

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
ATMOSFERICOS EMITIDOS POR LA INDUSTRIA LADRILLERA
ARTESANAL QUERETANA”**

TESIS INDIVIDUAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL**

PRESENTA

ELISEO HERNÁNDEZ PÉREZ

DIRIGIDA POR

Dr. MIGUEL ÁNGEL REA LÓPEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2010.

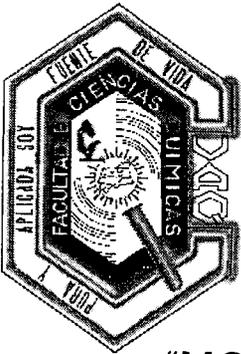
**BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

No. Adq. H 73590

Clas. IS

363.7392

H557m



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
ATMOSFERICOS EMITIDOS POR LA INDUSTRIA LADRILLERA
ARTESANAL QUERETANA”**

TESIS INDIVIDUAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL**

PRESENTA

ELISEO HERNÁNDEZ PÉREZ

DIRIGIDA POR

Dr. MIGUEL ÁNGEL REA LÓPEZ

SINODALES

Dr. MIGUEL ÁNGEL REA LÓPEZ
DIRECTOR

M. en C. MA. EUSTOLIA RODRÍGUEZ MUÑOZ
SINODAL

M. en C. MARÍA EUGENIA ORTEGA MORÍN
SINODAL

M. en C. GRACIELA GARCÍA BARRERA
SINODAL

Dedicatoria:

A mi padre por darme la oportunidad, apoyarme e impulsarme a seguir adelante. Que me enseñó a seguir el camino de la honestidad. Que me ha apoyado en los momentos más difíciles.

Eliseo Hernández Rangel.

A mis hermanos que siempre me brindaron su apoyo y motivación para seguir adelante.

Agradecimientos.

A mi Familia que siempre me apoyo en los tiempos difíciles.

A la maestra Leonor Barrón por su amistad y apoyo durante los años transcurridos.

Al Doctor Rea por su apoyo académico, paciencia y por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo.

A la maestra Eustolia Rodríguez por su apoyo y comprensión.

Al profesor Maestro Miguel Rico por su amistad y enseñanzas a lo largo de mi carrera profesional.

A la maestra María Eugenia Ortega por su amistad y paciencia durante los años transcurridos en la Facultad.

A la maestra Graciela García por su apoyo y darme la oportunidad de trabajar con ella.

A mis compañeros: Agustín, Ángeles, Carolina, Erika, Mayra, Vanessa del área ambiental por los momentos compartidos durante la estancia en la Facultad. Gracias por las enseñanzas y soportarme durante todos estos largos años.

A mis amigas Raquel Castañeda y Sandra Mora por estar ahí con su apoyo y amistad.

A Mario Alberto Olvera por sus enseñanzas para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
II.1 Fabricación artesanal de ladrillo	3
II.2 Contaminantes atmosféricos típicos y sus efectos	6
II.2.1 Monóxido de carbono (CO)	7
II.2.2 Óxidos de azufre (SO _x)	7
II.2.3 Óxidos de nitrógeno (NO _x)	8
II.2.4 Material particulado (PST)	9
II.2.5 Ozono (O ₃)	11
II.3 Otros contaminantes atmosféricos	12
II.3.1 Cloruro de vinilo	12
II.3.2 1-3 Butadieno	12
II.3.3 Diclorobencenos (DCB)	13
II.3.4 Hidracinas	13
II.4 Normatividad mexicana	14
II.5 Modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos	15
II.5.1 Insumos de los modelos de dispersión	17
II.5.2 ISCST3 - Modelo para fuente industrial compleja	18
II.5.3 ISC-Prime – Modelo de levantamiento de pluma	19
II.5.4 ISC-AERMOD	19
II.5.4.1 AERMET	19
II.5.4.2 AERMAP	20

II.5.5	Necesidades de datos para modelación en AERMOD	20
II.6	Sán Nicolás, Tequisquiapan	22
III.	HIPÓTESIS	25
IV.	OBJETIVOS	26
IV.1	General	26
IV.2	Específicos	26
V.	METODOLOGÍA	27
V.1	Materiales	27
V.2	Métodos	27
V.2.1	Recolección de información metereológica	27
V.2.2	Información topográfica	28
V.2.3	Fuentes de emisión	29
V.2.4	Modelación	29
VI.	RESULTADOS	31
VI.1	Información metereológica	31
VI.2	Modelación de contaminantes	36
VI.2.1	Modelación de partículas suspendidas totales (PST)	36
VI.2.2	Modelación de monóxido de carbono (CO)	42
VI.2.1	Modelación de óxidos de nitrógeno (NO _x)	46
VII.	DISCUSIÓN	52
VIII.	CONCLUSIONES	54
IX.	BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Límites máximos permisibles para contaminantes criterio	14
2	Frecuencia de calmas por intervalo de temperatura en la estación metereológica San Nicolás 1	32
3	Frecuencia de calmas por intervalo de temperatura en la estación metereológica San Nicolás 2	33
4	Frecuencia de calmas por intervalo de temperatura en la estación metereológica San Nicolás 3	34
5	Máximos, mínimos y medidas de tendencia central para las concentraciones de PST en 5 diferentes escenarios de modelación.	38
6	Concentraciones medias de PST correspondientes al primero y hasta el quinto máximo en un escenario de modelación mixto.	39
7	Máximos, mínimos y medidas de tendencia central para las concentraciones de CO en 5 diferentes escenarios de modelación.	43
8	Concentraciones medias de CO correspondientes al primero y hasta el quinto máximo en un escenario de modelación mixto.	44
9	Máximos, mínimos y medidas de tendencia central para las concentraciones de NO _x en 5 diferentes escenarios de modelación.	48
10	Concentraciones medias de NO _x correspondientes al primero y hasta el quinto máximo en un escenario de modelación mixto.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Composición aproximada de los componentes de PST generados por combustibles fósiles.	10
2	Flujo de datos para la modelación mediante AERMOD	21
3	Esquema topográfico del área de estudio	23
4	Porcentaje de horas de calma con respecto al total de horas medidas detectadas en la estación metereológica San Nicolás 1.	35
5	Histogramas de frecuencia de concentraciones máximas de PST para seis diferentes escenarios de modelación	36
6	Localización de celdas geográficas en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río que presentaron máximos de PST	40
7	Dispersión representativa de PST en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río	41
8	Histogramas de frecuencia de concentraciones máximas de CO para seis diferentes escenarios de modelación.	42
9	Localización de celdas geográficas en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río que presentaron máximos de CO	45
10	Dispersión representativa de CO en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río	46
11	Histogramas de frecuencia de concentraciones máximas de NO _x para seis diferentes escenarios de modelación.	47
12	Localización de celdas geográficas en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río que presentaron máximos de NO _x	49
13	Dispersión representativa de NO _x en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río	50

RESUMEN

La industria ladrillera artesanal es una actividad importante en algunas comunidades, tal como es el caso en San Nicolás Tequisquiapan. Es un proceso ineficiente y poco tecnificado que genera una contaminación atmosférica importante. El impacto ambiental generado por esta actividad se extiende más allá del lugar donde los contaminantes se generan, afectando comunidades aledañas y receptores susceptibles cercanos a los puntos de emisión. La dispersión de estos contaminantes es mayormente influenciada por las características topográficas y meteorológicas de la región. Los programas de modelación han probado ser una herramienta útil en la estimación y evaluación de la manera en como se comportan este tipo de fenómenos. AERMOD es un programa aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA). En este trabajo se estimó la dispersión de los contaminantes a través del corredor ladrillero existente en la comunidad de San Nicolás. Se determinó que de los 497 hornos ladrilleros existentes en el corredor el 4% se encuentran regularmente encendidos. Los datos meteorológicos del lugar nos indican que los vientos dominantes van en dirección noreste a sureste. El porcentaje total de calmas (velocidad de viento ≥ 0.5 m/s) durante el año fue de 33%. Las concentraciones más altas de contaminantes atmosféricos se producen cuando se combinan temperaturas ambiente menores de 15°C y calmas. Estas concentraciones superan varios días al año los límites establecidos por la normatividad mexicana, especialmente en el caso de el material particulado (PST). Se encontró que hay una influencia en la dispersión de los contaminantes en base a la ubicación de las fuentes de emisión activas, esto puede ser explicado por la topografía del lugar, que influye en la generación de microclimas. Debido a su cercanía a las fuentes de emisión San Nicolás, San Pedro Ahuacatlán y Visthá son las comunidades mayormente afectadas. Es importante tomar base los resultados de este estudio para tomar acciones que se reflejen en el desarrollo sustentable de las comunidades involucradas.

I. INTRODUCCIÓN

En años recientes, la contaminación atmosférica se ha ido agravando y eso se debe, al menos en parte, a un aumento en la quema de combustibles fósiles y a la ineficiencia de los procesos de combustión. La generación de contaminantes es el resultado de la industrialización de los países y de la producción de bienes y servicios, los cuales proporcionan bienestar y elevan el nivel de vida de la población. Sin embargo, en muchos casos elevar el nivel de vida no va de la mano con la calidad de vida. La fabricación de artículos que elevan el nivel de vida impacta en la explotación de recursos naturales y en la generación de contaminantes. Ese es el caso, por ejemplo, de la eliminación de grandes extensiones de bosques y del consumo indiscriminado de agua para la elaboración de papel, que además genera contaminación por dioxinas durante el proceso de blanqueado (Servos y col., 1996).

La naturaleza y cantidad de los contaminantes generados durante la combustión depende, en gran medida, de la calidad del combustible, de la eficiencia del proceso y del control en el punto de emisión. En procesos en donde la calidad de los combustibles, la eficiencia de combustión y los controles de emisión son pobres se genera gran cantidad de contaminantes incluyendo monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), y partículas suspendidas totales (PST) que pasan a formar parte de la composición del aire el cual es respirado por los seres vivos.

En México, la mayoría del ladrillo rojo se fabrica de manera artesanal y para su fabricación se emplea un proceso de horneado rudimentario y poco tecnificado. En el proceso de combustión se emplea cualquier tipo de combustible disponible y barato incluyendo combustóleo, aceites usados, madera, plásticos, llantas, basura, residuos industriales etc., sin tomar en consideración su capacidad calorífica o su potencial contaminante. El resultado es la emisión de contaminantes a la atmósfera que incluyen dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, compuestos

orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), partículas (respirables y totales) y dependiendo de las condiciones de combustión y de los materiales empleados como combustibles, posiblemente hidrocarburos aromáticos halogenados (HAHs), incluidos bifenilos policlorados (BFPCs), dibenzodioxinas (DDPCs) y dibenzofuranos policlorados (CIPAS, 2002). Efectivamente, la industria ladrillera artesanal representa la fuente predominante de contaminación en algunas zonas rurales. En el estado de Querétaro existen 547 hornos ladrilleros, de los cuales el 46% se encuentran en la comunidad de San Nicolás, Tequisquiapan. La comunidad de San Nicolás es la comunidad ladrillera más importante en el estado de Querétaro (Anaya, 2006). En este trabajo se estudió la dispersión de contaminantes emitidos por la industria ladrillera artesanal asentada en la comunidad de San Nicolás como preámbulo para determinar los receptores susceptibles.

II. ANTECEDENTES

II.1. Fabricación artesanal de ladrillo.

La industria de la construcción en México obtiene uno de sus insumos principales, el ladrillo rojo cocido, de la industria ladrillera artesanal. El ladrillo rojo es un material que provee buena resistencia mecánica y también es usado por algunos arquitectos para dar estética a las construcciones. Sin embargo, en años recientes este material ha sido desplazado por otros materiales que también proporcionan buenas características mecánicas y son más económicos tal como los ladrillos de arenilla. Por otra parte también hay preferencia por aquellos materiales que, aún siendo más costosos, presentan diferentes propiedades tal es el caso del concreto, el sillar y la cantera.

El ladrillo se fabrica casi en su totalidad de forma artesanal, es decir manualmente y sin procesos tecnificados. El proceso de fabricación consiste en preparar tierra arcillosa limpiándola de todo tipo de raíces y piedras. La arcilla se tamiza y se mezcla con agua en un pequeño pozo sobre la superficie del terreno hasta formar una mezcla homogénea. La mezcla se coloca en moldes, usualmente de madera y los ladrillos moldeados se colocan en suelo recubierto de arena cernida (para evitar que se dañen o se peguen a la superficie) para eliminar el material sobrante, se retira el molde y se dejan secar al sol por 24-48 horas.

Después del moldeado, los ladrillos se hornean y es en esa fase donde el ladrillo crudo cambia sus propiedades físicas y químicas. El ladrillo se encoge, reduce su porosidad, su capacidad de absorción de agua y los materiales de la arcilla se vitrifican. Son esos cambios los que proporcionan al ladrillo su excelente resistencia mecánica y su color rojo característico. Desgraciadamente, es también en esta etapa donde se generan contaminantes atmosféricos.

La gran cantidad de contaminantes generados es debida a dos factores principales. Por un lado el proceso de horneado (incluyendo el diseño del horno y eficiencia del dispositivo de combustión) y por otro el tipo de combustibles utilizados. Los fabricantes de ladrillos utilizan combustibles de bajo costo, los cuales generalmente son leña, aceites gastados, combustóleo, llantas, basura, plásticos y residuos industriales y en general cualquier material combustible disponible sin considerar su capacidad calorífica o potencial contaminante (Hernández, 2006).

A medida que se incrementa la calidad del combustible se reducen las emisiones. Cambiando el combustible a gas natural, gas L.P. u otro combustible mas limpio, se obtendría una reducción en la emisión de contaminantes. Sin embargo, la producción artesanal de ladrillo no se caracteriza por tener una gran rentabilidad. Con un precio de venta promedio de \$0.85 por ladrillo y un volumen de consumo de combustible de 0.25 litros/ladrillo, se destina aproximadamente \$0.30 del costo final para la obtención de energéticos (Anaya, 2006). Es por eso que los fabricantes de ladrillo buscan combustibles de bajo costo.

Un problema con las condiciones actuales en que operan los hornos ladrilleros es la generación de contaminantes, algunos de ellos altamente tóxicos como metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's), bifenilos policlorados (BCP) y otros compuestos orgánicos persistentes (COP). Efectivamente, en varias comunidades ladrilleras como Baldecañas, Zacatecas y Caiteme, Sonora se han registrado quejas por parte de los vecinos de las comunidades y colonias en donde se encuentran ladrilleras, por los altos niveles de contaminación que producen.

En algunas ciudades como San Luís Río Colorado, Sonora y Juventino Rosas, Gto. Los hornos, se han reubicado en parques ladrilleros. Pero, aún queda mucho por hacer. Es reconocido, aún por los mismos ladrilleros, que su actividad daña al medio ambiente, genera contaminantes y explota los recursos muchas veces sin vigilancia ni control.

A pesar de todos los problemas ambientales y de salud inherentes a la fabricación de ladrillo, esa actividad es el medio de sustento de muchas familias y es obvio que no se puede legislar, modificar o adecuar sin la participación de los fabricantes de ladrillo. Es importante tomar en cuenta sus opiniones e inquietudes para obtener una solución rápida, eficiente y conveniente para todos los sectores involucrados. Llevar a cabo una reubicación o una modificación al sistema sin consentimiento de los fabricantes puede conducir a un fracaso total.

En Cd. Juárez, Chihuahua se diseñó un horno conocido como MK2, que optimiza el uso de combustible, reduce emisiones totales hasta un 50% (Romo y col., 2004) y la generación de PM_{10} hasta en 99.5% (Avila y col., 1999). Sin embargo aún la implementación de un sistema tan eficiente ha producido resultados insatisfactorios. En el caso de Cd. Juárez eso fue debido a la falta de consenso, capacitación, y seguimiento de los programas (Romo y col, 2004). Para el funcionamiento de los programas de reconversión tecnológica es de vital importancia lograr una participación activa por parte de los 3 sectores involucrados: productores, gobierno y sociedad.

La sociedad (incluyendo los productores) es la directamente afectada por las emisiones. Efectivamente, se sabe que el SO_2 , PST y otros contaminantes producen enfermedades respiratorias (Schwartz, 1992) y cardíacas (Riediker y col., 2004). Con su participación, estarán conscientes e informados de las actividades que se llevan a cabo y puedan aportar ideas que beneficien al proyecto.

Los fabricantes conocen el proceso mejor que nadie, ellos saben cuales son las demandas del proceso de elaboración y de que manera puede afectar cualquier modificación. Mediante su participación activa se puede promover el acatamiento de resoluciones aceptadas, ya que gran parte las propusieron ellos.

Las autoridades, como responsables del cumplimiento de las leyes y normas, deben participar como moderadores buscando acuerdos entre las diferentes partes

involucradas, proporcionando los medios económicos y tecnológicos. Por último, también se debe conformar un grupo técnico que pueda diseñar y mejorar los procesos, dar capacitación y llevar un seguimiento de las acciones a realizar y de acuerdo a los resultados que se han obtenido; sin olvidar llevar a cabo una retroalimentación. Solo de esta manera se podrá asegurar una vía factible de reducción de emisiones, sin afectar la economía de los ladrilleros y de las personas que dependen de esta actividad.

II.2. Contaminantes atmosféricos típicos y sus efectos

Los contaminantes generados en las diversas fuentes (ya sean fijas, móviles o de área) son emitidos a la atmósfera y se distribuyen en todos los compartimentos ambientales. En el ambiente, los contaminantes pueden provocar: desde generación de olores, disminución de la visibilidad y si se absorben, pueden ocasionar daños a la flora y fauna (Anaya, 2006). Si los contaminantes son inhalados por humanos pueden provocar enfermedades respiratorias tal como asma y bronquitis (Schwartz, 1992), e inclusive enfermedades relacionadas con el sistema circulatorio (Keys, 1970). Efectivamente, se ha encontrado que un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} está asociado con un incremento de 0.7% en la mortandad (Schwartz, 2000).

Durante la combustión se genera una cantidad inmensa de contaminantes que pueden causar efectos negativos en la salud y medio ambiente. Destacan el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PST, PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$), ozono superficial (O_3) y plomo (Pb) también llamados contaminantes criterio. Se denominan "criterio" debido a que son regulados mediante límites permisibles que son basados en la salud humana y/o ambiental.

En el caso de la comunidad de San Nicolás, Tequisquiapan se han encontrado otros contaminantes tales como acetileno, 1,3 butadieno, m-diclorobenceno, hidrazina, cloruro de vinilo y oxido de propileno (Valencia, 2006).

II.2.1 Monóxido de carbono (CO)

En la combustión ideal completa de los hidrocarburos con fórmula C_xH_x , los productos finales de reacción serían dióxido de carbono y vapor de agua. El dióxido de carbono (CO_2) no se considera un contaminante como tal, debido a que se presenta al final de toda combustión, existe comúnmente en el medio ambiente y no presenta peligro alguno a la salud.

Sin embargo, cuando la combustión se realiza en condiciones deficientes no se lleva a cabo la oxidación completa del carbono y se produce monóxido de carbono (CO). Debido a sus características (incolore e inodoro) es difícil detectarlo sin el instrumental adecuado, es el contaminante principal del aire y de lugares cercanos a procesos de combustión (ERG y TransEngineering, 2005).

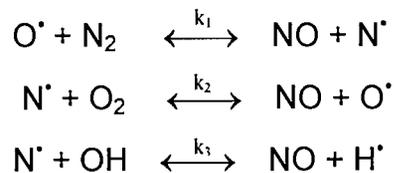
II.2.2 Óxidos de azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre, principalmente SO_2 y SO_3 , son compuestos que se generan debido al contenido de azufre en los combustibles. El SO_2 es un gas incoloro con un olor característico y el SO_3 es un líquido incoloro. Ambos, al entrar en contacto con la humedad, se transforman en ácido sulfuroso y ácido sulfúrico (H_2SO_3 , H_2SO_4) los cuales son corrosivos e irritantes para el sistema respiratorio. Las personas expuestas a esos contaminantes pueden experimentar dificultades para respirar y ardor de las vías respiratorias. El ácido sulfúrico que se forma a partir de los óxidos de azufre es el componente principal en la lluvia ácida (ATSDR, 1999).

II.2.3 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

En la tropósfera, los óxidos de nitrógeno (NO_x) favorecen la formación de ozono a bajos niveles de altitud y por ende la formación de smog fotoquímico. En la combustión de combustibles fósiles se produce principalmente monóxido de nitrógeno (NO) el cual es transformado casi completamente a dióxido de nitrógeno. El monóxido de nitrógeno puede ser formado de 3 diferentes maneras, en este caso podemos distinguir:

- Monóxido de nitrógeno térmico, formado a partir de nitrógeno atmosférico por medio de los productos de la combustión a altas temperaturas de acuerdo al mecanismo de Zeldovich. Éste se produce en la parte posterior del frente de flama y su formación consiste principalmente en tres reacciones



La primera reacción se lleva a cabo a altas temperaturas (1,800 K) debido a la alta energía de activación requerida para romper el enlace N≡N.

- Monóxido de Nitrógeno puntal. Se forma en el frente de la flama a partir de nitrógeno atmosférico por medio del mecanismo de Fenimore. La formación del NO puntal de cierta manera es un procedo relacionado con la formación del radical CH[•], el cual puede reaccionar de muchas maneras, en una de ellas, el intermediario CH[•] reacciona con N₂ para formar HCN y posteriormente transformarse en NO.



Esa reacción tiene una energía de activación relativamente baja y se puede llevar a cabo a temperaturas de 1,000 K.

- Monóxido de nitrógeno de combustión. Se produce mediante el mecanismo de Zeldovich a partir del contenido de Nitrógeno en el combustible. En la combustión, aproximadamente 5-10% de NO_x se forma mediante el mecanismo de Fenimore y el 90-95% restante mediante el mecanismo de Zeldovich (Merker y col., 2006).

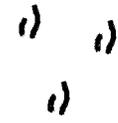
Cuando el monóxido de nitrógeno entra en contacto con la humedad atmosférica se genera el ácido nitroso y nítrico (HNO_2 y HNO_3) contribuyendo de esta manera a la lluvia ácida. Se ha encontrado una relación significativa entre los niveles ambientales de óxidos de nitrógeno (NO_x) y el incremento en las enfermedades respiratorias en niños menores a 2 años (Marcer y col., 2000).

II.2.4 Material particulado (PST)

Existen diversas maneras de clasificar el material particulado. Una de ellas es por la manera de ser generado. El material particulado primario es aquél que permanece de idéntica forma que cuando se generó. El material particulado secundario es aquel que interviene en reacciones de oxidación y que se transforma en otros compuestos, tal como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Otra manera de clasificarlo es por su origen. Se le llama natural cuando proviene de fuentes naturales, tales como tolvánicas, incendios forestales, emisiones volcánicas o polen; y antropogénico cuando es producido mediante actividades humanas como la minería, la construcción o industriales, entre otras.

Las contribuciones antropogénicas son más significativas al material particulado secundario. Éste se genera a partir de la combustión de hidrocarburos y está conformado por aproximadamente el 95% de compuestos orgánicos (PAH y

alquitrán) y 5% de componentes inorgánicos (Merker y col., 2006). La Figura 1 muestra la composición aproximada del material particulado.

	Alquitrán (Partículas con diferente forma y tamaño)			Hidrocarburos Sublimados, Cristalizados, Condensados	
Partículas Orgánicas					
Partículas Inorgánicas					
	Cenizas	Óxidos y Sales	Impurezas	Fibras Cerámicas	Agua

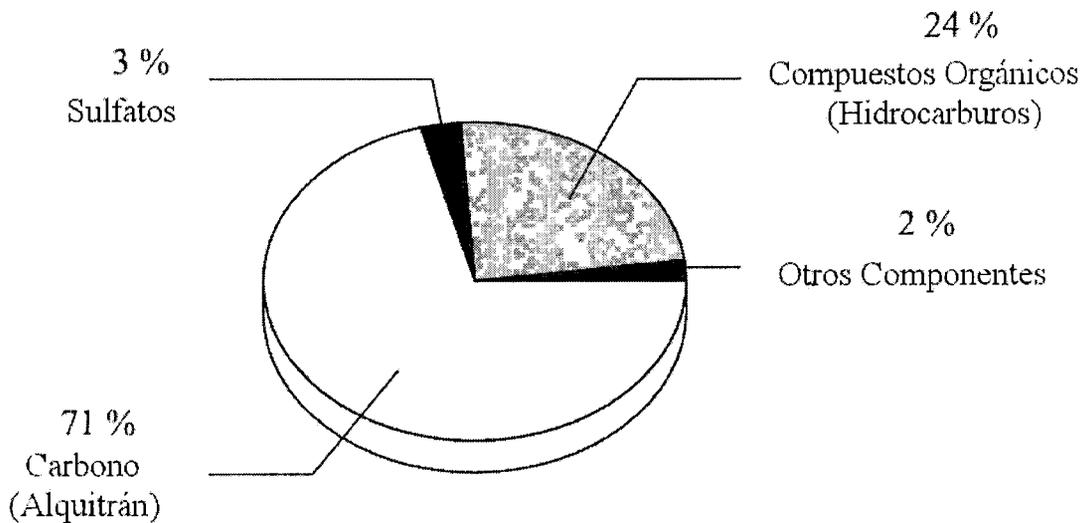


Figura 1. Composición aproximada de los componentes de PST generados por combustibles fósiles (Merker y col, 2006).

El material particulado se origina cuando se lleva a cabo una combustión con exceso de combustible, el exceso causa que los hidrocarburos se polimericen y formen un primer anillo de benceno. Los bencenos formados actúan como núcleos

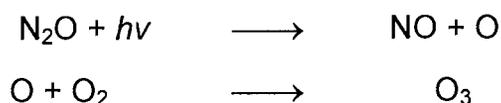
de condensación alrededor de los cuales se aglomeran mas hidrocarburos incrementando el tamaño de partícula. De forma similar, la formación del primer anillo bencénico y su posterior polimerización da inicio a la formación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH).

Finalmente, otra manera de clasificación es por su tamaño de partícula. El término partículas suspendidas totales (PST) es usado para referirse a aquel material con un rango de 25 a 45 μm . La designación de PM_{10} , se refiere a material particulado con un tamaño menor o igual a 10 μm y $\text{PM}_{2.5}$ a partículas con un tamaño menor a 2.5 μm .

II.2.5 Ozono (O_3)

El ozono es un gas formado por 3 átomos de oxígeno en su estructura molecular. Se forma naturalmente en la estratosfera por efecto de la radiación solar UV sobre la molécula de oxígeno (O_2) y su posterior reacción con oxígeno no dissociado. Forma una capa llamada ozonósfera, la cual sirve como filtro para los rayos UV, evitando la descomposición de ADN y compuestos orgánicos (SMA, 2009).

A niveles troposféricos el ozono es formado por la reacción fotoquímica de NO_x y COV, provenientes del uso de combustibles fósiles en actividades antropogénicas.



La exposición de ozono en receptores susceptibles se asocia con padecimientos en la salud, tal como irritación de ojos y vías respiratorias, malestar general y agravamiento de padecimientos respiratorios tales como asma (Beckett, 1991). El ozono es un agente oxidante y dañina a las plantas. Este daño puede presentarse como cambios en el metabolismo, reducción fotosintética y necrosis. Reduciendo la

capacidad de producción (McKee, 1994). La fototoxicidad se incrementa en presencia de algunos otros contaminantes como NO_x y SO₂ (Blum, 2006).

II.3. Otros contaminantes atmosféricos

II.3.1 Cloruro de vinilo.

El cloruro de vinilo (C₂H₃Cl) es un compuesto que no ocurre naturalmente, se utiliza en la fabricación del PVC y plásticos. Estos plásticos al ser quemados provocan la liberación de cloruro de vinilo al medio ambiente. La toxicidad de este contaminante depende de las concentraciones y tiempos de exposición, sin embargo se ha observado que algunas personas que han sido expuestas a niveles altos sufren daño hepático, nervioso y reacciones alérgicas. Estudios en animales han demostrado daño en semen y afectaciones en el crecimiento y desarrollo (ATSDR, 2006).

II.3.2 1-3 Butadieno

El butadieno es utilizado principalmente en la producción de caucho sintético para llantas de automóviles y camiones. Al liberarse a la atmósfera se presenta como un gas incoloro que generalmente se encuentra a niveles bajos en el aire contaminado.

La exposición del 1,3-butadieno se produce al respirar aire y al ingerir agua o alimentos contaminados. La mayoría de las personas expuestas son aquellas que trabajan en la producción de cauchos, plásticos y resinas ó como en el caso de San Nicolás, aquellas que están expuestas a emanaciones producto de la combustión de plásticos y llantas. La cantidad promedio de 1,3-butadieno en el aire de zonas urbanas es de 0.3 ppb.

La vía de ingreso al cuerpo generalmente es a través de los pulmones. Su exposición aguda causa irritación de ojos nariz y garganta. En caso de exposición

directa a niveles altos puede causar mareos y pérdida de conocimiento. No hay información acerca de los límites en los cuales pueda causar estos efectos (ATSDR, 1992). Sin embargo el límite establecido por el Instituto Nacional Para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de 1,000 ppm ha sido considerado reducirse debido a que el 1,3-butadieno ha demostrado ser un carcinógeno en estudios realizados en animales (Melnick y col, 1990).

II.3.3 Diclorobencenos (DCB).

Los diclorobencenos son una familia de compuestos organoclorados. Son usados como componentes para fabricar plásticos, herbicidas e insecticidas. En condiciones normales se encuentran en estado sólido, pero al entrar en contacto con el medio ambiente pasan a la atmósfera por medio de sublimación (ATSDR, 2006). Su presencia en sitios contaminados es debida a derrames o por la combustión de materiales que los presentan en su composición. En el medio ambiente se adhieren al suelo y sedimento, pasan al agua y son absorbidos por plantas y peces (Oliver y Nicol, 1982).

La vía de ingreso al cuerpo es por inhalación al respirar vapores de DCB durante el uso e incineración de productos que los contienen ó por ingestión de alimentos contaminados. En México estos compuestos se encuentran bajo regulación en el listado de residuos peligrosos NOM-052-SEMARNAT-2005 (SEMARNAT, 2005).

II.3.4 Hidracinas

Las hidracinas son un grupo de compuestos líquidos incoloros de características físicas similares al amoniaco. Los mas comunes son la hidracina 1,1 dimetil hidracina y 1,2 dimetilhidracina. Dentro de sus usos se encuentra la fabricación de combustibles para cohetes, tratamiento de aguas y reactivos químicos.

Se ha observado que la exposición a estos contaminantes produce efectos en la salud en animales. En periodos breves puede producir tos e irritación en vías respiratorias y su exposición crónica puede producir daño hepático y renal (Choudhary y Hansen, 1998). Las vías de ingreso al cuerpo son por medio de inhalación de vapores, ingestión de alimentos y agua contaminada y por contacto con sedimentos contaminados.

II.4. Normatividad mexicana

En México las concentraciones atmosféricas de los contaminantes criterio se encuentran reguladas por las Normas Oficiales emitidas por la Secretaría de Salud como medidas de protección a la salud humana. Estas medidas se resumen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para contaminantes criterio. (SSA, 2005)

Contaminante	Concentración límite	Tiempo de muestreo	Normatividad Mexicana
Ozono (O ₃)	0.11 ppm	Promedio horario 1 vez al año	NOM-020-SSA1-1993
Monóxido de Carbono (CO)	11.0 ó 12,595 µg/m ³	Promedio móvil de 8 horas 1 vez al año	NOM-021-SSA1-1993
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.13 ppm ó 341 µg/m ³	24 horas 1 vez al año	NOM-022-SSA1-1993
	0.03 ppm ó 79 µg/m ³	Media aritmética anual	
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (395 µg/m ³)	1 hora 1 vez al año	NOM-023-SSA1-1993
PST,	210 µg/m ³	Promedio 24 horas	NOM-025-SSA1-1993
PM ₁₀	120 µg/m ³	Promedio 24 horas	
	50 µg/m ³	Promedio anual	
PM _{2.5}	65 µg/m ³	Promedio de 24 horas	
	15 µg/m ³	Promedio anual	

II.5. Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos.

Una herramienta que se ha utilizado en los últimos años para predecir cómo se distribuyen los contaminantes en el ambiente es la modelación matemática. Un modelo es una ecuación matemática que describe una variable en función de otras. Un modelo de dispersión es un algoritmo matemático en el que se simulan las condiciones derivadas de la emisión de contaminantes a partir de parámetros (constantes y variables), incluyendo tipo de fuente emisora, tipo de contaminante emitido, condiciones meteorológicas, topográficas y atmosféricas, entre otras. La información requerida para un modelo es variada y la calidad del resultado depende de la calidad de los datos que se alimentan al modelo.

Existen diversos tipos de modelos para la modelación de contaminantes atmosféricos. Estos modelos varían de acuerdo a su complejidad y finalidad. La EPA ha desarrollado gran variedad de esos modelos, y debido a la influencia de los Estados Unidos en nuestro país, han sido aceptados de buena manera. Los modelos matemáticos se encuentran agrupados en 3 categorías:

- Adaptativos. Basados en programas de cómputo que integran conceptos de redes neurales, lógica difusa y sistemas caóticos.
- Mecanísticos. El desarrollado de este tipo de modelos está basado en el comportamiento físico y/o químico de las variables que integran el modelo. En ese tipo de modelos, usualmente se utiliza una base de datos con información meteorológica, de generación de contaminantes, de factores de emisión, etc. Su principal uso es en fuentes puntuales o industriales con condiciones controladas. Se utilizan en la estimación de emisiones en tanques de almacenamiento (TANKS), operaciones de carga de derivados del petróleo, rellenos sanitarios (LANDGEM Y LANDFILL), aguas residuales (WATER9) y residuos peligrosos (CHEMDAT8).

- Variable múltiple. Son una combinación de inventarios de emisiones e información particular del sitio en donde se va a aplicar la modelación. En ellos se deben alimentar diferentes variables incluyendo condiciones meteorológicas, geográficas, emisiones y fuentes. En este tipo de modelos se pueden combinar emisiones. Por ejemplo, en una construcción se puede considerar que la emisión de PST es debida a demolición, al vertido de materiales, a emisiones de vehículos, a maquinaria pesada y a excavaciones y que la dispersión en el ambiente es condicionada por la topografía, las condiciones meteorológicas, etc. Por tanto el resultado final será dependiente de todas las variables combinadas.

Los modelos de dispersión son de utilidad para determinar de que manera los contaminantes afectan al medio ambiente en el lugar de emisión y hacia donde se dispersan. La modelación no sustituye de ninguna manera las evaluaciones directas, ni la necesidad de estudios posteriores (Hertel y col., 2007).

Debido a que la información alimentada al modelo es introducida por el usuario, se pueden obtener simulaciones comparativas. Por ejemplo, se puede elaborar un modelo con la información que es generada actualmente, y compararla con información obtenida en casos supuestos, tal como aumento o disminución de emisiones y/o fuentes de emisión, cambio de localización de la fuente emisora, cambio de condiciones climatológicas y topográficas. De esta manera se puede predecir la forma en que las emisiones impactarán el medio ambiente y así tomar decisiones preventivas o correctivas tendientes a la solución de problemas ambientales.

En el mercado se puede obtener diferentes tipos de software de modelación, algunos de ellos son de distribución gratuita. Sin embargo la elección del modelo a utilizar dependerá de los contaminantes a evaluar (Reid y col., 2003). Se debe elegir

el modelo que considere las posibles reacciones que se puedan llevar a cabo entre los contaminantes y el medio en donde son liberados.

La exactitud de un modelo no puede ser establecida con un cierto margen de error, ya que la calidad del modelo dependerá de la incertidumbre en los datos que se introdujeron (meteorología, emisión de la fuente, incertidumbres en la mecánica de los modelos, etc.).

II.5.1 Insumos de los modelos de dispersión.

Los insumos de los modelos de dispersión incluyen:

- Tipo de fuente emisora
- Tiempo de emisión
- Tipo de contaminante emitido
- Condiciones meteorológicas
- Condiciones topográficas
- Condiciones atmosféricas

Las fuentes emisoras se pueden clasificar como móviles y fijas. Las fuentes móviles son aquellas que no se encuentran en una posición determinada, es decir, que su posición se mueve a través del tiempo, tal es el caso de automóviles, maquinaria de construcción, etc. Las fuentes fijas son aquellas con ubicación constante, como chimeneas industriales, incendios u hornos ladrilleros.

El tiempo de emisión es la duración de la emisión de contaminantes, existen emisiones espontáneas llamadas bocanadas en las que la emisión de contaminantes es de manera intermitente durante un breve lapso de tiempo. Las emisiones continuas no tienen dependencia del tiempo, es decir, los contaminantes se emiten continuamente. Esas emisiones son llamadas de tipo pluma. Finalmente,

las emisiones continuas son dependientes del tiempo, es decir que emiten contaminantes durante periodos intermitentes.

En lo que respecta al tipo de contaminante emitido se debe tomar en cuenta la velocidad de salida, el estado físico de agregación, el tamaño y peso de las partículas, el peso molecular del gas, la concentración del contaminante, la temperatura de emisión, las reacciones químicas que se puedan llevar a cabo en la nube de salida y las condiciones propias del contaminante emitido.

Las condiciones meteorológicas, topográficas y atmosféricas son de vital importancia en la modelación porque son esas condiciones las que determinan la altura y el tamaño de la nube de dispersión que se generará. Dentro de estas variables se encuentran dirección y velocidad de los vientos, la temperatura, la insolación, la presión barométrica, la precipitación, la estabilidad atmosférica, la humedad relativa, las montañas, valles y edificios localizados alrededor del lugar de estudio y la altura sobre el nivel del suelo de las fuentes emisoras.

II.5.2 ISCST3 – Modelo para fuente industrial compleja.

El ISCST3 es un modelo de dispersión de estado estacionario gaussiano que puede ser usado en la modelación de contaminantes primarios y emisiones continuas de contaminantes. El modelo puede manipular fuentes múltiples puntuales o de área y los factores de emisión pueden ser constantes o variables de acuerdo al mes, estación u hora del día. Además, el modelo toma en cuenta los efectos de edificios cercanos al punto de emisión y contiene algoritmos de dispersión en terreno complejo. El ISCST3 fue utilizado por años por la EPA hasta su sustitución por el modelo AERMOD (EPA, 2004).

II.5.3 ISC-PRIME – Modelo de levantamiento de pluma.

Es un modelo basado en una versión del ISCST3, pero tiene una mejora en los coeficientes de dispersión de pluma debido a turbulencia y la reducción del levantamiento de la pluma por efecto de líneas de flujo descendientes provenientes de edificios aledaños a la fuente.

II.5.4 ISC-AERMOD

El modelo AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model) es un modelo de dispersión de tipo determinístico. En una capa de límite estable (SBL) asume que las distribuciones de concentración son de tipo gaussiano en componentes verticales y horizontales. La capa límite convectiva también la toma en cuenta como gaussiana, sin embargo la distribución vertical es descrita como una función de densidad de probabilidad bi-gaussiana. El AERMOD construye perfiles verticales de las variables meteorológicas mediante extrapolaciones utilizando relaciones de similitud. De esta manera, los perfiles verticales de velocidad y dirección de viento, la turbulencia, las temperaturas y los gradientes de temperaturas son estimados con la observación de todas las mediciones disponibles. Adicionalmente, el AERMOD cuenta con 2 componentes, AERMAP (procesador de Terreno) y AERMET (procesador meteorológico) (EPA, 2004).

II.5.4.1 AERMET

En este modelo se agregan las características de superficie tales como el albedo, la rugosidad de superficie y la razón de Bowen. AERMET calcula los parámetros de capa límite planetaria (PBL), velocidad de fricción (u^*), longitud Monin-Obukhov (L), escala de velocidad convectiva (w^*), escala de temperatura (θ^*), altura de mezclado (z_i) y flujo de calor de superficie (H). Esos parámetros son posteriormente transferidos a AERMOD y son usados para calcular los perfiles de velocidad de

viento (u), las fluctuaciones laterales y verticales (σ_v , σ_w), el gradiente potencial de temperatura ($d\theta/dz$) y la temperatura potencial (θ)(EPA, 2004).

II.5.4.2 AERMAP

AERMAP utiliza información de terreno en forma de malla para calcular la altura de influencia debida al terreno (h_c). La escala de altura de terreno h_c , definida para cada receptor, es usada para calcular la altura de división de corriente. La información de la malla necesaria por AERMAP también es usada para crear la malla de receptores. La elevación de cada receptor especificado localización (x_r, y_r), altura sobre el nivel del mar (z_r) y la escala de altura de terreno (h_c) es automáticamente asignada a través de AERMAP. En la Figura 2 se muestra el flujo de datos de una modelación con AERMOD.

El éxito de los diferentes modelos disponibles es variable, sin embargo se ha utilizado la modelación combinada para obtener mejores resultados. AERMOD se ha utilizado en combinación con Calpuff y TAPM, obteniendo buenos resultados, aunque para ello se tiene la necesidad de generar datos de superficie y atmósfera superior cuando no se encuentran disponibles (EPA, 2004).

La Figura 2 muestra un diagrama de flujo que indica de que manera los datos son procesados por AERMET y AERMAP para ser transferidos y procesados por AERMOD.

II.5.5 Necesidades de datos para modelación en AERMOD.

Además de la topografía del sitio de estudio se deben proporcionar los siguientes datos para poder realizar el pre-procesamiento mediante AERMET.

ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE MODELACIÓN

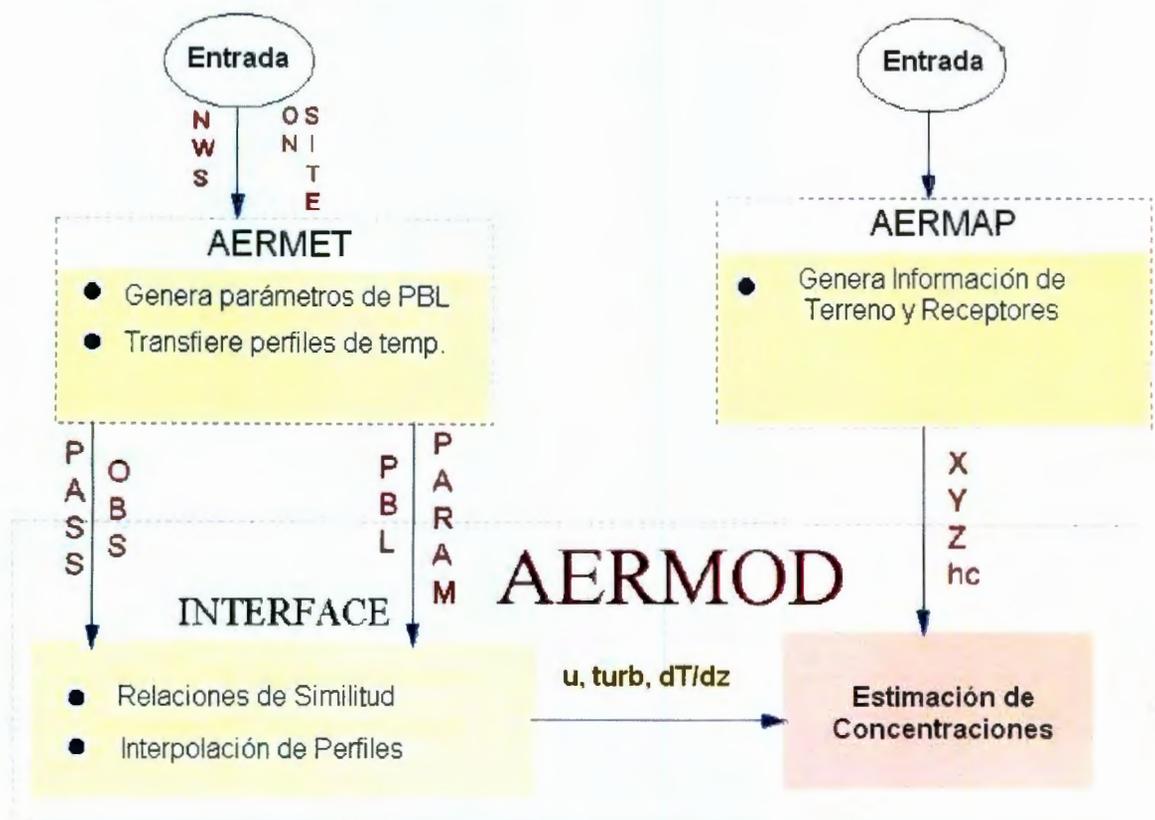


Figura 2. Flujo de Datos para la modelación mediante AERMOD (EPA, 2004).

Meteorología:

Velocidad de viento (u)

Dirección de viento

Cobertura nubosa (n)

Temperatura ambiente (t)

Características Variables de Superficie:

Albedo de mediodía (r'): Fracción de la radiación que es reflejada por la superficie.

Razón de Bowen (B_0): La proporción del flujo de calor sensible con respecto al flujo de calor de evaporación.

Longitud de superficie (z_0): Altura sobre el suelo en el cual la velocidad horizontal del viento comúnmente es cero.

Otra Información:

Longitud

Latitud

Zona horaria

Radiación solar neta.

Perfil de turbulencia vertical (σ_w)

Perfil de turbulencia lateral (σ_v)

En caso de que haya información no existente para una hora, la hora es considerada como faltante. Una vez procesada la información se transfiere de AERMET a AERMOD por cada hora de los registros meteorológicos (EPA, 2009).

Para el procesamiento de información en AERMAP es necesario un Mapa Digital de Elevaciones (DEM) (x_t, y_t, z_t) y un diseño de la malla receptora. AERMAP utiliza receptores polares, cartesianos, regulares y discretos. Debido a estas características es más sensible al identificar el impacto en un terreno complejo (Latini y col., 2002).

II.6. San Nicolás, Tequisquiapan.

San Nicolás es una comunidad localizada en el Municipio de Tequisquiapan en el estado de Querétaro de Arteaga, sus coordenadas geográficas son 20°29' latitud norte y 99°56' longitud oeste; con una altitud de 1920 metros sobre el nivel del mar (MSNM). La topografía del lugar muestra un corredor natural, donde se encuentran alojadas las comunidades, este corredor es rodeado por el cerro del redentor y el

cerro Xajay con una altitud máxima de 2300 y 2718 MSNM respectivamente. Posee una temperatura promedio anual de 17.6 °C, con una temperatura mínima de -1.0 °C en enero y una máxima de 35.5 °C en mayo, la precipitación anual promedio es de 485 mm (INEGI, 2001). La Figura 3 muestra la localización de las poblaciones y la topografía en el área de estudio.



Figura 3. Esquema topográfico del área de estudio.

San Nicolás tiene una población total de 4,147 habitantes, de los cuales 1,614 habitantes son menores de 15 años. El 63.15% de la población no posee acceso a servicios de seguridad social (IMSS, ISSTE, etc.) y 12.8 % de la población es analfabeta. El 24.4% de la población recibe menos de 2 salarios mínimos mensuales y tiene una jornada superior de 48 horas semanales. Un total de 797 viviendas (15.6%) no poseen agua entubada, 30.6% no posee drenaje, 5.4% no posee energía eléctrica y 1.3% no posee ningún servicio (INAFED, 2005).

En esta zona se localizan 393 hornos ladrilleros, correspondientes al 72.2% del total existentes en el estado de Querétaro. El 24% de la población en estas comunidades se dedica a la actividad ladrillera artesanal (Anaya y col., 2006).

III. HIPÓTESIS

Mediante modelación con el software ISC-AERMOD se puede estimar la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera artesanal en la comunidad de San Nicolás, Tequisquiapan, Querétaro.

IV. OBJETIVOS

IV.1. General

Modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos generados por la industria ladrillera artesanal asentada en la comunidad de San Nicolás, Tequisquiapan, Querétaro, la comunidad ladrillera más importante del estado.

IV.2. Específicos

- Recolectar información meteorológica durante un año en la comunidad de San Nicolás, Tequisquiapan.
- Modelar la dispersión de partículas suspendidas totales, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno utilizando factores de emisión, información meteorológica, información topográfica y la ubicación de las fuentes emisoras.

V. METODOLOGÍA

V.1. Materiales

Dispositivo de posicionamiento global (GPS) Marca Garmin Modelo eTrex Legend, estaciones meteorológicas marca Davis Instruments modelo Weather Monitor II, software WRPlot 5.3 (Lakes Environmental) software ArcView 9.0, Environmental Systems Research Institute (ESRI), software ISC-Aermod View 5.0 (Lakes Environmental Software), MiniTab 15.0, Modelos Digitales de Elevación y cartas Topográficas F14C65 (Municipio de Querétaro), F14C66 (Municipio de El Marqués), F14C67 (Municipio de Tequisquiapan), F14C76 (Municipio de Pedro Escobedo) y F14c77 (Municipio de San Juan del Río), obtenidas del Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI).

V.2. Métodos

V.2.1 Recolección de información meteorológica.

Se instalaron 3 estaciones meteorológicas marca Davis Instruments Modelo Weather Monitor II en la comunidad de San Nicolás, Tequisquiapan, Qro para determinar las condiciones micro-meteorológicas del lugar. Debido a que la comunidad de San Nicolás presenta una forma triangular, se colocó una estación meteorológica en cada vértice de ese triángulo, esto para asegurar e identificar la existencia de microclimas. Las estaciones meteorológicas se instalaron a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo (Petchers, 2002). La ubicación se eligió en lugares libres de árboles, construcciones o estructuras que pudieran causar interferencia, de fácil acceso y con suministro de energía eléctrica para evitar interrupciones en la captura de datos. Las estaciones meteorológicas se calibraron de acuerdo a la dirección del norte magnético, altitud, presión barométrica y temperatura del sitio en donde fueron instaladas. Durante el periodo de estudio se siguió un plan de mantenimiento trimestral, el cual consistió en limpieza, y calibración de parámetros.

Las estaciones cuentan con una memoria con capacidad para guardar registros con un intervalo de 10 minutos por un periodo de 10 días. Al cabo de éste lapso, los datos se descargaron y se usaron para construir una base de datos. La información meteorológica fue recolectada de octubre de 2005 a diciembre de 2006.

La base de datos meteorológica se utilizó para generar las rosas de los vientos usando el software WRPlot 5.3 (Lakes Environmental) y como fuente de información meteorológica para la modelación de dispersión atmosférica mediante AERMOD 5.0 (Lakes Environmental).

V.2.2 Información topográfica

La información topográfica se obtuvo a partir de modelos digitales de elevación mexicano (DEM) y cartas topográficas disponibles en el INEGI. Se utilizaron los DEM y cartas topográficas correspondientes a las zonas F14C65 (Municipio de Querétaro), F14C66 (Municipio de El Marqués), F14C67 (Municipio de Tequisquiapan), F14C76 (Municipio de Pedro Escobedo) y F14C77 (Municipio de San Juan del Río). El DEM se encuentra en formato BIL (Band Interleaved by Line), el cual contiene las coordenadas (x,y,z). Sin embargo AERMOD, no es capaz de interpretar los datos en este formato. Por medio de ArcGIS se obtuvieron las curvas de nivel con una resolución de 5 m, los puntos que contenían información relevante se guardaron en un archivo de texto (x,y,z) y de esta manera pudo ser interpretado por AERMOD. La extensión del área de estudio fue de 20 km² con forma cuadrangular, delimitado al noroeste por las coordenadas 392000, 2274400 y 412000, 2254400 al sureste (NAD27 Z14), donde la comunidad de San Nicolás fue ubicada en el centro del polígono. Posteriormente el archivo de texto con la información topográfica, se procesó por medio de AERMAP (módulo de AERMOD) y se transfirió a AERMOD.

V.2.3 Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión se tomaron del inventario geo-referenciado de la industria ladrillera en el Estado de Querétaro (Anaya y col., 2006). Se consideraron 462 fuentes de emisión incluyendo las localizadas en la comunidad de San Nicolás y las localizadas en el corredor ladrillero San Nicolás-San Juan de Río. Los hornos ladrilleros en la zona de estudio no operan todos simultáneamente y durante nuestras visitas al lugar se observó que únicamente el 4% lo hace. Por ésta razón y para propósitos de modelación se consideró como fuente de emisión un grupo de hornos correspondiente a este porcentaje. Para incluir en la modelación el efecto de la posición geográfica de las fuentes se consideraron 5 grupos de hornos diferentes (escenarios) tomando en cuenta el porcentaje de hornos operantes. Los hornos individuales que se incluyeron en cada grupo fueron seleccionados al azar.

V.2.4 Modelación

La modelación fue realizada para cada grupo de fuentes de emisión. Se modelaron 3 contaminantes criterio (PST, CO y NO_x). Se usaron los factores de emisión reportados en el Inventario Nacional de Emisiones 2005 (ERG y TransEngineering, 2005). Para cada grupo de hornos ladrilleros se realizó una corrida por día (por 365 días) de cada contaminante criterio para estimar el primer máximo por día y el punto geográfico donde ese máximo se registró. Una vez obtenidas las estimaciones se construyó un escenario mixto. El escenario mixto comprende los resultados de los 5 grupos donde únicamente se considero el 1° máximo de cada escenario. Éstos últimos resultados se ordenaron de manera ascendente, obteniendo así los valores del 1° al 5° máximo tomando en consideración la posición geográfica de las fuentes de emisión. Mediante Minitab, se ordenaron las concentraciones y se hicieron histogramas de frecuencia, medidas de tendencia central, tal como mínimo, máximo, media, mediana. Los puntos donde se registraron las concentraciones máximas fueron procesados mediante ArcGIS, de tal manera que se obtuvieron las regiones en donde se tiene una mayor afectación de las emisiones.

AERMOD genera escenarios de dispersión de contaminantes para cada escenario, sin embargo es poco práctico obtener demasiadas Figuras, por lo que solo se eligió la más representativa. Esta Figura fue representada en ArcGIS, de tal manera que mostrara una idea gráfica de la “nube” generada por las emisiones de la industria ladrillera.

VI. RESULTADOS

VI.1. Información meteorológica

Debido a que la dispersión de contaminantes es principalmente afectada por la velocidad del viento y la temperatura, se recolectó información meteorológica de esas variables durante el periodo diciembre 2005 – noviembre 2006. El monitoreo en las estaciones meteorológicas fue hecho en intervalos de 10 minutos. Los datos meteorológicos recolectados fueron ordenados en 8 intervalos de temperatura y 7 intervalos de velocidad de viento.

El Cuadro 2 presenta la distribución de las horas de calmas (velocidades de viento ≤ 0.5 m/s) con respecto a la temperatura ambiental para los meses estudiados. La frecuencia de calmas es importante porque durante la prevalencia de calmas los contaminantes atmosféricos no se dispersan en la atmósfera y su concentración aumenta incrementando también su impacto en receptores susceptibles.

En la región estudiada ocurren periodos de calma en todos los meses y estaciones del año. El porcentaje total de calmas en el año es de 33.6%. En el periodo estudiado, los meses que más frecuencia de calmas presentaron fueron enero (46.2%), noviembre (43.5%), febrero (39.2%) y diciembre (39%). En contraste, los meses de junio (24.9%) y julio (23.6%) presentaron la menor frecuencia de calmas. Con respecto a la temperatura, las mayores frecuencias de calmas se presentaron en los intervalos de 5 a 10 °C (5.2%), 10 a 15°C (10.6%) y 15 a 20 °C (7.7%). Estos porcentajes en conjunto representan el 23.5% del total de horas medidas.

La distribución de las calmas con respecto a la temperatura varía de acuerdo a la estación del año. Durante otoño e invierno, en la estación San Nicolás 1, la mayoría de las calmas ocurre a temperaturas menores a 15°C, pero en estaciones más cálidas, en la misma estación meteorológica, el número de calmas a temperaturas altas se incrementa, sobre todo a temperaturas entre 15 y 30°C.

Cuadro 2. Frecuencia de calmas (velocidad de viento ≤ 0.5 m/s) por intervalo de temperatura en la estación meteorológica San Nicolás 1. Las frecuencias fueron calculadas con respecto al total de horas monitoreadas.

	Temperatura								Total
	<0 °C	0-5 °C	5-10 °C	10-15 °C	15-20 °C	20-25 °C	25-30 °C	>30 °C	
	%								
Dic 05	2.3	11.7	13.2	7.1	2.5	2.1	0	0	39.0
Ene 06	5.5	9.2	10.8	5.5	11.9	2.7	0.6	0	46.2
Feb 06	0.3	5.1	13.1	10.1	4.4	3.1	2.9	0.2	39.2
Mar 06	0	2.8	9.7	10.7	4.7	3.3	3.0	0.3	34.5
Abr 06	0	0.5	5.1	11.4	8.4	3.6	2.9	2.0	33.8
May 06	0	0	0.9	13.7	7.5	3.9	4.5	2.4	32.8
Jun 06	0	0	2.1	9.6	6.8	3.0	2.6	0.7	24.9
Jul 06	0	0	0	10.7	7.2	2.6	2.8	0.4	23.6
Ago 06	0	0	0	11.8	11.0	2.7	2.4	0.2	28.2
Sep 06	0	0	0	10.3	11.8	1.7	3.3	0.5	27.6
Oct 06	0	9.7	2.1	14.8	10.8	3.5	3.9	0.3	35.3
Nov 06	0.8	3.0	8.1	11.1	4.6	2.8	4.1	0.2	43.5
Total	0.8	3.0	5.2	10.6	7.7	2.9	2.7	0.6	33.6

En el periodo estudiado (2005), los meses que presentaron mayor frecuencia de calmas a temperaturas menores a 15 °C fueron el mes de diciembre (34.3%) y enero (31%). Esas calmas a temperaturas menores a 15 °C disminuyen progresivamente a medida que avanza el año y se aproximan los meses mas cálidos de primavera y verano, este es el caso julio el mes con menor cantidad de calmas a temperaturas bajas (10.7%).

El Cuadro 3 presenta información similar, pero recolectada en la estación meteorológica San Nicolás 2.

El total de calmas en el año fue de 27.3%. En esta estación, los meses en donde se presentó la mayor frecuencia de calmas fueron diciembre (43.3%) seguido de octubre (32.7%) y enero (31.5%). Los meses en donde se presentó menor proporción de calmas fueron los meses de julio (21.1%) y marzo (22%). De manera similar, los intervalos donde se presentaron la mayoría de calmas con respecto a la

temperatura fueron de 5 a 10 °C (4.3%), 10 a 15°C (10%) y 15 a 20 °C (7.4%). Estos porcentajes en conjunto representan el 21.7% del total de horas medidas.

Cuadro 3. Frecuencia de calmas (velocidad de viento ≤ 0.5 m/s) por intervalo de temperatura en la estación meteorológica San Nicolás 2. Las frecuencias fueron calculadas con respecto al total de horas monitoreadas.

	Temperatura								Total
	<0 °C	0-5 °C	5-10 °C	10-15 °C	15-20 °C	20-25 °C	25-30 °C	>30 °C	
	%								
Dic 05	1.9	8.3	16.0	9.6	4.9	1.7	0.9	0.1	43.3
Ene 06	4.0	9.0	8.4	5.4	3.1	1.3	0.3	0	31.5
Feb 06	0	3.7	10.0	10.1	3.0	1.1	0.7	0.2	28.9
Mar 06	0	0.4	7.4	9.0	4.1	0.7	0.3	0.1	22
Abr 06	0	0.1	4.2	10.7	8.0	2.1	0.4	0.2	25.7
May 06	0	0	0.4	11.3	8.5	3.2	1.3	0.9	25.6
Jun 06	0	0	1.9	10.1	8.9	2.2	0.5	0.2	23.8
Jul 06	0	0	0	10.2	8.4	2.1	0.3	0.1	21.1
Ago 06	0	0	0	11.0	12.2	1.9	0.5	0.2	25.8
Sep 06	0	0	0	8.7	12.8	1.9	0.8	0.2	24.3
Oct 06	0	0	0	11.1	9.8	3.3	1.8	0.3	26.2
Nov 06	1.6	4.5	6.2	12.9	4.5	2.0	0.8	0.2	32.7
Total	0.6	2.1	4.3	10.0	7.4	2.0	0.7	0.2	27.3

Los meses de otoño – invierno presentaron calmas en un intervalo de menor temperatura, tal es caso de diciembre (35.8%) y enero (26.8%). Al igual que en la estación meteorológica San Nicolás 1, a medida que transcurrió el año; las calmas presentes a temperaturas menores de 15 °C fueron disminuyendo hasta alcanzar un mínimo en septiembre (8.7%). En los meses de primavera – verano la mayoría de las calmas se presentan en los intervalos de mayor temperatura (15 – 30 °C). El mayor porcentaje de calmas se presentaron en septiembre (15.5%) y octubre (15%).

El Cuadro 4 presenta los datos meteorológicos recolectados en la estación meteorológica San Nicolás 3. Esos datos fueron clasificados de la misma manera

que en los Cuadros 2 y 3. Sin embargo, esa estación presentó algunos desperfectos causando la falta de datos meteorológicos para algunos meses. Debido a eso, el Cuadro 4 sólo presenta información hasta agosto 2006.

Cuadro 4. Frecuencia de calmas ($v \leq 0.5$ m/s) por intervalo de temperatura en la estación meteorológica San Nicolás 3. Las frecuencias fueron calculadas con respecto al total de horas monitoreadas.

	Temperatura								Total
	<0 °C	0-5 °C	5-10 °C	10-15 °C	15-20 °C	20-25 °C	25-30 °C	>30 °C	
	%								
Oct 05	0.0	0.6	4.9	9.7	4.3	0.8	0.4	0	20.7
Nov 05	0.5	5.7	12.5	9.8	4.1	2.3	3.3	0.7	39.0
Dic 05	0.9	7.4	14.2	6.4	3.2	2.3	0.9	0	35.2
Ene 06	3.3	10.7	12.4	6.1	3.1	1.8	0.7	0	38.1
Feb 06	0	4.1	11.7	8.2	2.7	1.6	0.8	0	29.3
Mar 06	0	1.5	10.3	8.7	2.4	1.6	0.9	1.2	26.6
Abr 06	0	0	2.6	9.5	5.4	2.0	1.1	0.7	21.2
May 06	0	0	0.8	12.1	6.2	3.1	2.2	0.8	25.1
Jun 06	0	0	1.6	9.7	6.5	2.6	1.2	0.1	21.7
Jul 06	0	0	0	11.6	6.6	2.2	0.8	0.1	21.3
Ago 06	0	0	0	13.7	12.1	4.8	1.5	0.1	32.3
Total	0.3	2.4	5.9	9.8	5.4	2.3	1.3	0.3	27.7

La totalidad de las calmas en el periodo estudiado de 11 meses fue de 27.7%. Los meses que presentan mayor frecuencia de calmas fueron octubre (39%), enero (38.1%) y diciembre (35.2%). Los meses que presentaron menor frecuencia de calmas son abril (21.2%), julio (21.3%) y junio (21.7%). Estos datos son similares a los observados en las otras 2 estaciones meteorológicas lo cual nos indica que, en la región estudiada, la presencia de calmas tiene relación con la temperatura.

Las calmas con temperaturas inferiores a 15 °C se presentaron mayormente en los meses de enero (32.5%), diciembre (28.9%) y octubre (28.5%). Los periodos con mayor calmas en un intervalo de temperatura mayor (15 a 30 °C) fueron los meses de agosto (18.4%) y mayo (11.5%).

Los datos meteorológicos recolectados en las tres estaciones fueron muy similares. Según la información analizada, parece haber una relación entre las calmas y la temperatura ambiente, a medida que la temperatura disminuye la presencia de calmas aumenta. Las enfermedades respiratorias en poblaciones susceptibles se producen generalmente en ambientes con bajas temperaturas, si a esto agregamos la presencia de contaminantes atmosféricos se incrementa el riesgo de contraer enfermedades (Seaton y col., 1995).

Los periodos de calma fueron conjuntados como horas y se graficó su total contra la totalidad de horas mensuales recolectadas por las estaciones meteorológicas. La Figura 4 muestra esta relación para la estación San Nicolás 1.

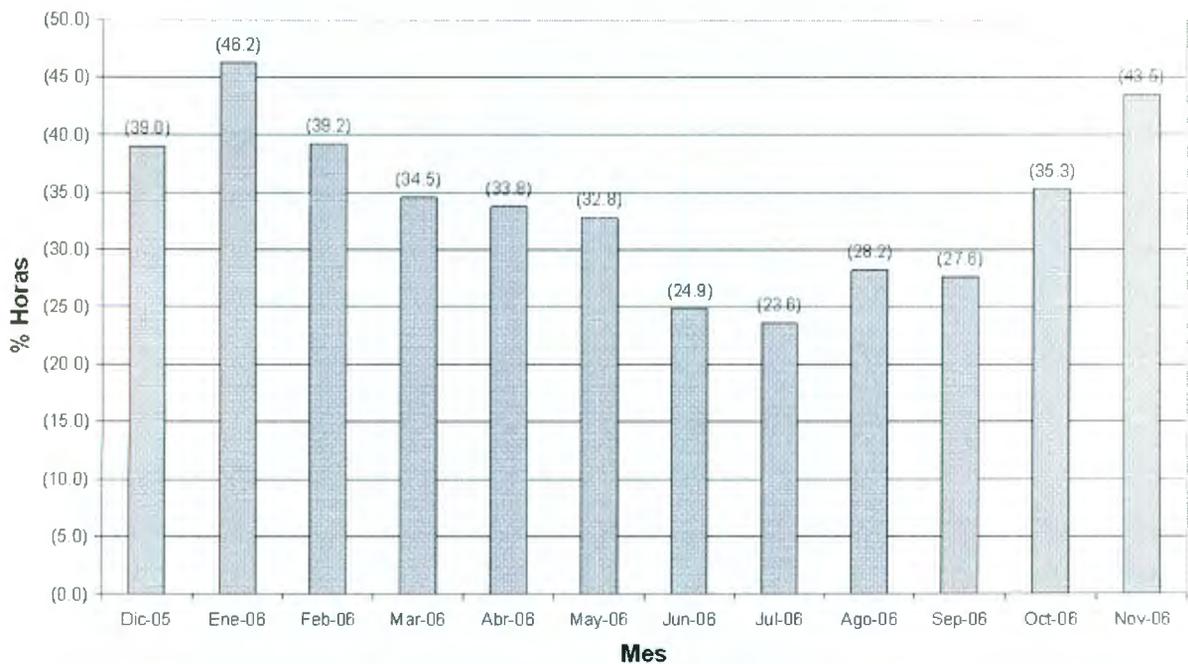


Figura 4. Porcentaje de horas de calma con respecto al total de horas medidas detectadas en la estación meteorológica San Nicolás 1.

Los meses que presentaron mayor porcentaje de calmas fueron los meses de enero (46.2%), noviembre (43.5%) y diciembre (39.0%).

VI.2. Modelación de contaminantes

VI.2.1 Modelación de partículas suspendidas totales (PST)

Se modeló la dispersión de partículas suspendidas totales (PST), monóxido de carbono (CO), y óxidos de nitrógeno (NO_x), usando el software ISC-AERMOD (Cimorelli y col., 2005; Perry y col., 2005). Para la modelación se consideraron las fuentes de emisión existentes en el sitio de estudio, localizadas en las comunidades de San Nicolás, San Pedro Ahuacatlán, Visthá y Bordo Blanco. Las fuentes de emisión se agruparon en 5 grupos con fuentes diferentes para evaluar la influencia de las emisiones producidas por la operación de hornos ladrilleros en diferentes localidades. Los resultados obtenidos de esos 5 escenarios se conjuntaron en un escenario mixto. Para efectos del análisis de datos se realizó la corrida por cada promedio de 24 horas, considerando el primer máximo de cada día; estos valores fueron ordenados de manera ascendente para realizar histogramas de frecuencia. La Figura 5 muestra los histogramas correspondientes para la modelación de PST para los 5 diferentes escenarios (gráficas 1 a 5) y el escenario mixto (gráfica 6).

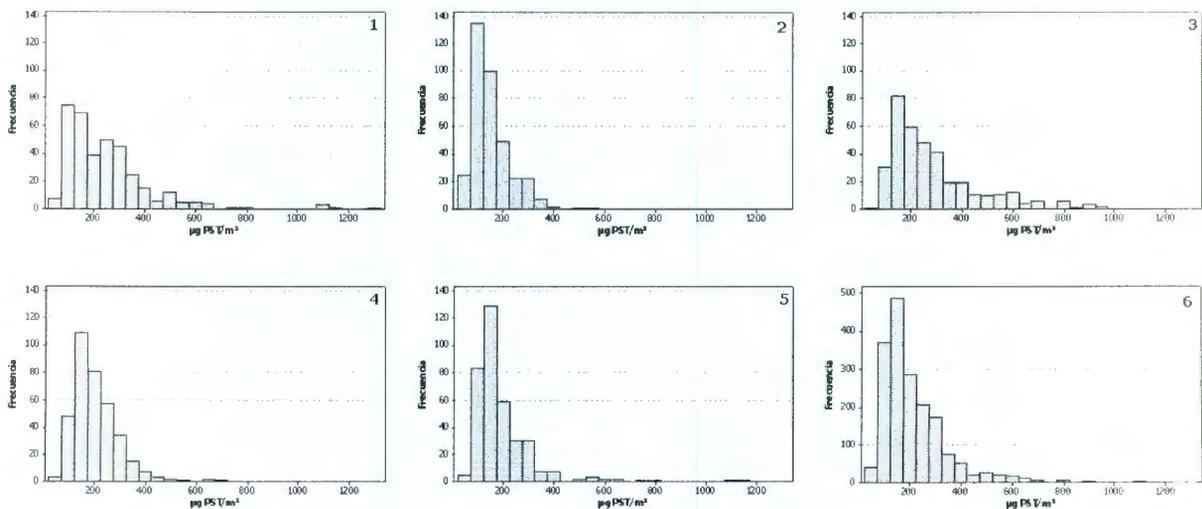


Figura 5.- Histogramas de frecuencia de concentraciones máximas de PST para seis diferentes escenarios de modelación.

Los histogramas muestran una mayor frecuencia de concentraciones máximas de partículas (estimadas por modelación) en el intervalo 75 a 375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$. Debido a eso se analizaron las frecuencias registradas en este intervalo y las frecuencias inferiores a 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ para evaluar la cantidad de días que las concentraciones, en los escenarios, se encontraron por debajo del límite establecido por la NOM-024-SSA-1996, la cual establece un límite permisible de PST de 210 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas.

En el escenario 1 se observaron 303 máximos (83%) dentro del intervalo 75 a 375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ presentando las frecuencias máximas en los intervalos de 75 a 125 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (75.21%) y 125 a 175 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (69.19%). Se observaron 191 máximos (52%) por debajo de 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$. En el caso del escenario 2 se observaron 336 máximos (92%) dentro del intervalo 75 a 375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ con máximos en los intervalos 75 a 125 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (135, 37%) y 125 a 175 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (100, 27%). Se presentaron 309 máximos de PST (85%) con concentraciones inferiores a 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$. El escenario 3 presentó una distribución mas uniforme en las concentraciones mayores a 375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ sin embargo 279 máximos (76%) se encontraron dentro de intervalo 75 a 375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ presentando los máximos en 125 a 175 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (82, 22%) y 175 a 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (59, 16%). Este escenario presentó 172 observaciones (47%) por debajo de 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$. El escenario 4 nuevamente presentó una distribución hacia concentraciones menores con 345 máximos en el intervalo 75-375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (95%), presentando frecuencias máximas en los intervalos 125 a 175 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (109, 30%) y 175 a 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (81,22%). Este escenario presentó 241 (66%) máximos por debajo de 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$. El escenario 5 presentó 339 máximos (93%) en el intervalo 75-375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ con frecuencias máximas en los intervalos 75 a 125 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (83, 23%) y 125 a 175 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ (129, 35%) y presentó 276 observaciones (76%) por debajo de los 225 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El escenario 6 (escenario mixto) representa los cinco escenarios anteriores integrados con el fin de simular un escenario compuesto. Este escenario presentó 1189 máximos (65%) en el intervalo 75 -375 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$ y 1602 (88%) de observaciones en el intervalo inferior a 225 $\mu\text{g PST}/\text{m}^3$.

El Cuadro 5 presenta un resumen de la información correspondiente a las concentraciones de PST obtenidas mediante modelación.

Cuadro 5.- Máximos, mínimos y medidas de tendencia central para las concentraciones de PST en 5 diferentes escenarios de modelación.

Escenario	Mínimo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mediana $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	57	1279	249	212
2	48	550	154	133
3	64	942	290	230
4	68	696	206	188
5	61	1142	194	160

Las concentraciones obtenidas mediante modelación muestran una influencia en la dispersión de contaminantes en función del lugar de emisión. En algunos escenarios se obtuvieron concentraciones máximas muy elevadas, tal como fue el caso en el escenario 1 ($1,279 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$) y escenario 5 ($1,142 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$). En contraste, el escenario 2 y 4 presentaron concentraciones máximas menores (550 y $696 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$) y el escenario 3 fue moderado ($942 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$). Los valores medios de los escenarios también presentan diferencias, donde el valor superior se presenta en el escenario 1 ($245 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$) y el valor mínimo en el escenario 2 ($154 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$).

Los histogramas de frecuencia no muestran una distribución normal y existen datos extremos que afectan a la media; debido a esto y para efectos de análisis de resultados se optó por considerar la mediana. En los valores de la mediana se observó el valor máximo en el escenario 3 ($230 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$), seguido del escenario 1 ($212 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$) y el valor mínimo en el escenario 2 ($133 \mu\text{g PST}/\text{m}^3$). En este caso, y tomando en cuenta que la mediana es el punto en donde la mitad de los valores se encuentran por debajo de ella, podemos observar que en la mayoría de

los escenarios, exceptuando el escenario 3, la mitad de los días se encuentran por debajo de lo que se marca en la NOM-025-SSA1-1993.

Tomando en cuenta los diferentes escenarios de modelación, se ordenaron los valores estimados de PST para cada día modelado en forma descendente y se calculó la media para obtener los valores del 1° máximo al 5° máximo. Esos valores se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Concentraciones medias de PST correspondientes al primero y hasta el quinto máximo en un escenario de modelación mixto.

Escenario	1 Max $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2 Max $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3 Max $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4 Max $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 Max $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mediana $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mixto	367	252	196	160	120	156

Donde el 1° máximo es de 367 μg PST/ m^3 . El 2° Máximo fue de 252 μg PST/ m^3 y se obtuvo una mediana de 156 μg PST/ m^3 .

Se contabilizaron los puntos en los cuales se presentó el primer máximo de cada corrida. Esos puntos se ubicaron en las coordenadas geográficas por medio de ArcGis para establecer los puntos críticos y la frecuencia que presentaron.

La Figura 6 muestra las coordenadas y las frecuencias obtenidas y muestra la localización de celdas con concentraciones máximas de PSTs en el área de estudio. La zona correspondiente a la comunidad de San Nicolás presentó 42 celdas con máximos (40%), de los cuales destacan cuatro celdas (1%) donde se presentó una frecuencia de máximos mayor (en el intervalo 31 – 60) y cuatro celdas (1%) con una frecuencia de máximos mayor a 61.



Figura 6. Localización de celdas geográficas (200 x 200 m) en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río que presentaron máximos de PST. Los círculos y banderas indican la localización de los máximos y los números la frecuencia de máximos por celda.

Otra zona que presentó sitios críticos fué la zona comprendida entre las poblaciones de Vista y San Pedro Ahuacatlán donde se presentaron 33 celdas con máximos de concentraciones de PSTs (32%), cuatro (1%) con frecuencia mayor a 31 y una (0.1%) con frecuencia mayor a 61.

La tercera zona con máximas frecuencias fue la correspondiente a la comunidad de Bordo Blanco donde se encontraron 9 celdas con frecuencias de máximos menores a 30 (9%).

Se observó que las condiciones meteorológicas eran cambiantes día con día y esto influye en la velocidad y distancia de la dispersión. Sin embargo, para evaluar el riesgo asociado a las emisiones de hornos ladrilleros es de mayor importancia analizar los días que presentaron una menor dispersión, ya que es en esos casos cuando las concentraciones de los contaminantes alcanzan sus puntos más críticos.

La Figura 7 es representativa del primer máximo obtenido para PST. muestra la manera en que la topografía influye en la dirección de los vientos y por ende en la dispersión de contaminantes. Dado que la comunidad de San Nicolás se encuentra rodeada por 2 elevaciones se forma un corredor en el que los contaminantes atmosféricos son arrastrados hacia las comunidades adyacentes afectando un radio aproximado de 10 km. La modelación mostró que poblaciones con un gran número de habitantes son afectadas por la emisión de contaminantes producidos por la industria ladrillera artesanal. En ese escenario se observó que zonas urbanas cercanas a los puntos de emisión tal como es el caso de San Nicolás, San Pedro Ahuacatlán y Visthá presentaron concentraciones de PST que superan los valores máximos establecidos en la NOM-025-SSA1-1993.

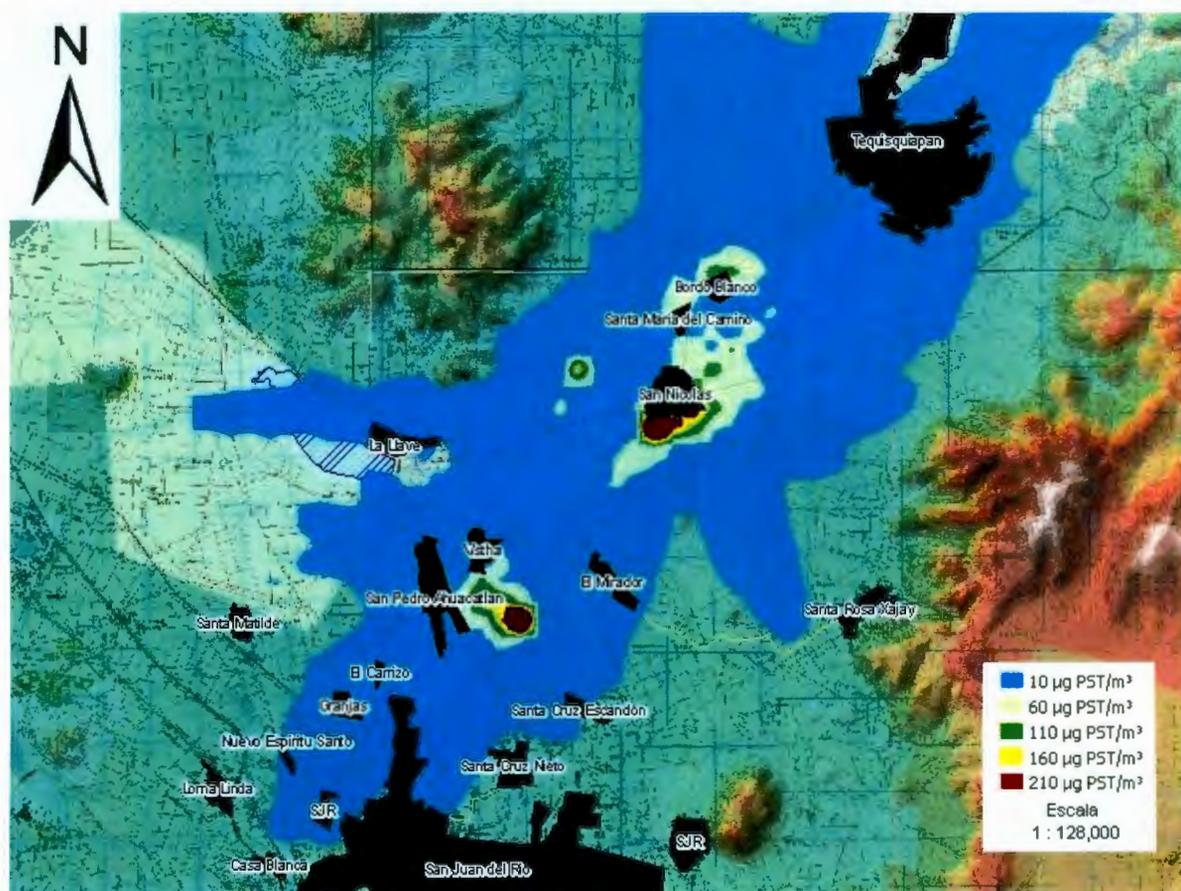


Figura 7. Dispersión representativa de PST en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río. La escala de colores indica niveles de concentración.

VI.2.2 Modelación de monóxido de carbono (CO)

Para la modelación de monóxido de carbono se utilizó la misma metodología usada en la modelación para partículas suspendidas totales. Las corridas se realizaron por promedios de 8 horas, ya que este es el promedio marcado por la NOM-021-SSA1-1993. La Figura 8 muestra los histogramas para los 5 escenarios (gráficas 1 a 5) y el escenario mixto (gráfica 6).

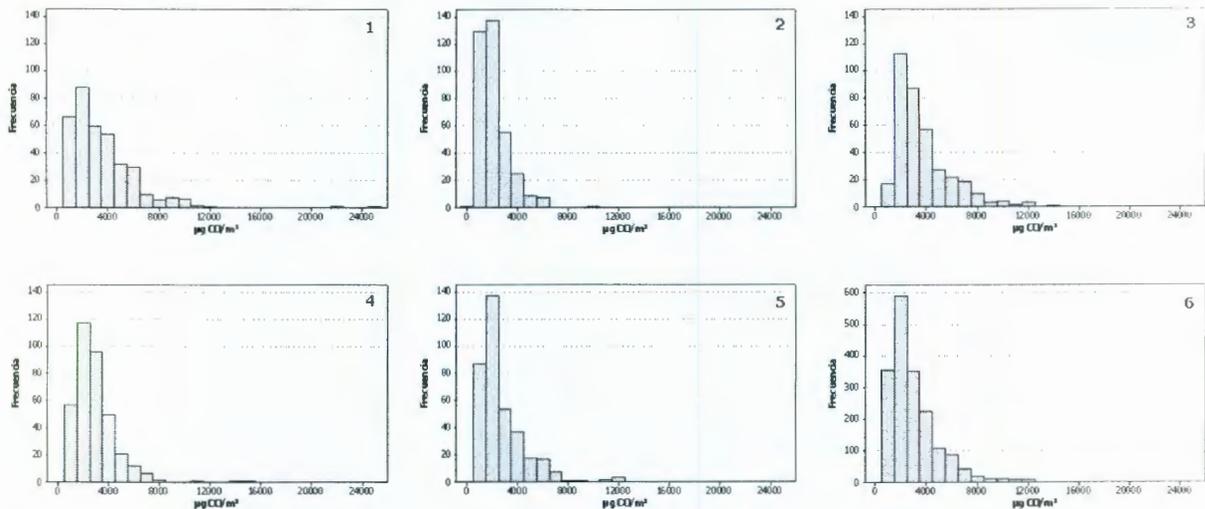


Figura 8.- Histogramas de frecuencia de concentraciones máximas de CO para seis diferentes escenarios de modelación.

El escenario 1 muestra una distribución de 267 máximos (73%) en el intervalo de 0 – 4,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$, 96 máximos (26%) en el intervalo 4,000 – 12,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$, únicamente se presentan dos eventos con concentraciones superiores a 12,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$. El escenario 2 presentó 347 máximos (95%) dentro del intervalo $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ y 18 máximos (5%) en el intervalo de 4,000 – 12,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ en este escenario no se presentaron eventos que superaran el límite establecido. El escenario 3 presentó 273 máximos (74.8%) en el intervalo 0 – 4,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ y 91 máximos (24.9%) en el intervalo 4,000 – 12,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$, únicamente se presentó una concentración máxima superior al límite establecido. El escenario 4 presentó 320 máximos (87.7%) en el intervalo 0 – 4,000 y 43 máximos (13.7%) en el intervalo 4,000 – 12,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ con 2 eventos superiores a 12,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$. El escenario 5 presentó 315 máximos (86.3%) por debajo de los 4,000 $\mu\text{g CO}/\text{m}^3$ y 50

(13.7%) máximos en el intervalo 4,000 – 12,000 $\mu\text{g CO/m}^3$. No se observaron concentraciones superiores a los 12,000 $\mu\text{g CO/m}^3$.

Los 5 escenarios anteriores se conformaron en un escenario mixto (gráfica 6). Las observaciones presentadas en este escenario fueron 1530 (83.8%) máximos dentro del intervalo 0 – 4,000 $\mu\text{g CO/m}^3$ y 298 máximos (16%) dentro del intervalo 4,000 – 12,000 $\mu\text{g CO/m}^3$. En total se observaron 5 eventos con concentraciones superiores a los 12,000 $\mu\text{g CO/m}^3$.

De manera similar a la modelación para partículas suspendidas totales los histogramas no muestran una distribución normal, sin embargo la distribución se presenta dentro de un intervalo 0 – 12,000 $\mu\text{g CO/m}^3$ y el 99.7% de las concentraciones son inferiores a 12,595 $\mu\text{g CO/m}^3$, el cual es el límite establecido por la NOM-021-SSA1-1993 como medida de protección a la población.

El Cuadro 7 presenta el resumen de las concentraciones para monóxido de carbono obtenidas mediante la modelación.

Cuadro 7.- Máximos, mínimos y medidas de tendencia central para las concentraciones de CO en 5 diferentes escenarios de modelación.

Escenario	Mínimo $\mu\text{g/m}^3$	Máximo $\mu\text{g/m}^3$	Media $\mu\text{g/m}^3$	Mediana $\mu\text{g/m}^3$
1	649	25478	3588	2978
2	327	9803	2109	1772
3	1058	14050	3692	3117
4	803	14918	2909	2553
5	709	12419	2727	2179

En las concentraciones mínimas existen diferencias entre los valores de los diferentes escenarios. Tal como es el caso del escenario 2 (327 $\mu\text{g CO/m}^3$) y el escenario 3 (1,058 $\mu\text{g CO/m}^3$). En lo concerniente a las concentraciones máximas

también hay una diferencia marcada entre el escenario 2 (9,803 $\mu\text{g CO/m}^3$) y el escenario 1 (25,478 $\mu\text{g CO/m}^3$). Las medias de los escenarios se encuentran en un intervalo estrecho comprendido entre 2,100 y 3,700 $\mu\text{g CO/m}^3$. Las medianas de los datos de los escenarios se encuentran con una dispersión mayor de entre un intervalo de 1,700 y 3,200 $\mu\text{g CO/m}^3$. Sin embargo como se observó en los histogramas de la Figura 8, la distribución de las concentraciones es bastante homogénea y el 83.8% se encuentran dentro de el intervalo 0 – 4,000 $\mu\text{g CO/m}^3$.

El cuadro 8 muestra las concentraciones de monóxido de carbono estimadas en un escenario mixto.

Cuadro 8. Concentraciones medias de CO correspondientes al primero y hasta el quinto máximo en un escenario de modelación mixto.

Escenario	1 Max $\mu\text{g/m}^3$	2 Max $\mu\text{g/m}^3$	3 Max $\mu\text{g/m}^3$	4 Max $\mu\text{g/m}^3$	5 Max $\mu\text{g/m}^3$	Mediana $\mu\text{g/m}^3$
Mixto	4986	3528	2738	2215	1559	2091

El escenario mixto se conformó de igual manera que para PST, el primer máximo fue de 4,986 $\mu\text{g CO/m}^3$ y el segundo máximo fue de 3,528 $\mu\text{g CO/m}^3$ con una mediana de 2,091 $\mu\text{g CO/m}^3$.

En el caso de monóxido de carbono no se observó influencia de las concentraciones en función de la posición de las fuentes de emisión.

Las coordenadas geográficas en donde se presentaron las concentraciones máximas obtenidas por la modelación se representaron en el mapa por medio de ArcGIS (Figura 9).



Figura 9. Localización de celdas geográficas (200 x 200 m) en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río que presentaron máximos de CO. Los círculos y banderas indican la localización de los máximos y los números la frecuencia de máximos por celda.

La Figura 9 muestra una distribución geográfica muy similar a lo sucedido en caso de PST, existen algunas zonas geográficas nuevas con frecuencias inferiores a 30. Sin embargo las zonas geográficas afectadas con mayor frecuencia se localizan en el mismo lugar que para PST. Tal es el caso de las zonas localizadas en San Nicolás con 33 celdas (24.6%) de las cuales 3 ubicaciones (2.3%) con frecuencias mayores a 61, 3 ubicaciones (2.3%) con frecuencias en el intervalo 31 – 60. San Pedro Ahuacatlán con 23 ubicaciones (17%) y 4 celdas (3%) con frecuencia 31 – 60 y una con una frecuencia mayor a 61 (0.8%) y Bordo Blanco con 14 celdas (10.4%) con frecuencias menores a 30. La celda (399200,2260600) es en donde se registro la mayor frecuencia de máximos (6.4%).

La Figura 10 representa la modelación del primer máximo obtenido para monóxido de carbono y muestra que la dispersión de monóxido de carbono se lleva a cabo de manera eficiente, sin embargo las zonas mas afectadas son aquellas que se

encuentran cercanas a las poblaciones con importantes centros ladrilleros, como es el caso de San Nicolás, San Pedro Ahuacatlán, Visthá y Bordo Blanco.

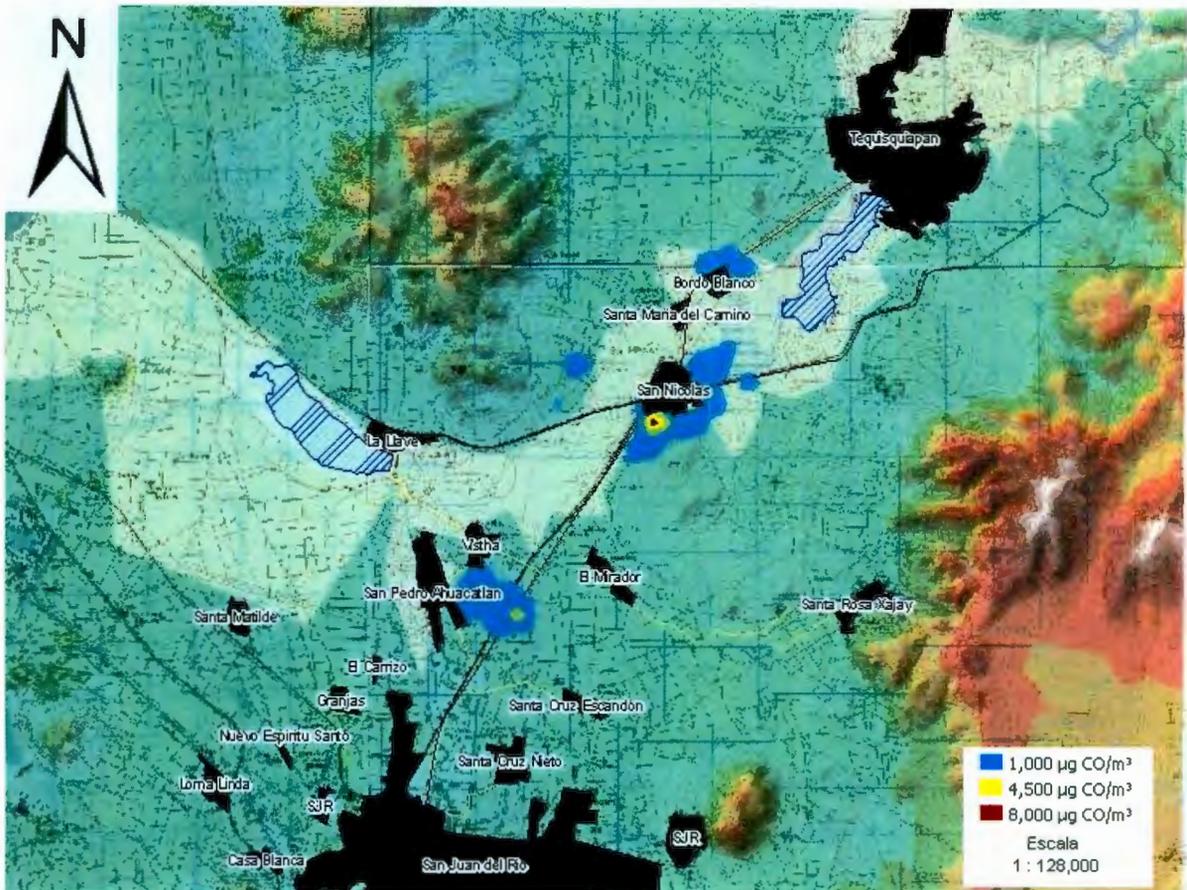


Figura 10. Dispersión representativa de CO en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río. La escala de colores indica niveles de concentración.

VI.2.3 Modelación de óxidos de nitrógeno (NO_x)

Las concentraciones máximas obtenidas mediante modelación se ordenaron en histogramas de frecuencias. Estos se muestran en la Figura 11.

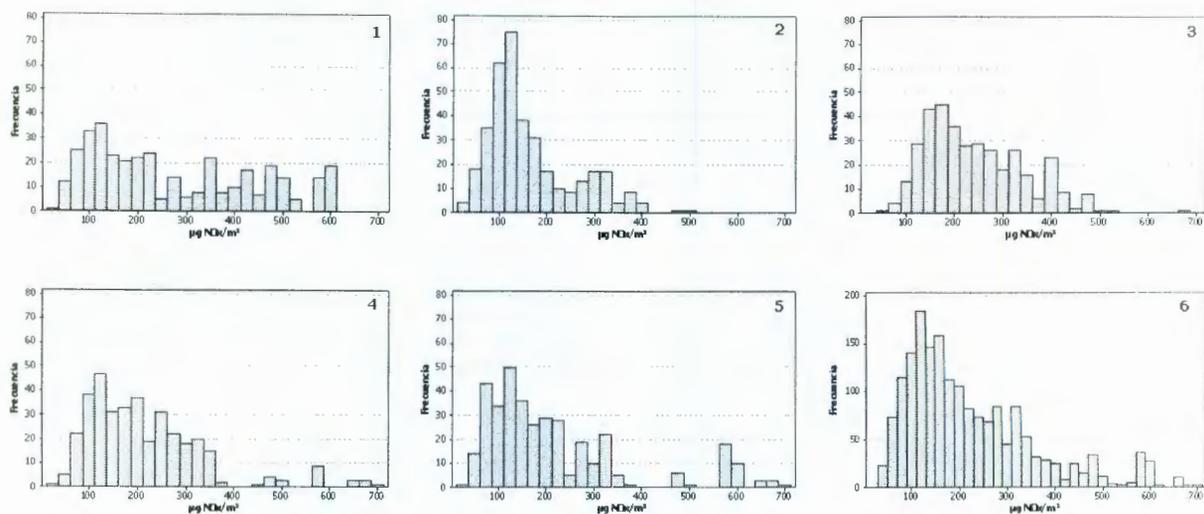


Figura 11.- Histogramas de frecuencia de concentraciones máximas de NO_x para seis diferentes escenarios de modelación.

El escenario 1 muestra una distribución uniforme de los valores. Se observaron 173 máximos (47.4%) con una concentración comprendida entre 0 – 200 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ y 97 máximos (26.6%) en el intervalo 200 - 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$. 95 máximos (26%) superaron el valor límite de 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$. El escenario 2 mostró 280 máximos (76.7%) en el intervalo 0 – 200 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, y 83 máximos (23.7%) en el intervalo de 200 – 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, únicamente se presentaron 2 observaciones por arriba de los 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$. El escenario 3 presentó 171 observaciones (46.8%) en el intervalo 0 – 200 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, 172 observaciones (47%) en el intervalo 200 - 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ y se presentaron 22 observaciones (6%) por encima de 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$. El escenario 4 presentó 214 observaciones (58.6%) por debajo de los 200 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, 127 observaciones (34.8%) en el intervalo 200 – 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ y 24 observaciones (6.6%) por encima de los 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$. El escenario 5 presentó 233 observaciones (63.8%) por debajo de los 200 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, 90 observaciones (24.7%) en el intervalo 200 – 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ y 42 observaciones (11.5%) por arriba del límite de 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$,

En el escenario 6 ó mixto presenta 1060 observaciones (58%) en el intervalo de 0 – 200 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, 579 observaciones (31.7%) en el intervalo de 200 – 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, y 186 observaciones por encima de los 400 $\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$.

Los histogramas no muestran una distribución normal y los escenarios muestran valores por encima de $395 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$, el 90% de los valores se encuentran distribuidos en un intervalo de $0 - 395 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ el cual es el límite máximo marcado por la NOM-023-SSA1-1993.

El Cuadro 9 presenta el resumen de las concentraciones obtenidas para la modelación de óxidos de nitrógeno.

Cuadro 9.- Máximos, mínimos y medidas de tendencia central para las concentraciones de NO_x en 5 diferentes escenarios de modelación.

Escenario	Mínimo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mediana $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	34	611	169	225
2	34	507	92	131
3	39	677	100	224
4	37	696	124	189
5	28	696	155	166

A diferencia de la modelación para partículas suspendidas totales y monóxido de carbono los valores máximos y mínimos en los 5 escenarios se mostraron con una mayor homogeneidad. Respecto a los valores mínimos no se muestran diferencias tan significativas en el escenario 5 ($28 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$) y el escenario 3 ($39 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$), esto mismo sucedió en los valores máximos en el escenario 2 ($507 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$) y escenario 4 y 5 ($696 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$). Respecto a las medias y las medianas si hay una mayor diferencia tal como es el caso en las medias del escenario 2 ($92 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$) y escenario 1 ($169 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$). En los casos de las medianas también se observa una diferencia significativa entre el escenario 2 ($131 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$) y el escenario 1 ($225 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$). La información presentada en el Figura 10 y el Cuadro 9 nos

revelan una influencia en la dispersión en función de la posición de las fuentes de emisión.

El Cuadro 10 nos muestra la información conjunta y organizada de los 5 escenarios de modelación.

Cuadro 10. Concentraciones medias de NO_x correspondientes al primero y hasta el quinto máximo en un escenario de modelación mixto.

Escenario	1 Max µg/m ³	2 Max µg/m ³	3 Max µg/m ³	4 Max µg/m ³	5 Max µg/m ³	Mediana µg/m ³
Mixto	360	275	204	159	114	159

Se obtuvo el 1° máximo del escenario con un valor de 360 µg NO_x/m³ y 2° máximo 275 µg NO_x/m³, la mediana correspondió a 159 µg NO_x/m³. Estos valores no se encuentran por encima del límite marcado por la NOM-023-SSA1-1993.



Figura 12. Localización de celdas geográficas (200 x 200 m) en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río que presentaron máximos de NO_x. Los círculos y banderitas indican la localización de los máximos y los números la frecuencia de máximos por celda.

La Figura 12 muestra las celdas donde se contabilizaron la mayor frecuencia de puntos máximos para óxidos de nitrógeno obtenidos mediante modelación.

La distribución de los valores máximos ocurre de manera similar a la modelación para partículas suspendidas totales y monóxido de carbono. Esto es debido a que las velocidades y direcciones del viento usualmente siguen el mismo patrón al ser topográficamente un corredor rodeado de 2 elevaciones montañosas. Las zonas mas afectadas son la de San Nicolás con un correspondiente a 38 ubicaciones (32.8%) donde se destacan 5 celdas (4%) con frecuencias mayores a 61, San Pedro Ahuacatlán y Visthá con 28 ubicaciones (24%) y tres ubicaciones (2.6%) con frecuencias mayores a 31 y una (1%) con frecuencia mayor a 61 y Bordo Blanco con 11 ubicaciones (9.5%)

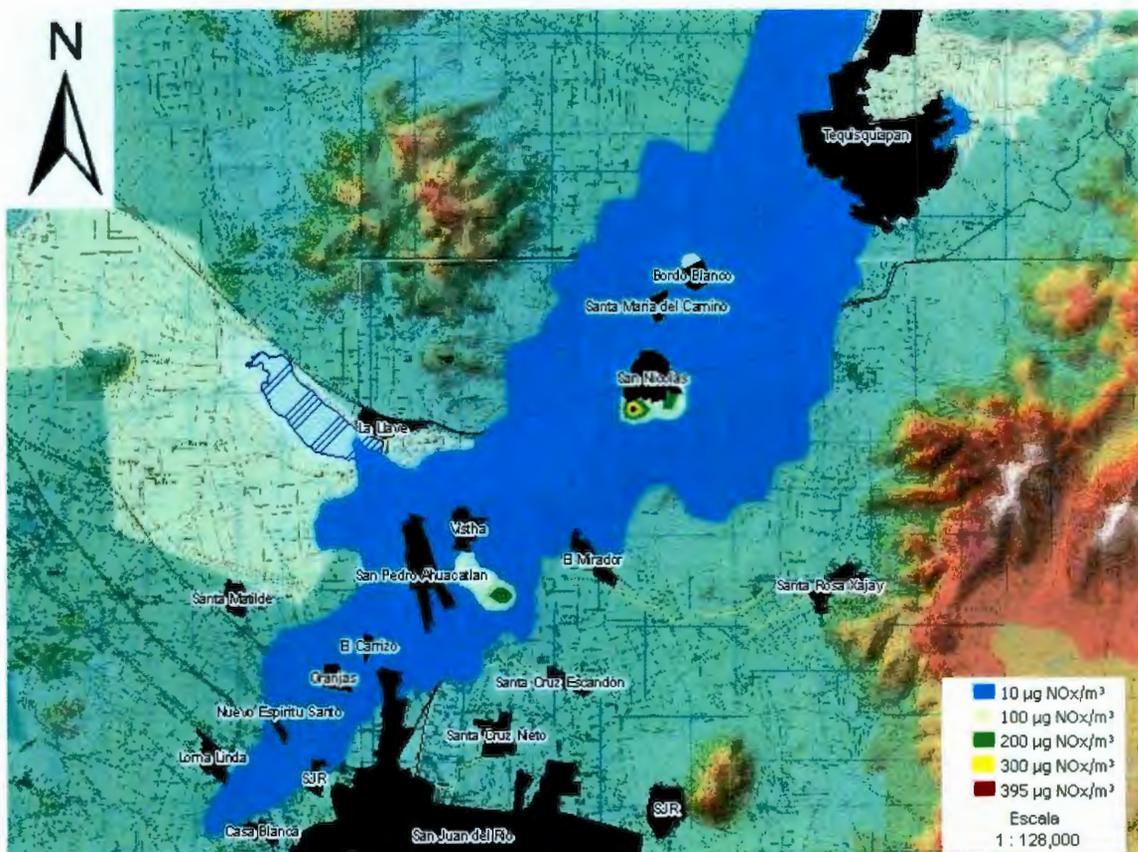


Figura 13. Dispersión representativa de NO_x en el corredor ladrillero Tequisquiapan – San Juan del Río. La escala de colores indica niveles de concentración.

La Figura 13 es representativa del primer máximo obtenido para óxidos de nitrógeno y muestra que la dispersión se lleva a cabo a través de todo el corredor ladrillero, afectando las comunidades aledañas, las concentraciones obtenidas por la modelación no superan el límite máximo permitido. Sin embargo, la presencia de NO_x genera contaminantes secundarios tal como ozono el cual no fue evaluado en este trabajo.

VII. DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio fue estimar las concentraciones y la dispersión de los contaminantes atmosféricos PST, CO y NO_x, generados por la industria ladrillera artesanal mas importante del Estado de Querétaro, por la cantidad de hornos ladrilleros establecidos, localizando las zonas geográficas donde se estima se presentan las concentraciones mas altas. De tal manera que en estudios posteriores esta información sirva para llevar a cabo un estudio mas minucioso acerca de las concentraciones reales que se presentan en la zona por medio de muestreos. Un estudio posterior puede ser monitoreo atmosférico integrado en donde se combinen las estimaciones obtenidas mediante modelación y una comparativa con mediciones atmosféricas. Este tipo de monitoreo integrado forma un papel central en la evaluación de la calidad del aire y políticas de control atmosférico (Hertel y col., 2007).

Se realizó la modelación de 3 contaminantes criterio. Estas estimaciones pueden ser subestimadas, ya sea las concentraciones también son afectadas por la presencia de fuentes naturales como tolveneras, incendios agrícolas o debido a otras fuentes de contaminantes como es el caso de la zona de estudio que puede verse afectada por fuentes móviles debido a la cercanía de la autopista San Juan del Río – Tequisquiapan. También es importante resaltar que la generación de contaminantes está en función del combustible usado, el cual generalmente varía de acuerdo a la disponibilidad. Principalmente la topografía del lugar determina la dispersión de los contaminantes; sin embargo las condiciones meteorológicas también participan en el transporte de los contaminantes y los resultados muestran que éstas pueden variar en función de las estaciones del año.

Las estimaciones basadas en los factores de emisión sugieren que en todos los casos los límites máximos permitidos por la normatividad aplicable fueron incumplidos. Es importante señalar que la normatividad es principalmente para el

control de la contaminación en zonas urbanas y conurbadas, lo cual al hablar de una zona rural como es en este caso nos coloca en una posición de atención.

La generación de los contaminantes producto de la industria ladrillera artesanal no solo se limita a la contaminación atmosférica. Contaminantes como hidrocarburos policíclicos armáticos y bifenilos policlorados se depositan y pasan a otros compartimientos ambientales, tal como el suelo o agua, en donde son absorbidos por invertebrados y posteriormente ingresan a la cadena trófica. (Straub y col., 2007).

El problema acerca de la contaminación atmosférica producto de la industria ladrillera artesanal en la comunidad de San Nicolás Tequisquiapan no es una situación nueva, al paso del tiempo se ha buscado regularla por el gobierno estatal. Sin embargo esto no ha podido llevarse a cabo de una manera exitosa debido a la falta de comunicación, capacitación y de inversión en infraestructura para disminuir la generación de contaminantes mediante nuevas tecnologías o acceso a combustibles mas limpios.

VIII. CONCLUSIONES

- La modelación mediante AERMOD es una herramienta útil para describir los procesos de dispersión atmosférica.
- La industria ladrillera artesanal es una actividad económica importante en la comunidad de San Nicolás Tequisquiapan que impacta en la contaminación atmosférica de la región.
- Las concentraciones y dispersión de los contaminantes atmosféricos es dependiente de diversos factores tales como el tipo de combustible empleado y las condiciones meteorológicas y topográficas del sitio.
- La generación de contaminantes en la comunidad de San Nicolás Tequisquiapan no cumple con la normatividad aplicable.
- Las 3 zonas donde se presentan las concentraciones más altas de contaminantes atmosféricos son ubicadas en sitios poblados cercanos a la fuentes de emisión.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Anaya A. A.L. 2006.** Inventario Geo-referenciado de la industria ladrillera en el estado de Querétaro y Efecto en Fauna Nativa. Santiago de Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico Ambiental. 45-46, 86
- ATSDR.** Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **1992.** Toxicological profile for 1,3 Butadiene. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- ATSDR.** Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **1999.** Toxicological profile for Sulfur Dioxide and Sulfur Trioxide. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- ATSDR.** Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **2006.** Toxicological profile for Vinyl Chloride. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- ATSDR.** Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **2006.** Toxicological profile for Dichlorobenzenes. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Avila, L, Bruce C., , Chavez E., Lara A., y Marquez R. 1999.** "A Sustainable Solution to the Air Pollution Problem Caused by Low-Technology Brick Kilns"; Unpublished report. New Mexico State University, Las Cruces.
- Beckett, William. 1991.** "Ozone, Air Pollution And Respiratory Health"; The Yale Journal of Biology and Medicine; Vol. 64: 167-175.
- Blum, O., 2006.** Long-term monitoring of tropospheric ozone in Kyiv, Ukraine: Formation, temporal patterns and potential adverse effects. *Ecotoxicology, Ecological Risk Assessment and Multiple Stressors*, 337-334.
- Casselli M., 2000.** La contaminación atmosférica. Causas y Fuentes. 6° edición. Siglo XXI editores. México.
- Cimorelli A., Perry S., Venkatram A., Weil J., Paine R., Wilson R., Lee R., Peters W., Brode., 2005.** AERMOD: A dispersion model for industrial source applications

- Part I: General Model formulation and boundary layer characterization. Journal of Applied Meteorology. Vol 44: 682, 693.
- CIPAS. 2002** Consorcio de Investigación y Política Ambiental del Suroeste. <http://www.scerp.org/docs/berr2.html>
- Choudhary G., Hansen H., 1998.** Human Health perspective of environmental exposure to hydrazines. Chemosphere Vol 37: 5801-843.
- EPA.** United States environmental protection agency. **2004**; AERMOD: Description of Model Formulation EPA-454/R-03-004.
- EPA.** United States environmental protection agency. **2009**; AERMOD implementation Guide.
- EPA.** United States environmental protection agency. **2009.** Green Book Criteria Pollutants www.epa.gov/oar/oaqps/greenbk/o3co.html
- ERG.** Eastern Research Group. TransEngineering. **2005.** Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999: 24.
- INAFED. 2005.** Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Sistema Nacional de Información municipal www.inafed.gob.mx/wb/ELOCAL/ELOC_SNIM.
- Hernández P. 2006.** Las ladrilleras necesitan nuevos humos. Gaceta Universitaria. UNAM .Vol. 425: 18-19.
- Hertel O., Ellermann T., Palmgren F., Berkowicz R., Lofstrom P, Frohn L. M., Geels C., Ambelas C., Brandt J., Christensen J., Kemp K. and Ketzel M. 2007.** Integrated air-quality monitoring – combined use of measurements and models in monitoring programmes. Environmental Chemistry, Vol. 4: 65-74.
- INEGI. 2001.** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información. www.inegi.org.mx.
- Keys, A. 1970.** Coronary heart disease in seven countries, Editorial American Heart Association Monograph No. 29; The American Heart Association: New York.
- Latini G, Cocci G. Passerini G. 2002.** The optimal choice of Aermom Input Data in Complex Areas. Air Pollution Modeling and It's Application XV. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 513-514.

- McKee D., 1994.** Tropospheric Ozone: Human Health and Agricultural Impact. Lewis Publishers, 175-177.
- Marcer G., Gemignani C. Bernardino L., Giuffreda F. Da Dalt L, Mastrangelo G, 2000.** The effects of air pollution on children. *Aerobiologia*: Vol. 16: 35-37.
- Merker G., Schwarz C., Stiesch G., Otto F. 2006.** Simulating combustion and pollutant formation for engine-development. 1° Ed, Springer Berlin Heidelberg.
- Melnick R., James H., Bolly C., Miller R., 1990.** Carcinogenicity of 1,3 butadiene in C57BL/6 x C3HF1 Mice at low exposure concentrations. *Cancer research*. Vol 50 6592-6599.
- Oliver B., Nicol K. 1982.** Chlorobenzenes in sediments, water and selected fish from Lakes Superior, Huron, Erie and Ontario. *Environmental Science and Technology*. Vol 16 8:352-536.
- Olson L.W., Boison K., 2005.** Health Impact and control of Particle Matter.
- Perry S., Cimorelli A., Venkatram A., Weil J., Paine R., Wilson R., Lee R., Peters W., Brode., 2005.** AERMOD: A dispersion model for industrial source applications Part II: Model performance against 17 Field Study Databases. *Journal of Applied Meteorology*. Vol 44: 694, 708.
- Petchers, N 2002.** Combined heating, cooling & power handbook: Technologies and applications. 1era. Ed. Fairmont Press EUA: 295.
- Riediker M., Cascio Wayne E., Griggs Thomas R., Herbst Margaret C., Bromberg Philip A., Neas Lucas, Williams Ronald, and Devlin Robert. 2004.** Particulate Matter Exposure in Cars Is Associated with Cardiovascular Effects in Healthy Young Men, *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, Vol. 169: 2004; 934:940.
- Reid N., Amman M., Hales J. 2003.** Air Quality Modelling For Policy Development. Environmental Monitoring & Reporting Branch. Ontario Ministry of the Environment. Canada. 161-167.
- Romo, Ma de Lourdes, Córdoba Gustavo, Cervera Luis. 2004.** Estudio Urbano-Ambiental de las Ladrilleras en el Municipio de Juarez. *Estudios Fronterizos*; Vol 5, Número 9. 16-18.

- Seaton A., MacNee W., Donaldson K., Godden D. 1995.** Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet*. 345; 176:178
- Schwartz, J. 1992.** Air pollution and the duration of acute respiratory symptoms. *Archives Environmental Health*. Vol. 47: 116.
- Schwartz, J. 2000.** Assessing confounding, effect modification, and thresholds in the association between ambient particles and daily deaths. *Environmental Health Perspectives*. Volumen 18: 106 563:568.
- Servos, M. R., Munkittrick, K. R., Carey, J. H., Van der, Kraak G. J. 1996.** *Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*; Eds.; St. Lucie Press: Delray Beach, FL.
- SEMARNAT. 2005.** Norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos. <http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>
- SMA, 2009.** Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. <http://www.sma.df.gob.mx/>
- SSA. 2005.** Secretaria de Salud. www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html
- Straub, C.L., Maul J. D., Halbrook, R.S., Spears, B., Lydy, M.J. 2007.** Trophic Transfer of Polychlorinated Biphenyls in Great Blue Heron (*Ardea herodias*) at Crab Orchard National Wildlife Refuge, Illinois, United States. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 52, 572-579.
- Valencia A. 2006.** Impacto Ambiental de la producción ladrillera artesanal. Santiago de Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico Ambiental. En Proceso.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química

OFIC-ACAD-10/281

Centro Universitario, 25 de mayo de 2010.

H. CONSEJO ACADÉMICO
FACULTAD DE QUÍMICA
P R E S E N T E .

Nos permitimos informar a usted que una vez revisada la Tesis Individual denominada "MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EMITIDOS POR LA INDUSTRIA LADRILLERA ARTESANAL QUERETANA", presentada por el pasante ELISEO HERNÁNDEZ PÉREZ, con opción a recibir el Título de INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL, de acuerdo al Artículo 20, Inciso h), del Reglamento de Titulación vigente.

Emitimos nuestro voto aprobatorio.

ATENTAMENTE
"EDUCO EN LA VERDAD Y EN EL HONOR"

DR. MIGUEL ÁNGEL REA LÓPEZ

M. EN C. MA. EUSTOLIA RODRÍGUEZ MUÑOZ

M. EN C. GRACIELA GARCÍA BARRERA

M. EN C. MA. EUGENIA ORTEGA MORÍN

c. c. - archivo

ad.

Centro Universitario
Calle 39 - 36000
Querétaro
México, P. 36000
Tel. 442 22 12 61
Fax 442 22 12 62