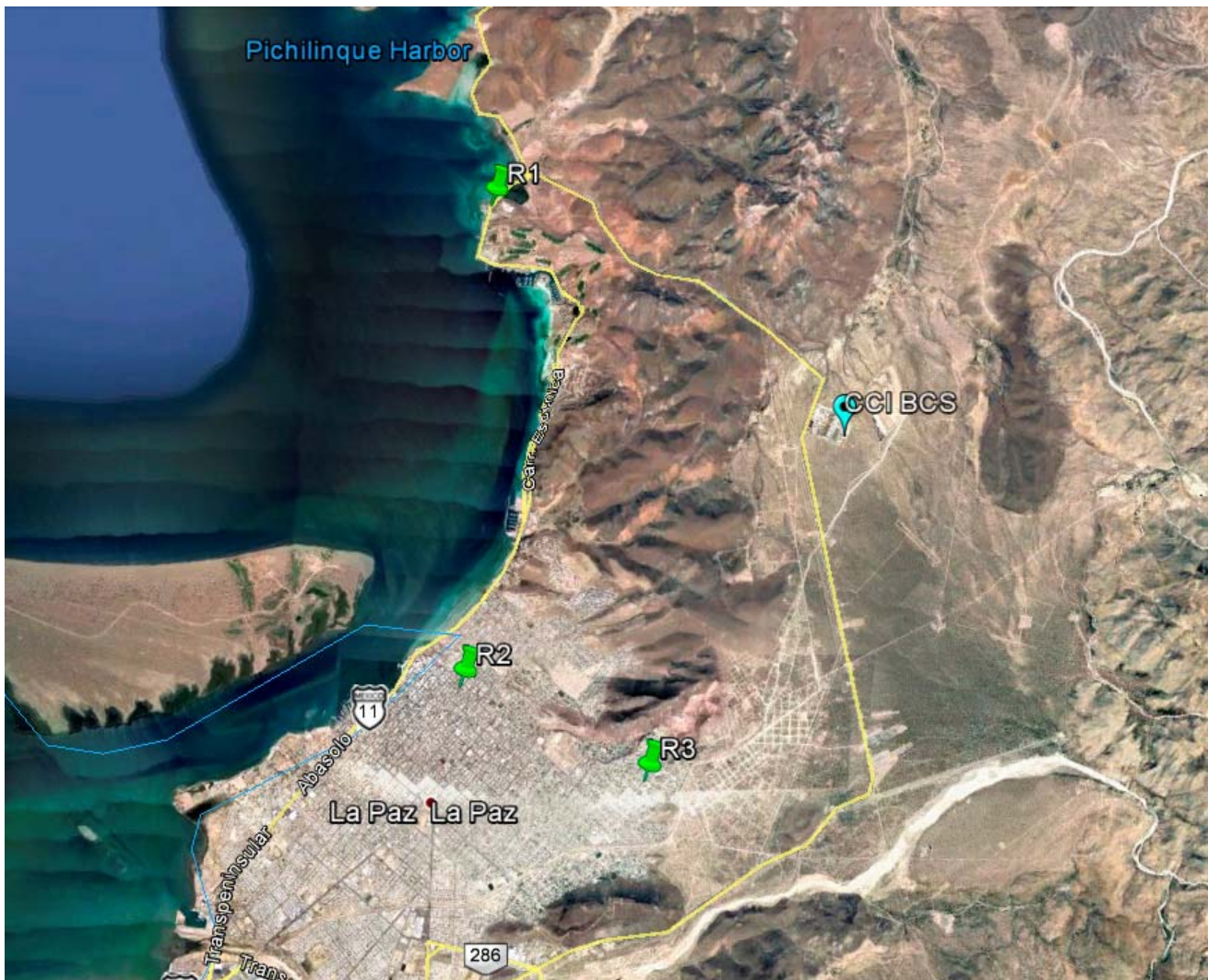


Figura 9. Ubicación de la estaciones de medición de la calidad del aire

De las mediciones de la calidad del aire realizada en el último semestre del año 2019 por personal de la CFE en las estaciones de monitoreo, que comprende los meses de julio a diciembre, se determinó que la calidad del aire es satisfactoria.

Con la finalidad de comparar los resultados de las mediciones de la calidad del aire con las normas ambientales correspondiente, se tomaron los valores de los óxidos de nitrógeno (NO_x) registrados en las casetas de medición como valores totales de Bióxido de nitrógeno que es el parámetro normado para calidad del aire en la NOM-023-SSA1-1993. En la tabla 5 se muestran los resultados de las mediciones de la calidad del aire de los tres remolques del último semestre del 2019 y su comparativo con las normas ambientales correspondientes.

Tabla 5. Resultados del monitoreo perimetral efectuado de julio a diciembre de 2019.

Remolque	Ubicación	Dirección	Contaminante Medido	Valor Promedio µg/m ³	LMP µg/m ³
R1	Esc. Secundaria Técnica No. 3	Km. 9.0 Carretera La Paz a Pichilingue, C.P. 23020, La Paz, Baja California Sur	NO _x	8.77	395
			SO ₂	7.86	104.8
			PM-10	46.84	75
R2	Centro de Salud	Calle 5 de Mayo, entre Altamirano y Ramírez, Col. Centro, C.P. 23000, La Paz, Baja California Sur	NO _x	39.00	395
			SO ₂	5.24	104.8
			PM-10	55.41	75
R3	Esc. Primaria Emma Isabel Osuna	Calle Ayuntamiento, entre Salvatierra y Manuel Torre Iglesias, Col. La Escondida, C.P. 23039, La Paz, Baja California Sur	NO _x	23.18	395
			SO ₂	7.42	104.8
			PM-10	62.44	75

LMP del NO₂ 395 µ/m³ (NOM-023-SSA1-1993) y para el SO₂ 104.8 µ/m³ (NOM-022-SSA1-2019)

En la tabla anterior se muestra que las concentraciones de NO_x, SO₂ y PM₁₀ medidas son significativamente menores a los límites máximos permisibles establecidos por la autoridad ambiental. Respecto a las partículas PM₁₀ presentes en la ciudad de La Paz se pudo observar que éstas son producto principalmente del tránsito vehicular sobre calles sin pavimentar aunado a la nula adhesividad del suelo de los muchos caminos vecinales en el área suburbana originando una capa de polvo sobre la ciudad. A pesar de esto, se puede decir que la calidad del aire en la mayor parte del año es satisfactoria considerando que las inversiones térmicas presentes en la ciudad de La Paz son muy cortas, véase altura de capa de mezclado.

4 EVALUACIÓN DEL IMPACTO A LA CALIDAD DEL AIRE

4.1 RESULTADOS. IMPACTOS A LA CALIDAD DEL AIRE.

El modelo AERMOD genera un archivo con información tabulada de las concentraciones de los contaminantes estimados en los periodos que se establecen para cada receptor el modelo estima hasta diez valores máximos de concentración, de estos valores y para fines de analizar los resultados obtenidos se eligieron los cuartos valores máximos, como se recomienda en la parte 40 del Código de Reglamentaciones Federales de los E.U. (40 CFR, Parte 51) de acuerdo al comportamiento asintótico de los resultados. En esta sección se presentan los resultados de los valores máximos obtenidos de las simulaciones de dispersión de los contaminantes definidos en el alcance del estudio.

En la tabla 6, se muestran los resultados de los escenarios propuestos para estimar las emisiones del NO₂, SO₂ y PST generados por las unidades móviles eléctricas. Cabe señalar que con relación a los NO_x se consideraron dentro de la ejecución del modelo AERMOD las relaciones de formación del NO₂ a partir de la tasa de emisión de los NO_x por lo que las concentraciones estimadas por el modelo son de NO₂.

En esta tabla se indica el contaminante evaluado, la concentración máxima estimada y la localización respecto a la unidad móvil de emergencia. Además se realiza la comparación de las emisiones estimadas respecto a los límites máximos permisibles que establece la normativa correspondiente a la calidad del aire.

Tabla 6. Resultados de la modelación de la dispersión del SO₂, NO₂ y PM₁₀.

Contaminante	Máximo Valor Estimado (µg/m ³)	Límite Máximo Permisible (µg/m ³)	Localización del Valor Máximo respecto a las unidades móviles de emergencia	Elevación (metros)	% por debajo de la Norma
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂), 1 hora SIN CONTROL	190.13	395 (NOM-023-SSA1-1993)	2.0 kilómetro al W	173	-51.9
Bióxido de Azufre (SO ₂), 24 horas (Diésel 0.05%)	4.58	104.8 (NOM-022-SSA1-2019)	1.5 kilómetros al S	128	-95.63
Bióxido de Azufre (SO ₂), 24 horas (Diésel 0.5%)	45.79	104.8 (NOM-022-SSA1-2019)	1.5 kilómetros al S	128	-56.3
Partículas PM ₁₀ , 24 horas	1.09	75 (NOM-025-SSA1-1993)	1.5 kilómetros al S	128	-98.5

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 10 se muestran las curvas de isoconcentración de las emisiones del SO₂ por la operación de cuatro unidades móviles eléctricas dentro de una malla cartesiana de 25x25 km. Para este contaminante se consideraron dos escenarios, uno considerando una concentración de azufre en el diésel del 0.05% y el otro considerando una concentración de azufre del 0.5% en el diésel industrial. El valor máximo que se estima por el modelo para una concentración de 0.05% de azufre en el diésel es de 4.58 µg /m³ a 24 horas, este valor fue localizado a 1.5 kilómetros al sur de las unidades móviles eléctricas, tomando como centro la ubicación de la UME-02 y a una altitud de 128 metros. En el segundo escenario para evaluar los impactos del SO₂ con una concentración de 0.5% de azufre en el diésel industrial se determinó que el valor máximo fue de 45.79 µg /m³ a 24 horas (figura 11), este punto fue localizado a 1.5 kilómetros al sur de las unidades móviles eléctricas, y a una altitud de 128 metros.

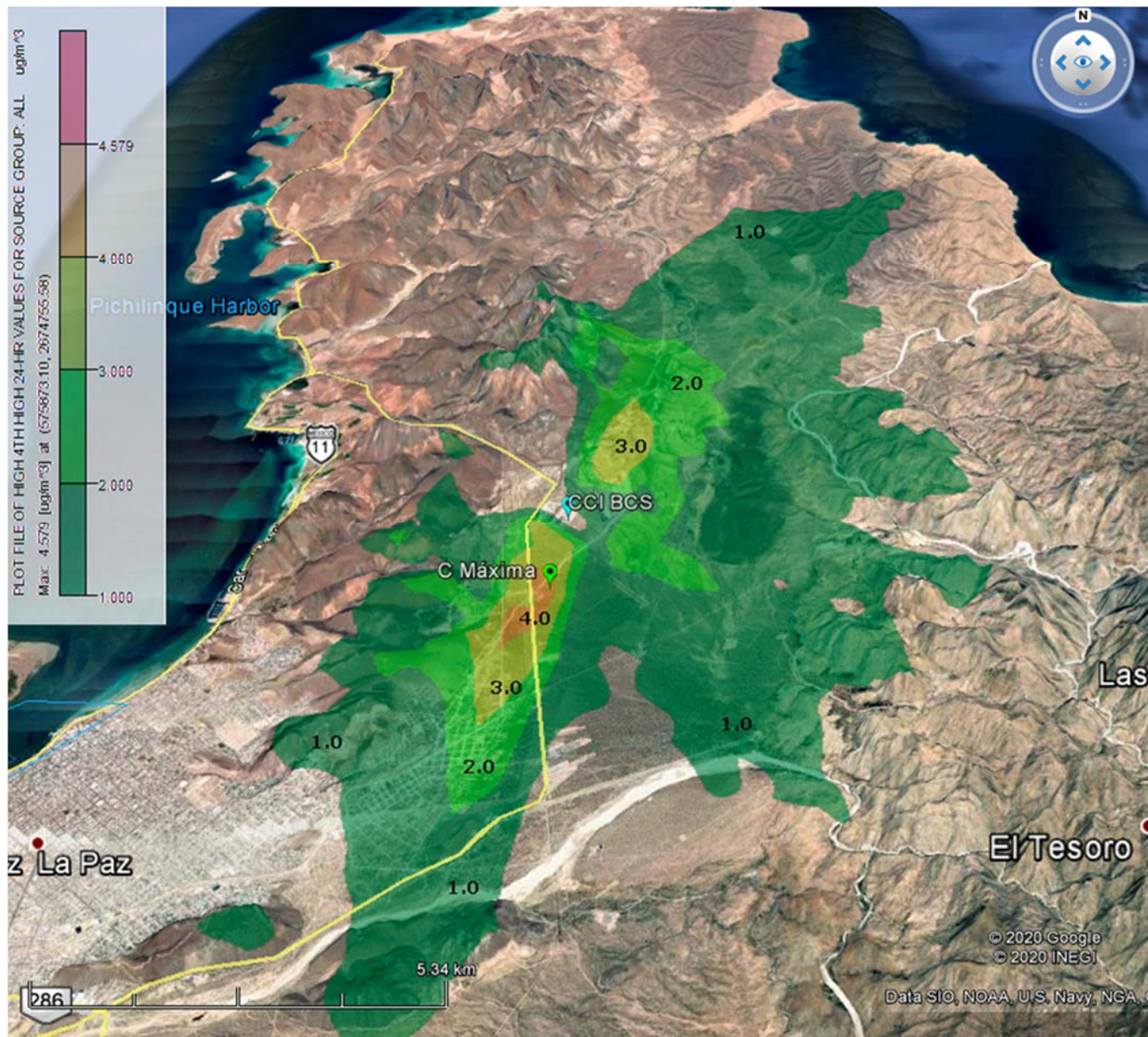


Figura 10. Curvas de isoconcentración del SO₂ a 24 horas por la operación de cuatro unidades móviles de eléctricas. Diésel 0.05%

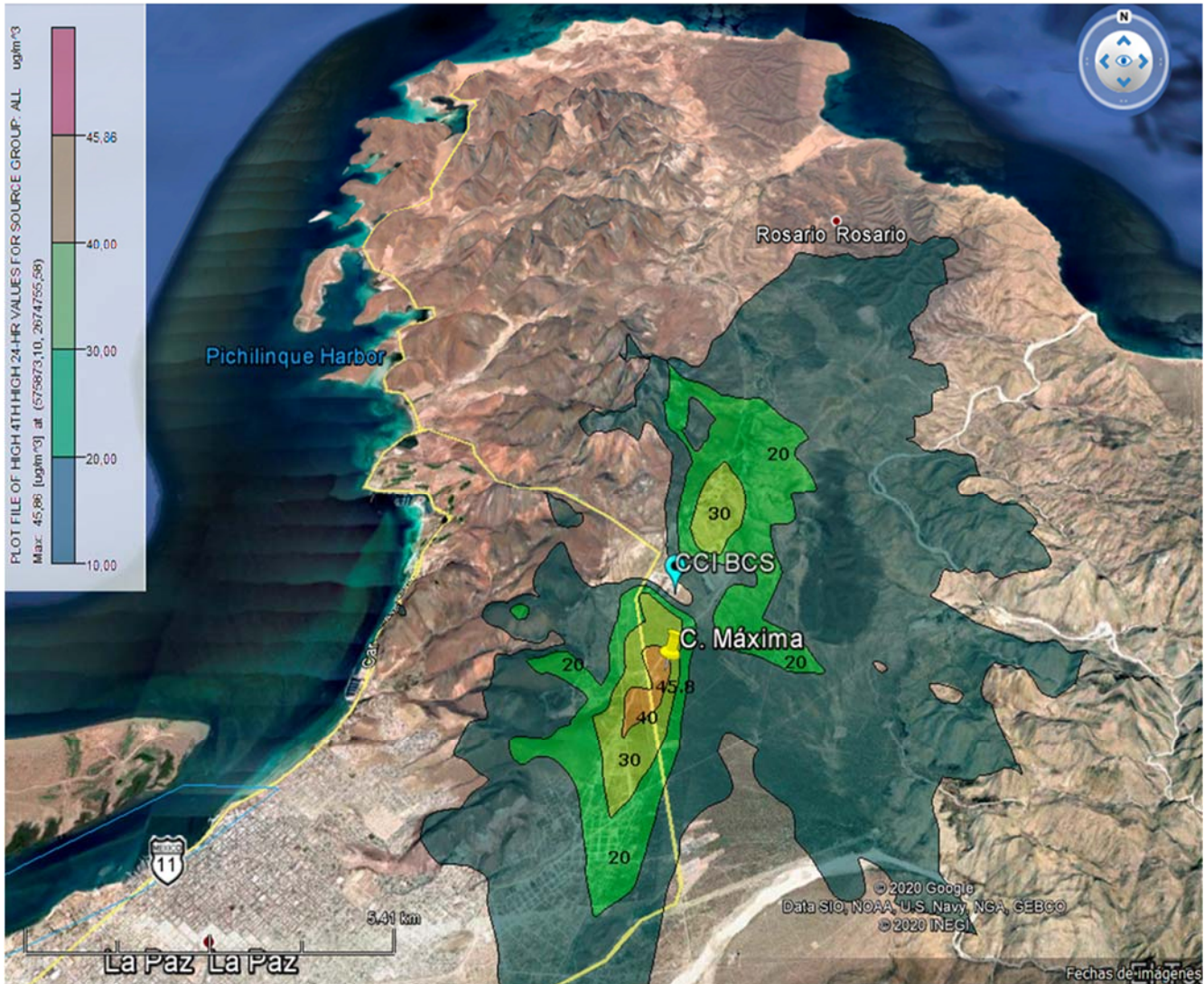


Figura 11. Curvas de isoconcentración del SO₂ por la operación de cuatro unidades móviles de eléctricas a 24 horas. Diésel 0.5%

El lugar donde se localizaron ambos valores máximos de concentración de SO₂ no existen asentamientos humanos que puedan ser afectados por dichas emisiones. La máxima concentración estimada por el modelo a condiciones más adversas (0.5% de azufre en el diésel industrial) se encuentra por debajo del límite máximo permisible establecido por la NOM-022-SSA1-2019 de calidad del aire que es de 104.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor de 45.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ está a un 56.3% por debajo de éste valor.

Como se observa en la tabla 6 de resultados, las concentraciones horarias del bióxido de

nitrógeno para un sistema de sin control reducción de NOX, no rebasan el límite máximo permisible de calidad del aire establecido en la NOM-023-SSA1-1993, que es de 395 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El máximo valor que estimó el modelo de dispersión fue de 190.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se localizó dentro de a dos kilómetros al oeste de la UME-02 y a una altitud de 173 metros sobre el nivel medio del mar. Este valor máximo estimado se encuentra a un 51.9% por debajo del valor límite máximo permisible normado. Es importante destacar que en la zona donde se registraron los puntos de máxima concentración por NO₂ no hay asentamientos humanos que puedan verse afectados. Figura 12.

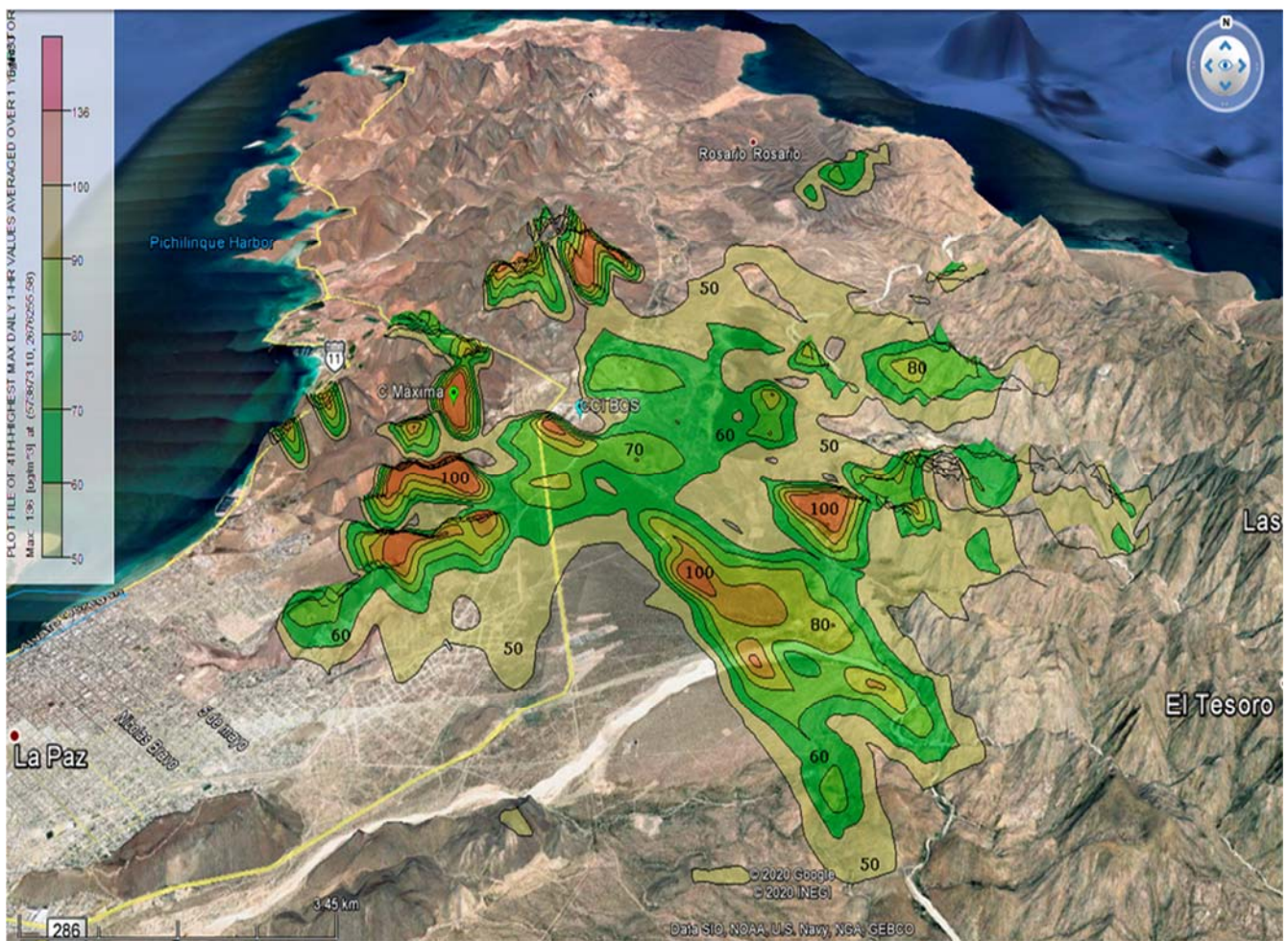


Figura 12. Curvas de isoconcentración del NO₂ por la operación de cuatro unidades móviles eléctricas.

Respecto a la concentración del valor máximo de las partículas suspendidas totales estimada

a condiciones de operación, para las cuatro unidades móviles eléctricas, utilizando diésel como combustible principal. Los resultados de la modelación de la dispersión atmosférica se estimaron como PST, con el objeto de compararlos con la norma de calidad del aire la NOM-025-SSA1-1993, las concentraciones de partículas suspendidas totales se consideraron como PM₁₀ las cuales entran dentro del universo de las PST. La concentración de partículas PM₁₀ a 24 horas fue de 1.09 µg/m³., esta concentración no rebasa el valor límite máximo permisible de calidad del aire a 24 horas establecido en la norma de calidad del aire (75 µg/m³). Los valores de máxima concentración de PM₁₀ se localizaron a 1.5 kilómetros al sur de la UME-02, donde no existe población que pudiese ser afectada, Figura 13.

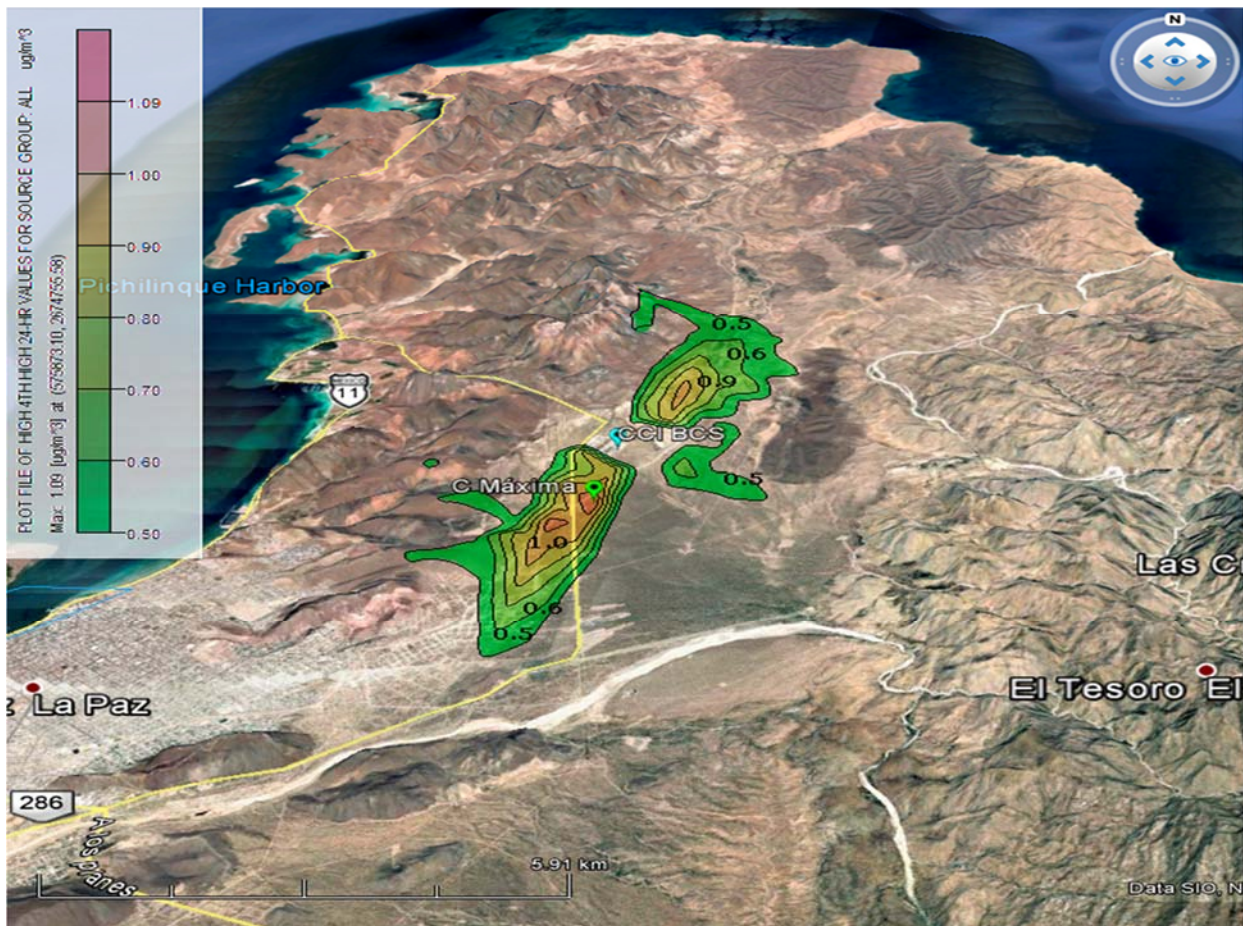


Figura 13. Curvas de isoconcentración del PM₁₀ por la operación de cuatro unidades móviles de eléctricas.

Respecto a la ciudad de La Paz, Baja California Sur, la cual se encuentra aproximadamente

a siete kilómetros al suroeste de la CCI BCS donde se instalarán las cuatro unidades móviles eléctricas, se allí la CFE cuenta con dos remolques equipados con casetas de medición de la calidad del aire. Uno de esos remolques está ubicado en la escuela primaria Emma Isabel Osuna al oeste de la ciudad y cerca del malecón y el otro remolque está ubicado en el centro de salud, localizado en el centro de la ciudad de la Paz. En ambos sitios las concentraciones medidas del bióxido de nitrógeno, del bióxido de azufre y de las partículas PM₁₀ se encuentran muy por debajo de los límites permisibles de calidad del aire establecidos en la normativa ambiental (tabla 5. Resultados de los monitoreos perimetrales de calidad del aire). Sumando las concentraciones de fondo medidas mediante las casetas de monitoreo de la calidad del aire a los resultados estimados por el modelo de dispersión AERMOD, en ambos sitios No se rebasan los límites máximos permisibles en ninguno de los tres contaminantes evaluados. Tabla 7.

Tabla 7. Valores estimados más concentraciones de fondo en la ciudad de La Paz BCS.

Remolque	Ubicación	Dirección	Contaminante Medido	Valor Promedio µg/m3	Valor Estimado µg/m3	Suma µg/m3	LMP µg/m3
R2	Centro de Salud	Calle 5 de Mayo, Col. Centro, C.P. 23000, La Paz, BCS	NOx	39.00	43.90	82.90	395
			SO ₂ *	5.24	10.00	15.24	104.8
			PM-10	55.41	0.50	55.91	75
R3	Esc. Primaria Emma Isabel Osuna	Calle Ayuntamiento, Col. La Escondida, C.P. 23039, La Paz, BCS	NOx	23.18	33.70	56.88	395
			SO ₂ *	7.42	8.70	16.12	104.8
			PM-10	62.44	0.20	62.64	75

El SO₂ se estimó considerando 0.5 % de azufre en el diesel

La diferencia de valores encontrados para las partículas PM₁₀ presentes en la ciudad de La Paz se podría deber a que éstas son producto principalmente del tránsito vehicular sobre calles sin pavimentar aunado a la nula adhesividad del suelo de los muchos caminos vecinales en el área suburbana originando una capa de polvo sobre la ciudad.

4.3 Conclusiones

De los resultados obtenidos por el modelo de dispersión atmosférico en la estimación de las concentraciones del SO₂, NO_x y PST que considera las condiciones de operación de las cuatro unidades móviles de emergencia y con información meteorológica del año 2018, utilizando diésel como combustible principal, se tiene que:

- Las concentraciones estimadas por el modelo de dispersión dentro de la zona de influencia de las cuatro unidades móviles eléctricas resultaron por debajo de los límites máximos permisibles de calidad del aire establecidos en la normativa correspondiente.
- Las concentraciones estimadas por el modelo de dispersión del SO₂, NO₂ y PM₁₀ impactan principalmente en dentro de un radio de 2.0 kilómetros tomando como referencia la localización de la UME-02. Esas concentraciones impactan en cerros y lomeríos donde no existen asentamientos humanos ni actividades antropogénicas que puedan ser afectadas.
- El impacto a la calidad del aire originado por las emisiones del bióxido de azufre, el bióxido de nitrógeno y las partículas PM₁₀ no es significativo ya que los máximos valores estimados por el modelo de dispersión se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por las normas oficiales ambientales para la calidad del aire.
- Por último cabe señalar que la ciudad de La Paz, Baja California Sur, no se verá afectada por las emisiones de las cuatro unidades móviles de eléctricas instalarse dentro del predio de la CCI Baja California Sur ya que estas unidades móviles se localizaran a más de ocho kilómetros al norte noreste del centro de la ciudad de la Paz, además de que existen barreras naturales que detienen la dispersión de sus emisiones.

5. REFERENCIAS

- Adams, D.F. y F.A. Young. 1965. Kraft odor detection and objectionability thresholds. Washington State University Progress Report on U.S. Public Health Service Grant.
- Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition, Vol. I: Stationary Point and Area Source (2000).
- Environmental Protection Agency, U.S. 1978. Pollution control guidance for geothermal energy development. EPA-600/7-78-101. Pp. 38-39.
- Pasquill, F. 1974. Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and other Sources. New York, 2da edición, Edit. John Wiley & Sons.
- Shinn, J.H., B.R. Clegg y M.L. Stuart. 1977. A linear gradient chamber for exposing field plants to controlled levels of air pollution. Lawrence Livermore, Ca. Report No.UCRL-81691.
- Turner, Bruce. 1970. Workbook of atmospheric dispersion estimates. 1ª ed, Cincinnati, Ed. National Technical Information Service.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1995. "ISC3 Guía del usuario", U.S.A., Ed. USEPA, Septiembre 1995.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1995. "PCRAMMET Guía del usuario", U.S.A., Ed. USEPA, Octubre 1995.
- Wark, K. y C.F. Warner.1990. Contaminación del aire. Ed. LIMUSA, 1ª edición. México D.F,