

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA



# ANALISIS Y DISEÑO DE CHIMENEAS PARA CONTROL DE CONTAMINACION

TESIS MANCOMUNADA

QUE PARA OBTENER  
EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
PRESENTAN

LUIS GUILLERMO AGUILAR GALLARDO  
HECTOR TORRES MONTES



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# INDICE

	PAG.
I .- PROLOGO	1
II .- GENERALIDADES SOBRE CONTAMINACION AMBIENTAL	4
a) ASPECTOS HISTORICOS	5
b) ASPECTOS BASICOS	10
III .- ESTUDIOS BASICOS EN EL DISEÑO DE CHIMENEAS	28
a) TUNELES DE VIENTO	29
b) FACTORES METEOROLOGICOS Y TOPOGRAFICOS	35
c) ESTABILIDAD ATMOSFERICA	43
d) MODELOS MATEMATICOS	56
IV .- METODOS DE DISEÑO Y EJEMPLOS	65
a) ALTURA EFECTIVA DE CHIMENEA	66
b) CONCENTRACIONES A NIVEL DE PISO	88
c) APLICACIONES DE RESULTADOS DE TUNELES DE VIENTO	101
d) DISEÑO DE CHIMENEAS BASADO EN CALCULOS DE ALTURA EFECTIVA Y DIFUSION ATMOSFERICA	108
e) REGLAS SIMPLES PARA EL DISEÑO DE CHIMENEAS	125
V .- CONCLUSIONES	127
VI .- APENDICE	131
VII .- BIBLIOGRAFIA	136

## I. - PROLOGO

Durante siglos el hombre ha agudizado su ingenio para utilizar mejor los bienes que la tierra le proporciona. También ha enfocado sus preocupaciones a conocerse mejor a sí mismo y a buscarse mayores seguridades para preservar su salud y combatir la enfermedad y el dolor. Sin embargo sus actitudes, a veces violentas e ilógicas, producen agresión ambiental y destrucción de materiales no renovables. De tal forma que en la actualidad la contaminación ambiental es uno de los aspectos más negativos de la problemática del hombre moderno, junto con la explosión demográfica y el uso irracional de los recursos naturales.

La vida cotidiana no adviene ya bajo condiciones óptimas ambientales, ni siquiera buenas; con frecuencia parece que la existencia discurre en las peores circunstancias. Al observar el entorno, difícilmente se dejará de percibir humos y polvos y agua plena de inmundicias, de escuchar y sentir ruidos y vibraciones, de ver hacinamiento y suciedad, degradación y enfermedades, y un paisaje urbano y rural que día a día se deteriora.

Esto ha ocasionado que algunos ecologistas señalen que nuestra nave tierra navega sobre el espacio, desamparada, llena de basura y destrucción, hacia los infiernos.

Es sabido que el hombre tiene el derecho fundamental a la libertad, la igualdad y a condiciones adecuadas de existencia, en un ambiente de calidad tal que permita una vida de dignidad y bienestar; este derecho le impone la solemne responsabilidad de proteger y mejorar el ambiente para las gene-

raciones presentes y futuras. Por todo ello, combatir la contaminación en todas sus manifestaciones es una obligación ineludible e impostergable, tanto para los gobiernos como para todos los pueblos de la tierra.

Hay tareas extraordinariamente vitales para que podamos seguir hablando del futuro del hombre y no cabe la menor duda de que la lucha contra la contaminación es una de ellas. De su éxito o fracaso dependerá en gran parte la supervivencia o la extinción de la Humanidad.

## II.- GENERALIDADES SOBRE CONTAMINACION AMBIENTAL

- a) ASPECTOS HISTORICOS
- b) ASPECTOS BASICOS

## II 3). -ASPECTOS HISTORICOS

En sentido amplio, la contaminación ambiental ha existido en diversos grados desde antes de la aparición del hombre sobre el planeta. Gran cantidad de gases tóxicos debieron haber permanecido en suspensión en la Atmósfera primitiva de hace unos 1000 millones de años debido principalmente a las inmensas erupciones volcánicas que se sucedieron en la formación del planeta.

Por su parte el hombre primitivo, no solo contaminó su ambiente desde que apareció sobre la tierra, sino que propició el deterioro y la degradación de los sistemas ecológicos.

A más de 10,000 años de estos sucesos, las interrelaciones de los seres vivos y el medio ambiente son muy complejas: el hombre ha modificado, en su mayoría, los ecosistemas originales y, en pocos casos ha puesto en grave predicamento el equilibrio de los ciclos naturales haciéndolos derivar, muchas veces de manera irreversible, hacia el caos.

La contaminación tiene su origen en numerosas causas y, si bien puede decirse que siempre ha existido, los niveles que alcanza en la actualidad hacen peligrar la capacidad de la Biosfera para soportar y propiciar la vida. Factores como la explosión demográfica, las tendencias multitudinarias de los asentamientos humanos en grandes urbes, las características técnicas de las industrias y la multiplicación de los medios de transporte, han hecho que la contaminación alcance proporciones de desastre.

Si a la contaminación del aire, del agua, de los suelos y del ruido, se le agrega la no menos nociva, que se origina en los hacinamientos humanos con sus concomitancias y crímenes sociales, se obtiene el paisaje y el tiempo en el cual vivimos.

El término contaminación abarca todos estos aspectos y contra todos ellos tenemos el elemental deber de luchar, no solo por lo que respecta a lo que ya existe, sino también por lo que se refiere a lo que puede existir en el futuro.

Como consecuencia de las primeras evidencias de contaminación, en épocas anteriores, se habló de humos, gases o sustancias venenosas, de intoxicaciones o envenenamientos colectivos etc., pero los efectos e influencias nocivas de algunos contaminantes no se extendían más allá de ciertos niveles locales que alteraban regiones relativamente pequeñas, salvo algunos casos de excepción. Recordemos por ejemplo, la erupción, en 1883, del Perbhatan en Krakatoa, que hundi6 la isla de este nombre, provoc6 la muerte de miles de personas y arroj6 a la atmosfera tantos humos y polvos que oscurecieron una parte del planeta durante algunos meses.

Fueron sobre todo, contaminaciones naturales o accidentales las que perturbaron a la humanidad antes de la revolución industrial.

En el año 25 A.C. Vitrubio exigía que el agua debe estar libre de sustancias t6xicas y perjudiciales, debe ser fresca, clara, incolora y de sabor agradable.

Otras notas históricas hacen referencia a diferentes tipos de contaminación y aún de deterioro ambiental: se menciona que Julio Cesar prohibió el paso nocturno de carretas por la Roma Imperial por el intenso ruido que producían, perturbando el sueño de los habitantes.

En 1382 Carlos VI de Francia, publicó un edicto prohibiendo la emisión de humos malolientes y nauseabundos. No fué sino hasta 1510 que en Rouen, Francia, se tomaron ciertas providencias en contra del humo de la Hulla.

El humo se ha identificado siempre, como uno de los principales contaminadores del ambiente y su presencia aquí y -- allá ha sido una molestia aguda, sin embargo en el siglo -- XVIII, en plena revolución industrial europea, los campesinos iban a las ciudades a admirar el humo de las fábricas; en esta época el humo se identificaba con la prosperidad económica. La revolución industrial había elevado el nivel de vida de la población y la gente se interesaba mucho más por la -- prosperidad que por la disminución del humo.

Los estudios sobre la contaminación ambiental, han ganado interés mundial en los últimos lustros; las publicaciones técnico-científicas revelan, por su número y calidad, las -- preocupaciones de la humanidad.

Ya en 1890, se habían publicado en diversos países unos-cinco documentos sobre métodos de lucha contra la contaminación del aire y seis estudios científicos sobre los efectos --

probables de la contaminación atmosférica en relación con la vida humana. Pero no fué hasta que la historia registro hechos de lugubre espectacularidad cuando por fin se despertó el interés institucional. Los sucesos de Mosa, Donora, Londres, Bahía de Minamata y Poza Rica, para mencionar tan solo los de más impacto, fueron los que alertaron la opinión pública Mundial.

La muerte de 50 individuos y el establecimiento de un estado de morbilidad de cierta gravedad entre los habitantes del Valle del Mosa en Bélgica, durante los tres primeros días de diciembre de 1930, se debieron exclusivamente a la concentración de emanaciones a la que se aunaron la conformación fisiográfica del citado Valle y ciertos fenómenos climatológicos.

Donora, ciudad industrial, al sur de Pittsburgh, está situada a la orilla de un río limitada por altas montañas de poca pendiente. Esto favoreció, en los días del 23 al 30 de octubre de 1948, una concentración de las emanaciones de las siderúrgicas que al coincidir con una inversión térmica, causó un aumento hasta del 90% de las enfermedades respiratorias de los habitantes de la zona y el deceso de muchos de ellos, por efectos de los contaminantes.

El problema de la ciudad de Londres, se remonta a siglos; se sabe que en 1273, Eduardo I decretó el Acta de la Hulla, en la que se prohibió su quema excesiva. En 1952 el problema de la contaminación había crecido enormemente; el

uso general de carbón para la calefacción doméstica había sido, desde siempre, el principal causante. Durante la primera semana de diciembre de ese año (1952) sobrevinieron una niebla, una inversión térmica y un anticiclón, provocando una aguda concentración de contaminantes en todo el valle del Támesis. Este fenómeno se prolongó por varios días produciendo más de 4200 muertes.

Los sucesos del Japón se empezaron a observar desde 1956 cuando se reportaron enfermos graves del sistema nervioso, causado por la ingestión de pescados y mariscos que acumularon mercurio, debido a la contaminación de las aguas de la Bahía. A esta enfermedad se le llama ahora de Minamata.

El 24 de Noviembre de 1956, en Poza Rica, se produjo un serio problema de salud por el deterioro de la maquinaria de tratamiento de gas natural de la refinería. La fuga de sulfuro de hidrogeno que se ocasionó, unicamente duró 20 ó 25 minutos, sin embargo bastó ese corto lapso para que 320 personas sufrieran grave intoxicación, con alteraciones en el aparato respiratorio, ojos y otros organos. Veintidos personas fallecieron.

Debido a lo anterior y a la reacción de los diversos países frente al problema de la contaminación, algunos estados empezaron a promulgar leyes. Por ejemplo Alemania y Austria, en 1811, 1820 y 1909; Italia, desde 1912, expidió reglamentos en la que clasifica a la industria con índices de peligrosidad.

## II b). ASPECTOS BASICOS

## IIB1.- Que es la contaminación.

Si buscáramos una definición simplista de un problema tan grave, que afecta a toda la humanidad presente y trasciende al futuro como una sombra ominosa, podría decirse que la contaminación en todas sus formas es el deterioro gradual o acelerado, del medio ambiente. Y es que dicho medio ambiente está condicionado por una multitud de factores ecológicos que influyen, de manera decisiva, en todos los seres vivos: hombres, animales o vegetales.

Una definición más perfectible es la que aparece en la ley Federal para prevenir y controlar la contaminación Ambiental; Que sobre el término contáminate expresa: "toda materia o substancia, o sus combinaciones o compuestos, o derivados químicos y biológicos, tales como humos, polvos, gases, cenizas, bacterias, residuos y desperdicios y cualesquiera otros que, al incorporarse o adicionarse al aire, agua o tierra, puedan alterar o modificar sus características naturales o las del ambiente; así como toda forma de energía, como calor, radioactividad, ruidos, que al operar sobre, o en el aire, agua o tierra, altere su estado normal".

Por otra parte se entiende por Contaminación: "La presencia en el medio de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos, que perjudiquen o molesten la vida, la salud y el bienestar humano, la flora y la fauna, o degraden la ca-

lidad del aire, del agua, de la tierra, de los bienes, de los recursos de la nación en general o de los particulares."

### IIb2.- Tipos de Contaminación

Teóricamente, la contaminación es una cadena interminable que puede atacar y devastar toda forma de vida por los medios más obvios y también a veces por los más extraños; conviene sin embargo atender a los tipos más comunes de contaminación, a aquellos que el hombre produce, por negligencia o descuido, en su incesante carrera hacia el progreso económico, sin reparar a veces en los daños irreversibles que en el trayecto de ella va causando.

Los tipos más comunes de contaminación ambiental son: La contaminación del aire, particularmente en las zonas urbanas e industriales; la contaminación del agua, sobre todo cuando se usa para consumo humano; la contaminación de la tierra, especialmente cuando es causada por la mano del hombre; la contaminación de los alimentos, cuyos efectos en niños y ancianos sobre todo, arroja cada año un saldo impresionante de víctimas; y finalmente la contaminación del ruido, cuando es producida innecesariamente por el hombre.

### IIb3.- La Ecología y el Medio Ambiente

La ecología es una ciencia nueva que ha venido teniendo un gran desarrollo en virtud de la importancia y de la trascendencia de los temas que estudia. Etimológicamente la palabra ecología proviene de dos vocablos griegos: OIKOS que sig-

nifica casa y LOGOS que significa ciencia ó tratado, así pues la ecología es "la ciencia que estudia las condiciones de existencia de los seres vivos y las interacciones de toda naturaleza que se dan entre éstos y su medio ambiente". De esta definición puede desprenderse, fácilmente, que todos los problemas relacionados con la contaminación en general forman parte de la temática de esta nueva ciencia.

Entremos brevemente a otra importante definición: qué es el medio ambiente. La ecología responde: "Medio ambiente es el espacio que ocupa cada ser vivo, humano, vegetal o animal, en el que trata de encontrar todo lo que satisfaga sus necesidades".

El medio ambiente de todos los seres vivos está circunscrito a nuestro propio planeta, el cual como una nave espacial que viaja alrededor del sol a una velocidad de 29 kilómetros por segundo, lleva a bordo a cerca de cuatro mil millones de personas, mil quinientos millones de especies animales y trescientos cincuenta mil especies vegetales con una dotación limitada de aire, agua y tierra. Esta provisión, tal como sucede con el oxígeno de una nave espacial, tiene que ser constantemente usado, purificado y vuelto a usar, por que no hay manera de obtener más.

Para nuestro planeta no existe una especie de super mercado sideral en el que podamos comprar más provisión de oxígeno, de agua o de tierra. El hombre tiene que considerar que en relación al tamaño de la tierra, la capa de aire que envuelve a nuestro planeta es tan delgada como la cáscara de --

una manzana. Una corteza aún más delgada que esa capa, y que cubre la superficie del planeta, contiene toda la tierra útil y toda el agua de que pueden disponer los habitantes del globo terráqueo. A esta finísima envoltura de aire y a esa delgada corteza de tierra y agua se le llama "Biosfera" y es la que permite, propiamente, la existencia de todos los seres vivientes. Este es, desde el punto de vista de la ecología, el medio ambiente básico del que dependen nuestras vidas.

#### IIB 4.- El Hombre y su Sistema

Los especialistas con un sentido realista, llaman a la Biosfera un "sistema cerrado" porque nunca se le puede añadir más agua, más aire, o más tierra de los que siempre ha tenido.

La naturaleza usa una y otra vez estas mismas cantidades de agua, de aire y de tierra; esto es se lleva acabo un reciclaje de todos aquellos productos de la Biosfera, para mantener el llamado equilibrio ecológico sobre la tierra.

Tratandose de un sistema autorregulador, la biosfera -- tiende a la estabilidad, es decir, a conservar sus rasgos -- esenciales para poder sobrevivir a los posibles cambios o Alteraciones del medio ambiente.

Ademas de ser un sistema cerrado, la biosfera es también un sistema dinámico y limitado. Dinámico porque existe una constante interacción entre sus elementos, como el agua, el aire y la tierra, y esta interacción es la que permite que --

se den los ciclos mediante los cuales la naturaleza purifica sus elementos. El sistema es también limitado porque para que se conserve la vida en él se requiere ciertas condiciones, como una determinada temperatura, presión, etc. Fuera de ciertos límites, la vida dentro de este sistema se extingue.

## II b5.- Influencia de los Factores Ecológicos

Todos los organismos vivos que habitan en nuestro planeta se encuentran sometidos a los efectos simultáneos de diversos agentes llamados Factores Ecológicos, entre los cuales podríamos citar los siguientes: variaciones en el clima, características del suelo, composición química del agua, presión y composición química del aire, etc.

Estos y muchos otros factores ecológicos actúan en forma distinta sobre cada ser u organismo vivo, aunque habiten en un mismo lugar geográfico.

Así las condiciones del medio ambiente serán muy distintas para una jirafa, cuya cabeza se encuentra a tres metros sobre el nivel del suelo, que para una hormiga, que vive oculta entre las hierbas.

De esta manera, tanto la comunidad de seres u organismos vivos como los elementos del medio ambiente no viviente funcionan juntos, integrando así un sistema ecológico o "Ecosistema", en el que unos influyen en los otros, siendo unos y otros necesarios y a veces hasta indispensables para el mante

nimiento de la vida, tal como la conocemos en la tierra. Pero cuando las acciones de los seres vivos, principalmente el hombre, empiezan a cambiar o alterar las cualidades de los elementos que forman su medio ambiente, modificando las características de los suelos o la composición química de las aguas, el ecosistema sufre las consecuencias, mismas que más tarde revierten sobre el hombre y aún sobre muchas otras especies de seres vivos, animales o vegetales.

Muchas veces esos cambios que opera el hombre son producto de una actividad científica, perfectamente planeada y ejecutada, cuyos resultados son positivos porque complementan o substituyen a la naturaleza, pero en muchas otras es la mano irracional o irresponsable del mismo hombre, la que destruye el equilibrio ecológico de la naturaleza, alterando en forma grave e irreversible las cualidades y condiciones de su medio ambiente. Generalmente es así como se inicia el proceso devastador y suicida de la contaminación ambiental.

Es por eso que hoy en día nuestro planeta sufre ya las consecuencias letales de la contaminación; debido al mal uso que hemos venido haciendo de los recursos naturales, podría decirse que nuestro planeta está enfermo. Enfermo de agotamiento en unos casos; enfermo de contaminación en otros.

## II b 6.- La Contaminación y el Deterioro Ambiental

Una de las formas más agresivas del deterioro ambiental, es la contaminación en sus diferentes tipos. Podría decirse

que la contaminación es consecuencia directa de los patrones actuales de producción, distribución y consumo, así como de los hábitos de vida de la sociedad moderna.

Es conveniente aclarar, sin embargo que toda la contaminación ambiental es producto o culpa del hombre. También la naturaleza misma produce a veces ciertos tipos de contaminación y en grados no poco importantes.

Por ello la ecología se ocupa del estudio y prevención tanto de la contaminación 'Natural' como de la Contaminación 'Artificial'. Como ejemplo típico de la primera están la erupción de los volcanes o la presencia de polen en la Atmósfera; lo segundo se presenta en multitud de formas y grados, como cuando se derrama petróleo en el mar o cuando se emite bioxido de azufre a la Atmósfera. Para estos efectos, contaminante es toda materia o substancia, sus combinaciones o compuestos, que al incorporarse al aire, agua o tierra pueden alterar o modificar sus características naturales o las del medio ambiente, deteriorandolo o degradandolo.

## II b 7.- El Problema Demografico y la Contaminación

Antes de entrar de lleno en el análisis de los diferentes tipos de contaminación y de sus efectos sobre el medio ambiente, como uno de los factores de desequilibrio del mundo moderno, parece obligado examinar el tema de la población, ya que la cuestión demográfica es un elemento fundamental a tener en cuenta al analizar la acción del hombre sobre la biosfera.

En 1650 la población humana era de unos 500 millones de individuos y su tasa de crecimiento era aproximadamente del 0.3% anual, siendo necesarios 250 años para que la población mundial se duplicase. En 1970 la población sumaba un total de 3,600 millones y la tasa de crecimiento era de 2.1% anual, que correspondía a un período de duplicación de 33 años.

Este aumento exponencial de la población mundial se explica por el hecho de que, antes del inicio del capitalismo industrial, la tasa de natalidad excedía solo ligeramente a la de mortalidad. La mortalidad y morbilidad eran muy elevadas (hambre, epidemias, guerras); se ha calculado que en 1650 el período de vida de gran parte de la población mundial era sólo de unos 30 años. Sin embargo, esta situación ha variado profundamente durante el presente siglo y el equilibrio alta fecundidad alta mortalidad se ha roto parcialmente como consecuencia de la disminución de la mortalidad por la introducción de eficaces medidas sanitarias. De ahí que, para muchos, la explosión demográfica mundial constituye la causa primordial tanto de la contaminación y de la crisis del medio ambiente como de futuras crisis sociales.

Dicha afirmación no parece fundada sólidamente. En primer lugar, las tasas de aumento de los diferentes contaminantes son superiores, en su mayoría, a las de la población, y además, muchos tipos de contaminación no se relacionan directamente con el crecimiento demográfico.

El aumento de la contaminación aparece más bien relacionado con los modelos de crecimiento económico válidos para el

capitalismo industrial, con determinadas aplicaciones de los avances tecnológicos y con el proceso de urbanización que conlleva a la formación de grandes Megápolis:

Se ha calculado que si para el año 2000 los 7,000 millones de habitantes que existirán en la tierra hubiesen adoptado el sistema económico y las formas de vida de los Norteamericanos de hoy, la carga total de contaminación del medio ambiente sería 10 veces superior a la actual:

Ante estos datos cabe, plantearse el problema inverso, - dentro de la relación población - contaminación, y preguntarse sobre los posibles efectos de la contaminación sobre el período de vida de la población mundial:

No existen hoy datos suficientes para tratar adecuadamente el problema y sólo se han hecho intentos de relacionar las variables contaminación/población al tratar de la contaminación atmosférica:

Pero aún en ausencia de muchos datos puede afirmarse que la relación entre contaminación y período de vida es negativa, y un incremento muy elevado de la contaminación podría - llegar a constituir un grave peligro para la población mundial:

## II b 3:- Principales Contaminantes

La OMS (organización mundial de la salud) ha emprendido un estudio sobre 10 contaminantes especialmente frecuentes y-

sigue practicando encuestas para determinar cuales son las zonas mas contaminadas del planeta y cuáles los grados de contaminación que ponen en peligro la salud.

Los 10 contaminantes objeto del estudio son:

- El anhídrido sulfuroso, formado por la combustión de carbones minerales y de carburantes industriales.
- Las partículas de polvo y hollín que ensucian las ciudades y sirven de núcleos de condensación para la formación del "Smog" (mezcla de niebla y hollín).
- El monóxido de Carbono, presente en los gases de escape de los automóviles y en los que se forman durante otros procesos de combustión.
- Los anhídridos de nitrógeno presentes en los gases de escape de los automoviles. Estas sustancias contribuyen también a la formación de "Smog", que reduce la visibilidad e irrita los ojos.
- El plomo, metal tóxico, que se añade a la gasolina como antidetonante, que esta presente también en los gases de escape de los automóviles y que tiende a acumularse en el organismo.
- Petróleo, la contaminación es causada por la extracción del producto frente a las costas, su refinación, los accidentes de los buques petroleros y la descarga

al mar por agua de lastrado.

- El Mercurio, lo produce la utilización de combustibles fósiles, la industria cloro - alcalina, las centrales de energía eléctrica, la fabricación de pinturas y la preparación de pastas de papel.
- Los fosfatos, se les encuentra en las aguas de cañería y provienen, en particular, de los detergentes y de los fertilizantes químicos utilizados con exceso.
- El DDT y Plaguicidas, dado que se les utiliza preferentemente en la agricultura, al ser acarreados por las aguas causan la muerte de los peces, destruyen su alimento y contaminan la alimentación del hombre.
- La Radiación, en su mayor parte se origina en la producción de la energía atómica.

## II b 9.- Algunos Efectos de la Contaminación en la Salud del Hombre.

El daño que provoca un contaminante atmosférico en el hombre está supeditado a las características toxicológicas propias de la sustancia, a los niveles de concentración, en que se encuentra y al tiempo que dura la exposición al mismo, así como a la susceptibilidad o resistencia del hombre expuesto. Los contaminantes del aire, gases o partículas, suman varios millares, pero cuando se tratan específicamente de los que contaminan en gran escala el aire de las ciudades, se con

sidera solamente aquellos que son producto de una formación o emisión constante o masiva como los subproductos de la combustión de energéticos fósiles o de procesos o actividades diversas, como son las industriales, y que de hecho pueden afectar a la población expuesta.

- El Bioxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

Se estima que anualmente se emiten en la tierra, como subproducto de la combustion, 15000 millones de toneladas de este contaminante, lo que origina que  $0.6 \text{ --- cm}^3/\text{m}^3$  se estén adicionando a la atmosfera año con -- año.

Se ha de apuntar que el  $\text{CO}_2$  resulta esencial para la vida de las plantas y que el único daño que podría causar al hombre, es aumentar considerablemente la temperatura de la superficie terrestre y ocasionar desastres geoquímicos y ecológicos.

- El Monoxido de Carbono (CO)

Resulta de la combustion incompleta de materias orgánicas y se estima que anualmente se emiten en la tierra alrededor de 250 millones de toneladas, de los que más de la mitad la emiten los automóviles en operación. En el hombre el hábito de fumar es una fuente importante de exposición y el CO reacciona con la hemoglobina y las hemoproteinas, reduciendo la capacidad de la san

gre para conducir el oxígeno.

Exposiciones a altas concentraciones de monóxido de carbono durante largo tiempo, pueden producir cambios estructurales en el corazón y el cerebro: 58 mg de CO, en 1 m<sup>3</sup> de aire y 6 semanas de exposición, pueden lograrlo.

Resultan susceptibles a este contaminante los individuos con anemias, enfermos cardiovasculares, con trastornos en la tiroides y enfermedades pulmonares.

#### - Anhidrido Sulfuroso (SO<sub>2</sub>)

Se deriva principalmente de la combustión de energéticos fósiles que contienen azufre, estimándose anualmente en 150 millones de toneladas la emisión global de este contaminante, que en combinación con partículas en suspensión, como humos, contribuye al desarrollo y agrava algunas enfermedades respiratorias.

Es irritante respiratorio y puede causar broncoconstricción y aumento de la resistencia al paso del aire en los pasajes aéreos. Se potencializa su acción con partículas que le oxidan, algunas respuestas como broncoespasmos se han notado en exposición a concentraciones de una parte por millón. Aumenta la morbilidad de los padecimientos cardiovasculares en personas mayores de 55 años.

- Partículas en Suspensión como Humo.

Producto de quemar combustibles, de incendios y de procesos industriales. Se estima anualmente para los humos, una emisión global de 20 millones de toneladas y considerando que químicamente puede tratarse de muchas sustancias, junto con el anhídrido sulfuroso, sus efectos a las vías respiratorias son mayores, de tipo irritativo e inflamatorio, reducen la luz solar y pueden también, indirectamente, originar reducciones de la temperatura de la superficie Terrestre.

- Anhídridos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )

Productos de la oxidación del nitrógeno Atmosférico, se estima anualmente una emisión global de 53 millones de toneladas. Al combinarse con la mucosa en vías aéreas altas y en el pulmón, puede producir óxidos que irritan la estructura pulmonar y causan edema, o al reaccionar en los alveolos pueden causar neumonías. Sin embargo, la información de efectos es escasa a los niveles de concentración registrados en la actualidad. Origina la bruma parda en el aire de las ciudades.

La irritación ocular que sufren algunas personas por la contaminación del aire, la originan los derivados de hidrocarburos como son la acroleína, los aldehídos y los oxidantes fotoquímicos, incluyendo el ozono que directamente proviene de los escapes de vehículos automotores.

## II b 10.- Educación y Contaminación ambiental

Educar, informar en aspectos ambientales, es uno de los factores indispensables para conseguir que la contaminación se detenga y mejore nuestro ambiente.

La educación debe crear una conciencia, que nunca ha existido, de que nuestro planeta, con todos sus riquezas y bellezas, no puede soportar indefinidamente las agresiones y expropiaciones a que ha sido sometido por, irónicamente, el ser más inteligente del reino animal, el homo sapiens.

La educación, debe extenderse a todos los núcleos de población; desde los niños, hasta aquéllos que son los responsables de los efectos más severos de la contaminación.

Tendrá que rebasar los recintos académicos y generarse dentro de las empresas, en institutos científicos, en agrupaciones culturales, cívicas, patronales y laborales, así como dentro de los órganos gubernamentales.

La educación deberá estar dirigida, en términos de prioridad, a los siguientes grupos:

- A los responsables de proteger el medio ambiente.
- A quienes lo agreden más marcadamente.
- A los niños, más receptivos, para que paulatinamente, un mayor número de habitantes conozca los nuevos conceptos que deben servir de norma para la protección y mejoramiento del ambiente.

Para el público en general, lo mismo que para los tres grupos antes mencionados, el objetivo principal es crear conciencia de un problema que a todos nos afecta y, como consecuencia, crear responsabilidad y un espíritu de cooperación con las autoridades.

## II b 11.- El Hombre y la Agresión al Medio Ambiente.

El hombre ha sido agresivo con el medio ambiente que lo rodea y ha agotado o destruido muchos recursos que no puede recuperar: el sentido de adaptación que el hombre debía mostrar se ha convertido en una rebeldía a las formas de vida que inicialmente tuvo y ha abusado de muchos elementos ambientales transformando y modificando el medio ambiente, hasta convertirlo a veces en un paramo inhóspito o peligroso.

El hombre y el resto de los seres vivientes tienen que compartir el mismo mundo y si bien es cierto que al hombre le es dado modificar la naturaleza mediante su inteligencia, también es verdad que a veces parece que en vez de utilizar sus mejores capacidades para mejorar o equilibrar los recursos naturales heredados se va alejando de este indispensable equilibrio que le afecta tanto a él como al resto de los seres vivientes.

Por eso el hombre debe ser ampliamente consciente de sus limitaciones en relación al aprovechamiento de su medio, a la explotación irracional de los recursos naturales, a la planeación de sus poblaciones, a la Administración racional y lógica de los ecosistemas y, sobre todo, a la conservación del me

dio ambiente y su calidad.

Todo esto requiere de restricciones morales, legales, políticas, sociales y económicas, basadas en la libertad pero no en el a buso de ella, en el conocimiento y en la investigación de los problemas del medio ambiente, pero no es su olvido o ignorancia, a fin de controlar y prevenir su deterioro, evitando así una especie de suicidio colectivo.

Se han establecido abundantes pruebas de que la contaminación del aire daña la vegetación, acelera el deterioro de los materiales, perjudica a las construcciones, afecta al clima, disminuye la visibilidad y la radiación solar, agrava las relaciones públicas, hace aumentar los costos de producción, contribuye a provocar riesgos, interfiere en el gozo comodo de la vida y de la propiedad es un factor evidente de la morbilidad y mortalidad humana y animal. Las preguntas sociales más inquietantes son : ¿Cómo lograremos niveles aceptables de contaminación de aire con gastos particulares y públicos mínimos? ¿Cuales son los cambios y de éstos cuales estamos dispuestos a llevar a cabo y cuales son los niveles aceptables de contaminación del aire? Los sectores público y privado han estado luchando por contestar estas preguntas durante muchos años.

Primero los Ingenieros deben identificar los problemas, las principales fuentes de información y cuando sea posible determinar

los efectos en términos económicos y los mecanismos y/o teorías de las relaciones "causa y efecto", el objetivo del siguiente capítulo es estudiar algunas posibles soluciones al problema de contaminación del aire mediante el Diseño de Chimeneas.

### III.- ESTUDIOS BASICOS EN EL DISEÑO DE CHIMENEAS

- a) TUNELES DE VIENTO
- b) FACTORES METEOROLOGICOS Y TOPOGRAFICOS
- c) ESTABILIDAD ATMOSFERICA
- d) MODELOS MATEMATICOS

### III a).- TUNELES DE VIENTO.

Los tuneles de viento han tenido un gran uso en el diseño de chimeneas. Generalmente su uso esta orientado a experimentar el comportamiento de una pluma gaseosa bajo diferentes condiciones meteorológicas, que representan la turbulencia o estabilidad atmosférica real.

El procedimiento usado por los investigadores para la evaluación de chimeneas bajo condiciones meteorológicas cambiantes, es utilizar un modelo a escala de la planta o chimenea (generalmente un 250 avo del tamaño real para facilitar su construcción), el cual se coloca sobre una mesa dentro de un tunel de viento, este consiste de un cilindro de lámina que tiene en uno de sus extremos un ventilador al cual se le pueden regular las revoluciones y el gasto de aire que fluirá a través del ducto.

En la literatura se han reportado una gran variedad de pruebas realizadas en tuneles de viento (39), la figura 1 ha sido tomada de uno de estos. En ella se muestra el efecto de la velocidad del viento a la expulsión del gas y la elevación de la pluma.

La figura 2 muestra cálculos de concentraciones a nivel de piso a tres distancias de una chimenea de 20 ft de diámetro y 100 ft de altura, bajo las condiciones siguientes:

15 ft/seg de velocidad de expulsión de gases con una temperatura de 170°F. En esta figura se puede observar que a bajas velocidades

de viento las concentraciones a nivel de piso son esencialmente cero; cuando la velocidad se incrementa en un punto la concentración a nivel de piso aumenta rápidamente. A ésta velocidad se le llama: "Velocidad crítica de viento".

La velocidad crítica de viento ( $V_{cr}$ ) puede ser, determinada experimentalmente en un tunel de viento. Un método conveniente es utilizar humo para representar gases de chimenea y una fotocelda con un rayo de luz en el piso como indicador del área.

El establecimiento de " $V_{cr}$ " es por medio de un microfotómetro que indica las pérdidas en la intensidad de la luz debido al humo.

El Dr. STROM (39, 40) llevo acabo estos experimentos, usando un modelo a escala de una chimenea adyacente a un edificio y orientada diagonalmente hacia el viento. La figura 3 es el resultado de estas pruebas, las cuales se llevaron acabo con velocidades muy altas, tratando de igualar las condiciones meteorologicas reales. Los resultados obtenidos tienen una gran similitud con los teoricos mostrados en la figura 2.

En la figura 4 se muestra el efecto de la altura de la chimenea, velocidad de expulsión y temperatura del gas, sobre la velocidad crítica de viento.

La " $V_{cr}$ " es graficada a lo largo del eje x como "velocidad de viento en millas/hr".

Todos los datos graficados en esta figura fueron obtenidos con un modelo de chimenea a escala de 20 ft de diametro en donde la velocidad de expulsión de gases fué variada cambiando el flujo atraves de la chimenea.

La figura 5 muestra una comparación de pruebas en campo con pruebas en tuneles de viento. Los resultados son similares.

Los estudios en tuneles de viento son particularmente útiles para evaluar turbulencias producidas por edificios ó montañas que esten cerca ó adyacentes a una chimenea. Por ejemplo un terreno irregular alrededor de una planta puede complicar considerablemente el diseño de una chimenea (13), ya que donde una chimenea de 200 ft de altura satisface las necesidades una de 400 ft puede requerirse para la misma planta localizada junto a un edificio o algun otra disturbancia.

Bajo condiciones desfavorables los estudios en tuneles de viento son de gran utilidad para el diseño de una chimenea.

En el siguiente capítulo se ejemplifican los resultados de tuneles de viento al diseño de chimeneas.

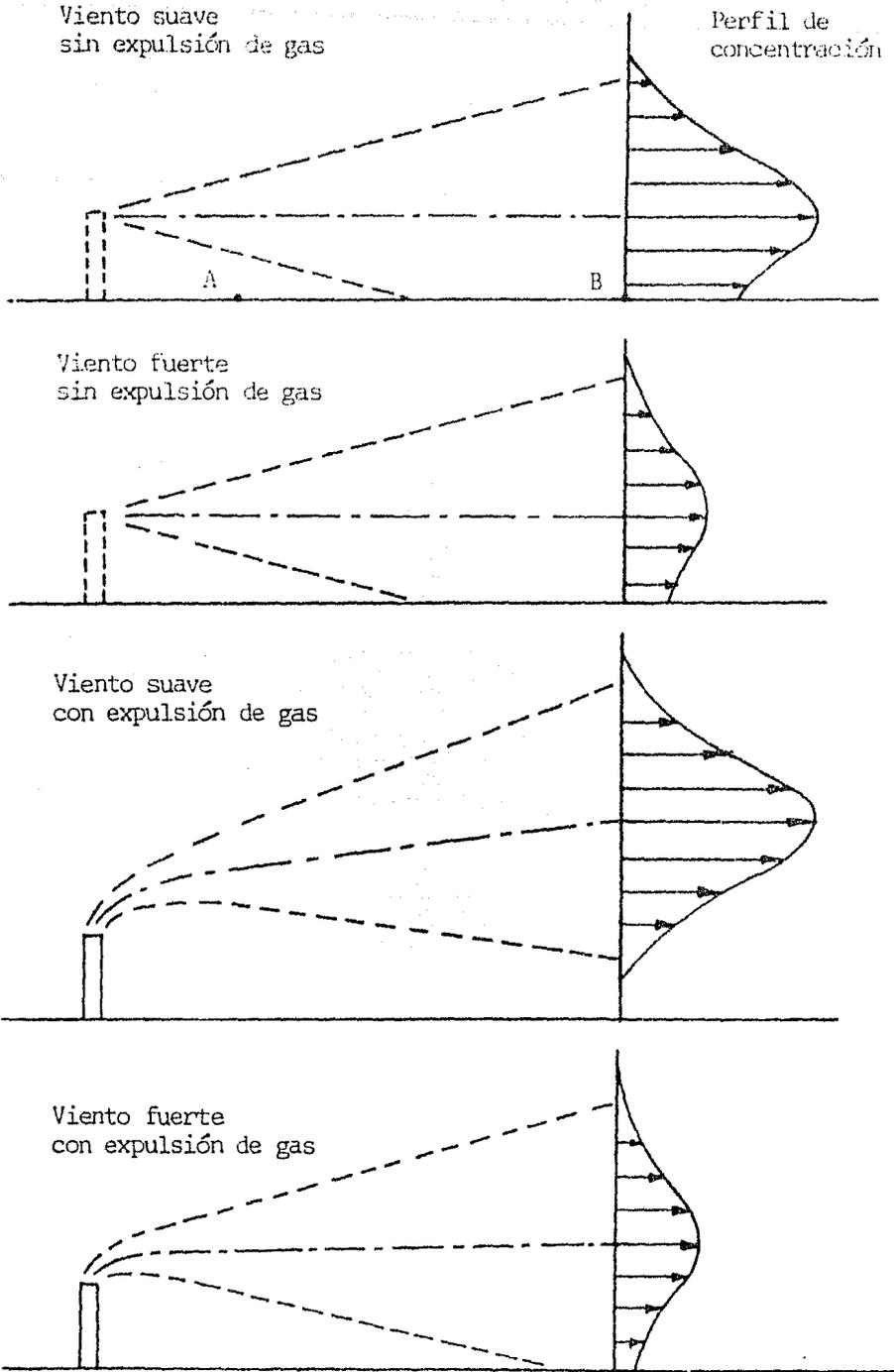


Fig.1 Efectos relativos de la altura de la pluma y velocidad de viento en concentraciones a nivel de piso

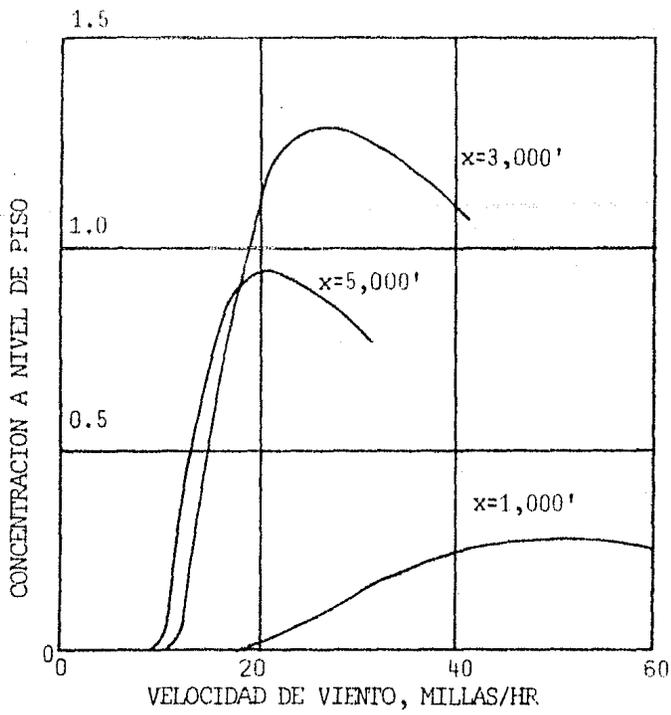


Fig.2- Variación de la concentración de piso, de una chimenea de 100ft de altura y 20ft de diámetro

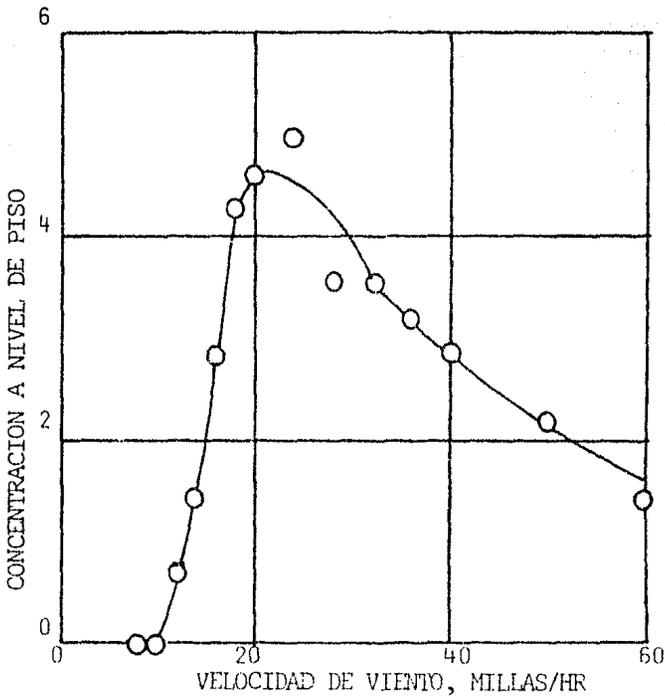


Fig.3- Resultados de la prueba en el túnel de viento de la chimenea a escala.

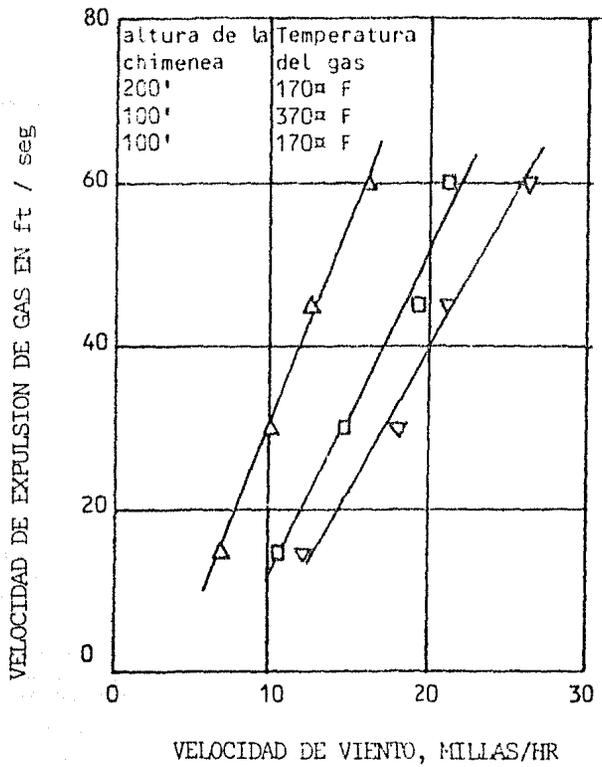


Fig.4 Resultados de algunas pruebas en túneles de viento de un modelo de chimenea

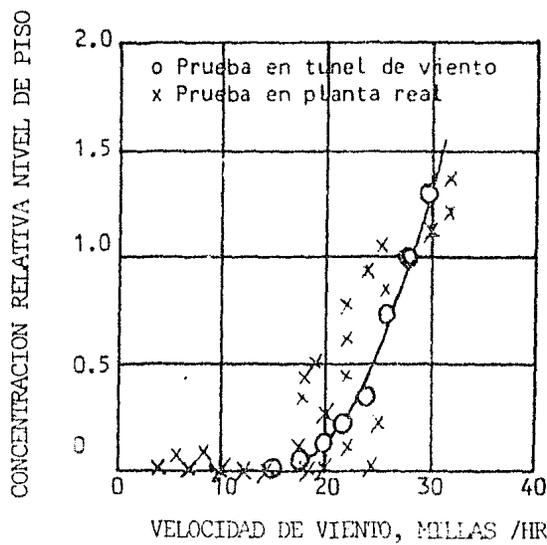


Fig.5 Comparación del resultado de una prueba en un túnel de viento y una planta real

### III b).-FACTORES METEOROLOGICOS Y TOPOGRAFICOS

#### IIIb 1.- CONSIDERACION GENERALES

Las condiciones atmosféricas determinan el comportamiento de los contaminantes después de salir de la fuente de emisión. Evaluando ciertas condiciones meteorológicas y las características de la fuente ó fuentes de emisión se puede calcular la concentración de los contaminantes a una distancia definida o bien, para una región con aire contaminado, determinar el origen de la contaminación. Para realizar evaluaciones, es necesario establecer modelos de transporte y dispersión de contaminantes en la atmósfera, ya sea a nivel urbano o rural.

La dispersión es afectada principalmente por la velocidad media del viento y la turbulencia térmica, la cual influye en la estabilidad atmosférica.

La composición de la atmósfera terrestre y las relaciones geométricas entre el sol-tierra, tierra-agua y las barreras topográficas, constituyen los principales determinantes del clima.

Los principales factores que contribuyen a establecer el flujo de aire que se mueve sobre la superficie de la tierra son: la densidad del aire, el gradiente de velocidad -tanto para la generación de ráfagas, como para la mezcla de capas de aire a diferentes alturas, - que define la presencia de turbulencia en el aire, el gradiente de temperatura, cuyo efecto semejante al del gradiente de velocidad genera ráfagas y crea

corrientes de convección. Con menor importancia aparece la rugosidad de la zona, consecuencia de la topografía, que tiende a crear turbulencia; el coeficiente de viscosidad cinemática del aire, la posición geográfica del sitio que se trata de determinar, la variación de la velocidad y la curvatura de las líneas de flujo de aire, debido a la curvatura de la superficie terrestre.

Teniendo en cuenta un sistema urbano, el cual presenta mayores rugosidades y capacidades caloríficas, comparado al sistema rural, se producen circulaciones urbano-rural, basadas en una diferencia de calor. Debido a lo anterior, las ciudades alcanzan temperaturas mayores respecto al sistema rural, pudiendo establecerse la circulación del viento de la siguiente forma: el aumento de temperatura origina corrientes ascendentes en el centro de la ciudad y corrientes radiales de la periferia al centro, que ocupan el espacio de aire que ascendió. Estos movimientos disminuyen la duración de las posibles estratificaciones que pudiera haber, pero existe la tendencia de quedar una capa de aire caliente arriba de una capa de aire frío, causando inversión térmica.

El fenómeno de inversión se define como el aumento de la temperatura con la altura, ocasionando que la atmósfera sea más estable, pues el aire más denso está más abajo, lo que provoca que grandes concentraciones de contaminante se formen a nivel de piso.

Una capa de inversión puede formarse por ejemplo, al en-

friarse el aire cercano al suelo durante la noche, pues la -- tierra disminuye su temperatura emitiendo radiación.

Sherlock (31) ha descrito, un tipo comun de temperatura- de inversión:

"Durante la noche y por las mañanas las inversiones de -- temperatura, ocurren como el resultado de la radiación del ca -- lor del piso.

Si la noche es clara y el viento es debil, la inversión- puede tener una magnitud de varios metros. Debido a la gran- estabilidad de la atmósfera es difícil la producción de turbu- lencia y los contaminantes se difunden menos en sentido verti- cal".

En condiciones de inversión térmica, la pluma de una chi- menea, pasara lentamente bajo el viento como una cinta o faja la cual no sufre dispersión vertical. Dichas plumas han sido arrastradas bajo el viento por muchos kilómetros. Una cierta cantidad se puede desviar ligeramente, abriéndose en forma la- teral. Bajo tales condiciones la concentración de los gases- en la pluma será muy alta.

Despues de amanecer la tierra se calienta nuevamente y -- una capa de aire caliente se forma cerca del piso. El espe- -- sor de la capa formª turbulencia la cual se incrementa hasta- envolver la pluma de la Chimenea dispersando los gases.

## III b 2.- EL VIENTO

Uno de los principales parametros que preocupa a los meteorologos de la contaminación del aire, esta representado por el Viento. Este parametro determina la conducción de contaminantes y su dilución, distribuyendolos en un gran volumen.

Una expresión que permite analizar la variación de la velocidad del viento en función de la altura es:

$$V/V' = 1/K \ln Z/\alpha \quad Z > \alpha \quad (3.1)$$

$V'$  = velocidad de fricción.

$K$  = costanante adimensional de Von Karman, aproximadamente igual a 0.4.

$\alpha$  = Rugosidad del terreno.

Valores representativos de  $\alpha$  y  $V'$ , se encuentran en la Ref. 28.

Cuando existen condiciones de estabilidad o inestabilidad atmosferica, el perfil del viento no se representa por la ec. 3.1.

En condiciones no adiabaticas, el perfil del viento puede ser calculado por la expresión propuesta por Priestley

$$\frac{V}{V'} = \frac{1}{K(1-\beta)} \left[ (Z/\alpha)^{1-\beta} - 1 \right] \quad (3.2)$$

Donde:

$\beta$  = Número adimensional, dependiendo del número de Richardson, Ri,

El valor de  $\beta$ , puede calcularse de acuerdo a la figura 6.

El número de Richardson, es una razón de las fuerzas ascensionales con las fuerzas de Reynold definiendose como sigue:

Número de Richardson =  $\frac{\text{fuerzas ascensionales}}{\text{fuerzas Reynold}}$

$$Ri = \frac{g \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right)}{(\partial V / \partial z)^2} \quad (3.3)$$

Las fuerzas ascensionales (o de convección), están determinadas por la diferencia entre el gradiente de temperatura  $(\partial T / \partial z)$  con la altura y el gradiente de la adiabática seca  $\Gamma$  ó tasa de decrecimiento adiabático. Las fuerzas de Reynold (ó mezclado mecánico) se determinan por el cuadrado del gradiente  $[(\partial V / \partial z)^2]$  de la velocidad del viento con la altura. Como  $\Gamma$  es una cantidad positiva y  $\partial T / \partial z$  puede llevar cualquiera de los dos signos el número de Richardson puede ser positivo o negativo. Para un número de Richardson mayor de 0.25 la atmósfera es extremadamente estable, la temperatura aumenta en relación con la altura y no hay mezcla vertical (Inversión). Una pluma de humo emitida de una chimenea viaja en dirección horizontal sin experimentar ninguna difusión de sus

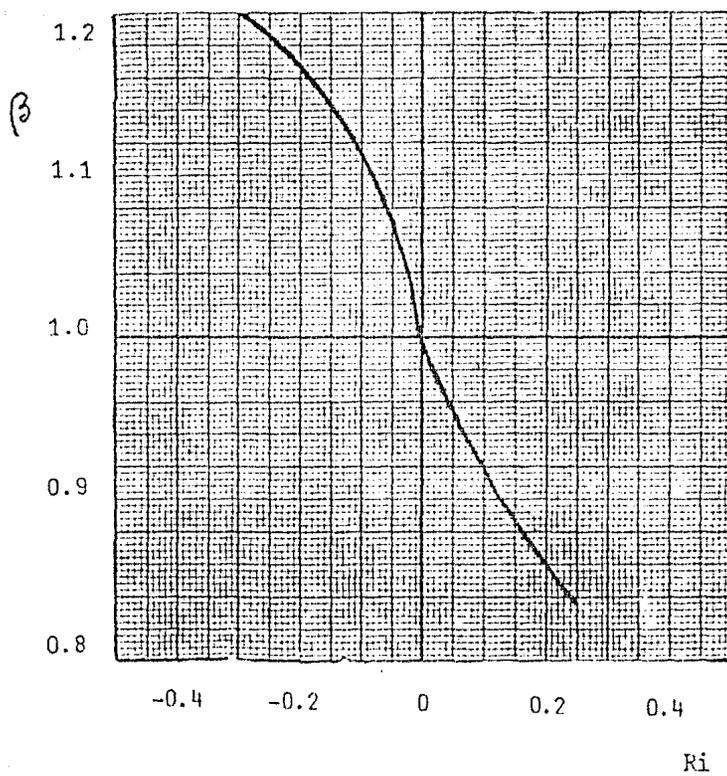


FIG. 6 NUMERO ADIMENSIONAL  $\beta$  , EN FUNCION DEL NUMERO DE RICHARDSON,  $Ri$  .

contaminantes.

A medida de que el número de Richardson se aproxima a cero la mezcla mecánica empieza a incrementarse, aumentando en forma más efectiva. El contenido de la pluma sufre cierta dispersión al retirarse de la chimenea. La mezcla convectiva empieza a hacerse más y más efectiva a medida de que el número de Richardson aumenta en forma negativa, esto es conforme la atmósfera se hace más y más inestable. Para valores negativos muy grandes del número Richardson, el contenido de la pluma se dispersa muy rápidamente.

Una relación empírica que describe la variación de la velocidad con la altura, lo cual puede ser usada en forma práctica es:

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{h}{Z_0} \right)^m \quad \text{----- (3.4)}$$

Donde:

V = Velocidad del viento a la altura física de la chimenea.

V<sub>0</sub> = Velocidad del viento de referencia (Dato meteorológico).

h = Altura física de chimenea.

Z<sub>0</sub> = Altura de medición de V<sub>0</sub> (frecuentemente esta altura es de 10 m).

El valor de "m" dependerá de las condiciones atmosféri--

cas del sitio en particular.

Rodríguez Cuevas (28) obtuvo un valor de  $m = 1/5$  el cual al compararlo con los propuestos por varios autores, correspondió aproximadamente a un valor medio.

Estimaciones experimentales de "m" para diferentes condiciones de estabilidad, se encuentran en la siguiente tabla:

CLASE DE ESTABILIDAD	m
A, Extremadamente inestable	0.10
B, Moderada inestabilidad	0.15
C, Debil inestabilidad	0.20
DD, Neutra Día *	0.25
DN, Neutra Noche *	0.25
E, Debil estabilidad	0.30
F, Moderada estabilidad	0.30

\* Aplicados en días nublados y noches oscuras.

### III c) ESTABILIDAD ATMOSFERICA

#### III c . 1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para definir la estabilidad atmosférica es necesario establecer la variación vertical de temperatura, en la atmósfera.

El cambio de presión en función de la altura se establece por la relación:

$$\frac{dP}{dz} = - \rho g = - \sigma \quad (3.5)$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido

$\sigma$  = peso específico del fluido

$g$  = constante gravitacional

$P$  = presión a diferentes alturas

$z$  = altura respecto al nivel del suelo

La ecuación general de los gases ideales es:

$$P = \frac{\rho R T}{IM} \quad (3.6)$$

Donde:

$T$  = Temperatura absoluta

$R$  = Constante universal de los gases

$IM$  = Peso molecular del fluido

Considerando al aire como gas ideal, y relacionando las-

ecuaciones 3.5 y 3.6 se puede obtener el decremento de la presión en función de la altura a temperatura constante:

$$P(z) = e^{-z g P M_a / RT} \quad (3.7)$$

En donde  $P M_a$  = Peso molecular del aire.

Esta última ecuación puede emplearse para obtener el perfil de temperatura suponiendo una serie uniforme de capas de aire a diferentes temperaturas.

Un mejor modelo para predecir el cambio de temperatura es estableciendo condiciones poliproticas, o sea, la dependencia atmosférica de presión, volumen y temperatura.

Considerando un proceso adiabático en el cual una porción de aire seco se desplaza verticalmente, se llega a la siguiente expresión que permite calcular la distribución vertical de temperatura:

$$\bar{T} = T_0 - \frac{n-1}{nR} z \quad (3.8)$$

Donde:

$\bar{T}$  = temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  a la altura  $z$ , en m.

$T_0$  = Temperatura de referencia, en  $^{\circ}\text{C}$

$n$  = Radio de capacidades caloríficas a presión y volumen constante, respectivamente.

$R$  = 29.27 en  $\text{m}/^{\circ}\text{C}$

La temperatura decrece linealmente con la pendiente -- igual a:

$$-\frac{n-1}{nR} = 0.0098 \quad \text{en } ^\circ\text{C/metro}$$

Esta pendiente se conoce como la tasa de decrecimiento - adiabático,  $\Gamma$ . El comportamiento adiabático de la atmósfera rara vez se cumple, lo que hace necesario introducir el concepto de potencial de temperatura,  $\Theta$ , que se define como la temperatura que alcanza un elemento de aire cuando es llevado adiabáticamente desde la presión del medio ambiente hasta la de referencia,  $P_0$ .

$$\Theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{n-1/n} \quad (3.9)$$

El gradiente del potencial de temperatura,  $\frac{d\Theta}{dz}$ , se puede expresar en términos del gradiente de temperatura absoluta,  $\frac{dT}{dz}$ , y del decrecimiento adiabático,  $\Gamma$ .

De la ecuación 3.8 y 3.9 se obtiene:

$$\frac{1}{\Theta} \frac{d\Theta}{dz} = \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} - \frac{n-1}{n} \frac{1}{P} \frac{dP}{dz} = \frac{1}{T} \left( \frac{dT}{dz} + \Gamma \right) \quad (3.10)$$

Puesto que la magnitud de  $\Theta$  se aproxima a la de  $T$ , entonces:

$$\frac{d\Theta}{dz} \approx \frac{dT}{dz} + \Gamma \quad (3.11)$$

donde:

$\frac{d\Theta}{dz}$  Es la medida de la desviación del perfil actual de temperatura respecto a la condición adiabática.

Integrando la ecuación 3.11 con respecto a  $z$ , se obtiene

la diferencia actual del gradiente de temperatura:

$$\Theta \cong T + \Gamma' z \quad (3.12)$$

Por lo tanto la tasa de decrecimiento de temperatura puede ser mayor, menor o igual que la tasa de decrecimiento adiabático.

Sea  $T'$  la temperatura del aire circunvecino a una porción de aire; combinando las ecuaciones 3.5, 3.6, 3.8 se deduce la siguiente relación:

$$\frac{dT'}{dz} = -\Gamma' \frac{T'}{T_0'} \quad (3.13)$$

Sea  $\Lambda$  la tasa de decrecimiento actual, la distribución de temperatura es:

$$T' (z) = T_0' - \Lambda z \quad (3.14)$$

Relacionando e integrando las ecs. 3.13 y 3.14 obtenemos:

$$T (z) = T_0 \left( \frac{T_0' - \Lambda z}{T_0'} \right)^{\Gamma'/\Lambda} \quad (3.15)$$

por consiguiente, si  $T_0 \neq T_0'$  implica que  $\Gamma' \neq \Lambda$ .

Para una porción de aire de volumen  $v$ , la fuerza de flotación, es igual a la diferencia del peso de la porción  $W$  y el peso de la atmosfera desplazada,  $W'$ .

$$F = W' - W = v (\delta' - \delta) \quad (3.16)$$

dividiendo 3.16 entre la masa de la porción se obtiene la aceleración  $\frac{dv}{dt}$  de la misma

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho' - \rho}{\rho} \quad (3.17)$$

Donde  $v$  es la velocidad vertical de la porción, partiendo de la ecuación 3.6 y dado que la presión de la porción es igual a la presión de la atmosfera, la ecuación 3.17 se transforma en:

$$\frac{dv}{dt} = g \frac{T - T'}{T'} \quad (3.18)$$

Relacionando  $\rho$ ,  $\rho'$ , con 3.18 se tiene

$$\frac{dv}{dt} = g \left( \frac{dT/dz - dT'/dz}{T'} \right) dz \quad (3.19)$$

Entonces:

$$\frac{dv}{dt} = g \left( \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \right) dz \quad (3.20)$$

El signo y magnitud de esta diferencia determina el grado de estabilidad atmosférica.

Para un cierto volumen de aire puede encontrarse tres estados de equilibrio o estabilidades atmosféricas: estable, inestable y neutro. (Figura 7).

Las condiciones son:

Estable  $\rho < \rho'$ ,  $T < T'$

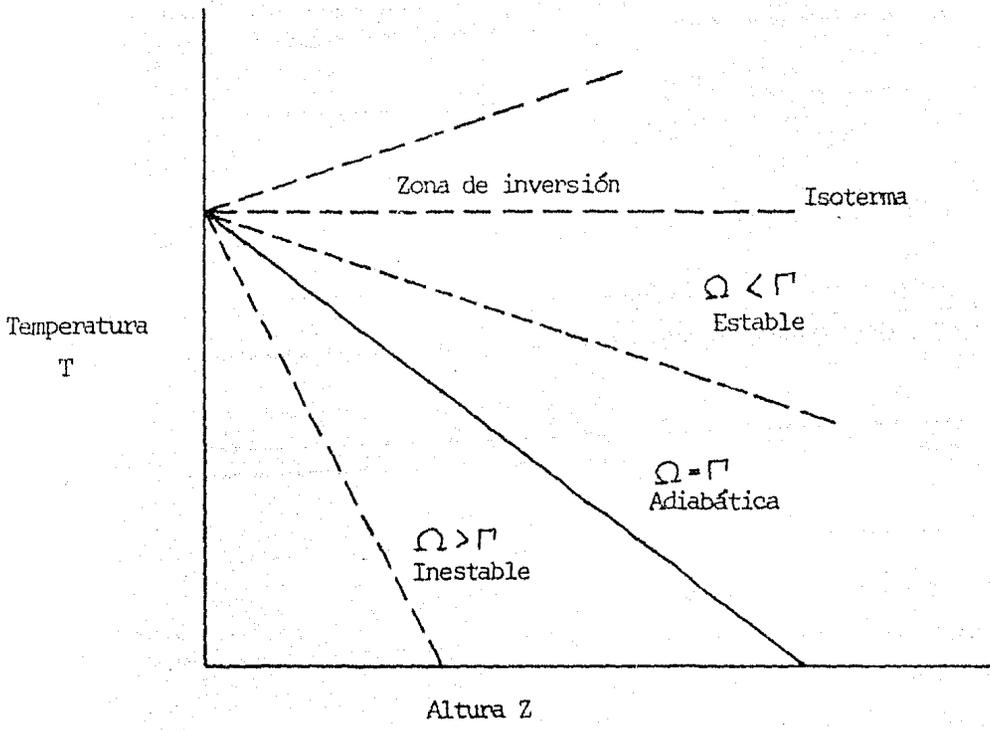


Fig.7 Estabilidad Atmosférica

Inestable  $\rho > \rho' , T > T'$

Neutra  $\rho = \rho' , T = T'$

En la atmósfera estable, el movimiento vertical es amortiguado y se dificulta la dispersión de contaminante, además que propicia condiciones de inversión térmica, o sea, hay aumento de temperatura cuando se incrementa la altura.

Si consideramos una porción de aire húmedo, podemos aplicar los fundamentos expuestos anteriormente y se obtiene:

$$\rho_{\text{aire seco}} > \rho_{\text{aire húmedo}}$$

Esto es debido al calor latente de vaporización que desprende la porción húmeda, por consiguiente es más inestable la atmósfera en los meses húmedos.

Normalmente los estados de equilibrio o establidades atmosféricas definidas como estable, inestable y neutra se representan por seis condiciones que se determinan según las siguientes tablas:

Velocidad del viento en la superficie m/s	DIA			NOCHE	
	Fuerte	Moderado	Debil	Comienza a obscurecer ó 4/8 del obscurecer *	$\leq 3/8$ del obscurecer b
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Clase de estabilidad	Número de Richardson Ri
A Extremadamente inestable	- 1.0 a 0.17
B Moderada inestabilidad	- 0.5 a -0.4
C Debil inestabilidad	-0.17 a -0.13
D Neutra **	0.0
E Debil estabilidad	0.03 a 0.05
F Moderada estabilidad	0.05 a 0.11

\* La definición del grado de obscurecimiento, es la fracción de la atmosfera que esta obscureciendo por encima del horizonte local aparente.

\*\* Aplicable en días nublados y noches oscuras.

## III C 2.- EFECTO DEL SISTEMA URBANO EN EL GRADIENTE DE TEMPERATURA

Los principales factores del sistema urbano que influyen en el gradiente de temperatura son :

i ) Formación de densa capa contaminante, producida por la emisión de gases y polvos, envolviendo la ciudad, esta capa absorbe el calor de la radiación solar directa y el irradiado por superficies urbanas.

ii) Absorción de energía térmica por los materiales de construcción de edificios, casas, calles, etc.

iii) Perdidas de calor generado en los procesos de combustión o-  
riginando una elevación en la temperatura del aire.

Estas dos formas de calentamiento, hacen que los centros urbanos tengan gradientes de temperatura horizontal sensiblemente más elevados que sus alrededores, fenomeno que se conoce con el nombre de efecto de la Isla de Calor. En ausencia de radiación solar, las superficies emiten el calor absorbido hacia el exterior, teniendose como consecuencia la inversión térmica nocturna.

## III C 3.- DESCRIPCION DE PLUMAS :

El comportamiento de la dispersión de los contaminantes emitidos por una chimenea por efecto de la estructura de la temperatura y de las estabilidades atmosféricas antes mencionadas se explica

de la siguiente forma ( Fig. 8 )

Cuando la temperatura desciende muy rápidamente con la altura, el número de Richardson tiene un valor negativo muy alto. Bajo tales condiciones de gradientes tenemos un mezclado muy rápido del aire contaminado con su ambiente. La pluma de humo ("plume") emitida de la chimenea se mueve en forma ondulante, incrementándose su amplitud conforme se aleja de la chimenea, esto es, tenemos un fenómeno de ondulado ("Looping"). A medida de que el número de Richardson se incrementa, el contenido de la pluma de humo se espasa menos en la vertical, presentándose una formación cónica y eventualmente abanicada ("coning").

En la zona urbana, a veces tenemos una combinación de una o más de las condiciones de los dos estados anteriormente descritos, puede presentarse una inversión abajo y un gradiente intenso arriba. La altura efectiva de la chimenea (definida en el siguiente capítulo). Es tal que los contaminantes son inyectados arriba de la zona de inversión, esto es, no hay mezcla en la región donde la temperatura se incrementa con la altura, los contaminantes no pueden penetrar la inversión y se presenta el fenómeno de verticalidad ("Lofting"), y el contenido de la pluma se dispersa a altos niveles. Por otro lado, si hay una inversión con un fuerte gradiente por debajo, los contaminantes emitidos por la chimenea son atrapados en la capa muy cerca del suelo y se presenta la fumigación ("Fumigation").

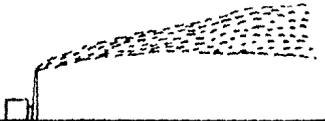
Tipo de Pluma	Apariencia	Clase de Estabilidad	Velocidad de Viento (M/S)
Abanico		E, F	≤ 3
		E	3-5
Fumigación		trun E- F a B & C	≤ 5
Cónica		D	---
		D	≥ 3
			≥ 5

FIG. 8 Descripción de Plumas de acuerdo a la clase de estabilidad.

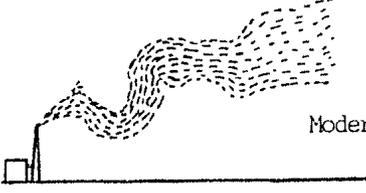
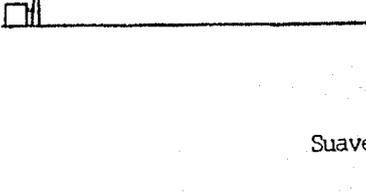
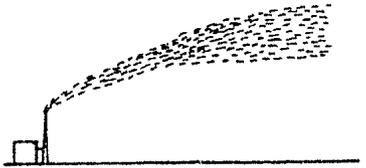
Tipo de Pluma	Apariencia	Clase de Estabilidad	Velocidad de Viento
Ondulamiento	 <p data-bbox="949 202 1068 226">Extremado</p>	A	$\leq 3$
	 <p data-bbox="949 362 1055 386">Moderado</p>	B	$\leq 5$
	 <p data-bbox="949 539 1018 563">Suave</p>	C	2-5 $\geq 5$
Verticalidad		E	$\leq 5$

FIG. 8 CONT.

Tipo de Pluma	Apariencia	Clase de Estabilidad	Velocidad de viento (M/S)
Atrapamiento			
		C	2-5
			≥ 5
		D	---
D	≥ 3		
	≥ 5		

FIG. 8 CONT.

### III d). MODELOS MATEMATICOS.

#### III d 1.- CONSIDERACIONES GENERALES.

La implantación de modelos de simulación de la calidad del aire puede hacerse a nivel Urbano o Local.

- Los modelos urbanos, generalmente se emplean en un rango de espacio de 1 hasta 10 km. y las escalas de tiempo corresponden a las especificadas en los estándares de la calidad de aire. Básicamente el rango es de una hora hasta un año. Además son aplicables a contaminantes emitidos por fuentes móviles y estacionarias.

Algunos de estos contaminantes son: COx, SOx, partículas, NOx, O<sub>3</sub>.

- Modelos locales son necesarios para analizar la distribución y transportación de contaminantes emitidos por fuentes móviles en periodos cortos de tiempo y una escala de espacio de 10 hasta 100 m.

#### CLASIFICACION DE FUENTES DE EMISION

La contaminación atmosférica urbana, puede ser dividida en 3 tipos de fuentes:

- 1) Fuentes Puntuales.- Este tipo de fuente comunmente se asocia con una sola chimenea o grupo de chimeneas que emiten contaminante a una altura elevada con respecto al nivel de piso.

Generalmente, grandes industrias o termoelectricas tienen este tipo de fuente.

ii) Fuentes de Area.- En un área urbana, cada edificio o casa produce una cierta emisión de contaminante y así, cada uno podría ser visto como una fuente puntual. Sin embargo, si la cantidad de emisión y la altura de emisión son relativamente constantes a través de una área grande de la ciudad, se ha encontrado mas conveniente agrupar esta multitud de pequeñas fuentes dentro de una sola fuente de Area, cuya cantidad de emisión es igual a la cantidad de emisión promedio por unidad de área y que tiene una sola altura de emisión igual al promedio de altura de los edificios del área.

iii) Fuentes de Línea.- Si un complejo industrial tiene una fila de chimeneas, se ha encontrado más conveniente asociar las diferentes fuentes puntuales en una sola fuente de línea cuya cantidad de emisión sea igual a la cantidad promedio de emisión por unidad de Longitud y que tenga una altura igual a la altura promedio de las chimeneas. Un caso similar sería una avenida en donde una línea de automoviles emite contaminante. En lugar de considerar cada automovil individualmente como una fuente, una sola fuente - línea se puede utilizar, teniendo una velocidad de emisión igual a la velocidad promedio de emisión por unidad de longitud de la avenida y una sola altura de emisión igual a la altura promedio de emisión de los automoviles.

Veamos ahora la mecánica para estimar la concentración -

de contaminantes bajo condiciones atmosféricas y de emisión -  
dadas. La ecuación básica a resolver se denomina ecuación de  
difusión y tiene la forma siguiente:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.21)$$

Donde C es la concentración que depende de x, y, z coor-  
denadas cartesianas del punto de investigación, así como del  
tiempo. Las cantidades  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  denotan los coeficientes -  
de difusión turbulenta y las velocidades del mismo, varian -  
con el gradiente, la aspereza de la superficie, la velocidad-  
del viento y también con la distancia de la fuente. Con el -  
fin de hacer esta ecuación más general, uno debe agregar ter-  
minos debidos a reacciones químicas, deposición etc. en el la  
derecho de la ecuación.

### III d 2.- DESCRIPCION DE MODELOS

En años recientes, varios desarrollos se han empleado pa-  
ra simplificar la ecuación de difusión y así obtener una solu-  
ción analítica más sencilla.

Las simplificaciones básicas utilizadas nos llevan a los  
siguientes modelos:

- i) Modelo de dispersión Gaussiana.
- ii) Modelo de diferencias finitas (celda fija).
- iii) Modelo de celda móvil.
- iv) Modelo de celda con partículas.
- v) Modelo de la caja múltiple.

## vi, Modelo de dispersión climatológica.

Debido al complejo desarrollo matemático y el poco uso práctico de varios de estos modelos, solamente presentamos el modelo de dispersión gaussiana, que es a la fecha el más utilizado para predecir el comportamiento de los contaminantes emitidos por una chimenea.

## i).- MODELO DE DISPERSION GAUSSIANA

Este modelo supone que la concentración de un contaminante emitido por una fuente puntual, se comporta como una distribución normal en las direcciones vertical y horizontal. La emisión del contaminante puede ser a través de una fuente puntual instantánea ó continua.

## i-1) Fuente Puntual instantánea.

La ecuación general es:

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{\pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z (Mt)^{3(z-\varphi/2)}} \exp\left(-\frac{1}{(Vt)^2 \varphi} \frac{(x^2+y^2+z^2)}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}\right) \quad (3.22),$$

Donde:

C = Concentración del material emitido, en (x, y, z, t).

M = Masa del material con t = 0 x = y = z = 0.

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  = coeficientes de dispersión en las direcciones x, y, z.

V = Velocidad media del viento en la dirección x.

$t$  = Tiempo.

$\varphi$  = parámetro de dispersión.

$x$  = Distancia horizontal, desde el centro de la nube y en dirección a  $V$ .

$y$  = Distancia vertical desde el centro de la nube y en dirección perpendicular a  $V$ .

$z$  = Distancia vertical desde el centro de la nube y en dirección perpendicular a  $x$ ,  $y$ .

#### i-2) FUENTE PUNTUAL

Ecuación General.

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z V} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.23)$$

Donde:

$Q$  = Gasto del contaminante emitido.

$V$  = Velocidad media del viento a la altura física de la chimenea.

$H$  = Altura efectiva de chimenea.

Las otras variables tienen el mismo significado de la ecuación anterior.

Los valores para las desviaciones estandar  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son -

función de la distancia en dirección del viento,  $x$  (ver figura 9).

$$\sigma_z = ax^b$$

$$\sigma_y = cx^d$$

$a, b, c, d$  son constantes que fijan la función a la curva empírica presentada por TURNER en 1970 (Ref 42). Valores para  $a, b, c, d$  se muestran en la siguiente tabla para cada clase de estabilidad.

Para obtención de valores de  $\sigma_z$  y  $\sigma_y$  mas exactos consultar la referencia antes indicada .

COEFICIENTES PARA SIGMA

$$\sigma_z = ax^b$$

$$\sigma_y = cx^d$$

clases de estabilidad	a			b			c		d	
	$x < 500m$	$500 \leq x < 5000$	$x \geq 5000$	$x < 500$	$500 \leq x < 5000$	$x \geq 5000$	$x < 10000$	$x \geq 10000$	$x < 1000$	$x \geq 10000$
A	.0383	.000254	.000254	1.281	2.089	2.089	.495	.606	.873	.851
B	.1393	.0494	.0494	.9467	1.114	1.114	.310	.523	.897	.840
C	.112	.101	.115	.910	.926	.911	.197	.285	.908	.867
DD	.0856	.259	.737	.865	.687	.564	.122	.193	.916	.865
DN	.0818	.253	1.297	.8155	.634	.442	.122	.193	.916	.865
E	.1094	.2452	.9204	.7657	.6358	.4805	.0934	.141	.912	.868
F	.05645	.1930	1.505	.805	.6072	.3662	.0625	.0800	.911	.864

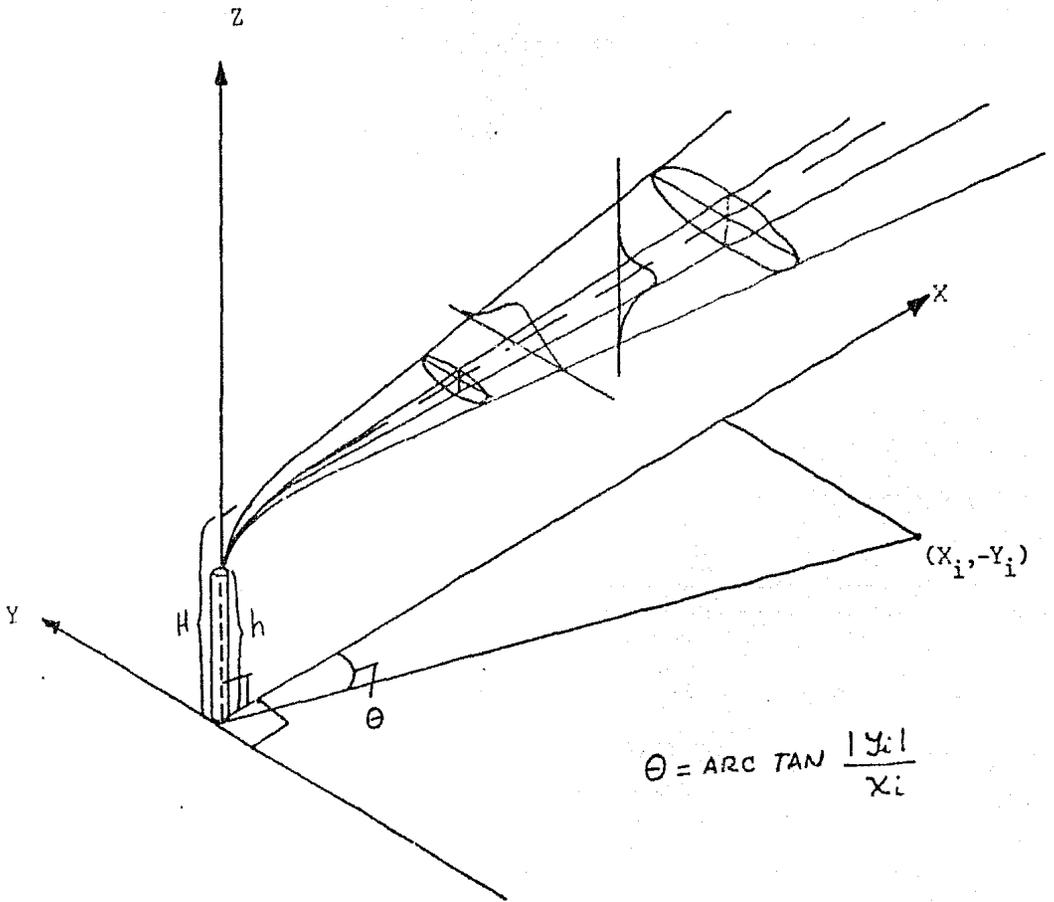


FIG. 9 Comportamiento de la pluma Gaussiana.

Las ventajas, desventajas y limitaciones del modelo son:

#### Desventajas

La desviación estandar vertical  $\sigma_z$ , es difícil de obtenerse directamente, ya que se requieren mediciones a diferentes alturas, por consiguiente  $\sigma_z$  es generalmente derivado de datos obtenidos a nivel del piso.

#### Limitaciones

Las principales limitaciones de la teoría Gaussiana son:

La atmosfera no es estacionaria.

La turbulencia vertical nunca es homogenea.

La turbulencia horizontal rara vez es homogenea.

#### Ventajas

Facilidades de cálculo, tiempos cortos de computación, - una primera aproximación de la verdadera dispersión de - la pluma en la Atmosfera.

En el siguiente capítulo se resolveran problemas para - ejemplificar las ecuaciones del Modelo Gaussiano.

#### IV.- METODOS DE DISEÑO Y EJEMPLOS

- a) ALTURA EFECTIVA DE CHIMENEA
- b) CONCENTRACIONEA A NIVEL DE PISO
- c) APLICACIONES DE RESULTADOS DE TUNELES DE VIENTO
- d) DISEÑO DE CHIMENEAS BASADO EN CALCULOS DE ALTURA EFECTIVA Y DIFUSION ATMOSFERICA
- e) REGLAS SIMPLES PARA EL DISEÑO DE CHIMENEAS

## IV a) ALTURA EFECTIVA DE CHIMENEA

## IV a1.- CONSIDERACIONES GENERALES

"Altura efectiva de chimenea" se define como la altura física de la chimenea mas la elevación de la pluma, o sea, es la altura desde el nivel de piso hasta la altura máxima que alcanza la pluma. En la figura 1 se ilustran dos casos, en el primero de ellos la elevación de la pluma es cero, por lo tanto la altura física de la chimenea equivale a la altura efectiva.

En el segundo caso la pluma se eleva sobre el tope de la chimenea, observandose que la altura efectiva es casi el doble de la altura física.

Desde el punto de vista de control de contaminación atmosférica, la altura efectiva es mas importante que la altura física de la chimenea y para cualquier problema el diseño mas económico se determina evaluando el costo mínimo de la altura efectiva.

La elevación de la pluma de una chimenea depende de los siguientes factores (2,36):

- Velocidad de expulsión del gas de la chimenea.
- Cantidad de gas descargado.
- Diferencia de densidades entre el gas y la atmósfera de los alrededores. (Principalmente la diferencia de temperatura asi como tambien la composición.)

- Velocidad de viento.

- Gradiente del potencial de temperatura atmosférica.

Lo anterior no requiere una aclaración detallada, sin embargo es necesario que al quinto factor se le de una explicación mas simple a la mencionada en el capítulo III inciso c.

En condiciones atmosféricas normales, la temperatura de la atmósfera decrece con la altura a razón de 2°C por 1000FT. Cuando este cambio de temperatura esta presente, se dice que la atmósfera es adiabática.

"El gradiente del potencial de temperatura atmosférica" - es la desviación de las condiciones adiabáticas de la atmósfera. Matemáticamente este gradiente esta definido como:

$$\Theta = r + 2 \text{ ---- (4.1)}$$

Donde  $\Theta$  = Gradiente del potencial de temperatura atmosférica, definido en la ecuación 3.12.

r = Relación actual de cambio en temperatura atmosférica. (°C por 1000FT), ( $\text{ft}^2$ ).

Si  $\Theta$  es negativa (r menor que - 2) la temperatura de la atmósfera decrecerá con la altura más rápidamente que bajo condiciones adiabáticas.

Si una pluma es descargada en dicha atmósfera tenderá a elevarse indefinidamente.

Si  $\Theta$  es positiva pero menor que 2, la pluma alcanzará una altura máxima y después viajará horizontalmente.

Si  $r$  es positiva, (la temperatura del aire se incrementará con la altura), la pluma caerá hacia el piso.

#### IVa 2.- EFECTOS DE VELOCIDAD

Bosanquet y colaboradores (2,3) han presentado ecuaciones para el cálculo de la elevación de la pluma, las cuales han sido verificadas con pruebas en campo y tuneles de viento.

La altura máxima sobre la chimenea que una pluma alcanza debido a efectos de velocidad, está dada por la siguiente ecuación:

$$Z_{\max} = \frac{4.77}{1+0.43 \frac{v}{v_s}} \sqrt{\frac{Q_1 v_s}{v}} \quad \text{---- (4.2)}$$

La altura de la pluma a una distancia  $x$  de la chimenea es:

$$Z = Z_{\max} \left( 1 - 0.8 \frac{Z_{\max}}{x} \right) \quad \text{---- (4.3)}$$

(Cuando  $x > 2 Z_{\max}$ )

Donde:  $Z_{\max}$  = máxima elevación de la pluma, ft.

$v$  = Velocidad del viento, ft/seg.

$v_s$  = Velocidad de expulsión del gas ft/seg.

$Q_1$  = Cantidad de gas expulsado ft<sup>3</sup>/seg. corregido a 20°C.

El uso de esta ecuación se demuestra en el siguiente - - ejemplo:

### Ejemplo 1

Calcule la elevación de la pluma que sale de una chimenea de 100 fT de altura, 20fT de diametro interno, a una temperatura de 170°F, y una velocidad de expulsión del gas de 60 fT/seg, cuando la velocidad del viento es de 16 millas/h.

(Condiciones que representan un punto sobre la curva para una chimenea de 100 fT en la figura 4).

$$170^{\circ}\text{F} = 77^{\circ}\text{C}$$

$$Q_1 = \frac{(60) (\pi) (20)^2}{4} \frac{(273 + 20)}{(273 + 77)} = 15\,780 \frac{\text{fT}^3}{\text{seg}} @ 20^{\circ}\text{C}$$

$$V = (16) (1.465) = 23.4 \text{ fT/seg}$$

$$V_s = 60 \text{ fT/seg}$$

$$Z_{\text{max}} = \frac{4.77}{1 + 0.43 \left( \frac{23.4}{60} \right)} \frac{\sqrt{(15780) (60)}}{23.4} = \underline{\underline{169.8 \text{ FT}}}$$

a 400 fT de la chimenea.

$$Z = 169.8 \left[ 1 - \frac{(0.8) (169.8)}{400} \right] = 112 \text{ fT.}$$

a 1000 fT de la chimenea, Z = 147 fT.

Una grafica ha sido preparada para calculos rápidos de la elevación máxima de la pluma por efectos de velocidad (Figura 10). El uso de esta gráfica se muestra a continuación:

## Ejemplo 2

Repetir el ejemplo 1 usando la figura 10.

Para  $V = 23.4$  ft/seg y  $V_s = 60$  Se obtiene :

$$\frac{Z_{\max}}{\sqrt{Q_1}} = 1.36 \quad \therefore \quad Z_{\max} = 170 \text{ ft} \approx 169.8 \text{ ft}$$

Como se observa los resultados son bastantes similares.

## IV a 3.- EFECTO DE DIFERENCIA DE DENSIDADES

La elevación de la pluma debido a la diferencia en densidad del gas y la atmósfera de los alrededores, puede ser calculada, por la solución de las siguientes ecuaciones:

$$X = 3.57 \sqrt[3]{Q_1 V_s} \quad \text{---- (4.4)}$$

$$Z = 6.37 g \frac{Q_1 (T - T_1)}{V^3 T_1} \quad \text{---- (4.5)}$$

Donde  $X$  = distancia horizontal desde la chimenea, ft.

$Q_1$  = Cantidad de gas expulsado ft<sup>3</sup>/seg. (corregido a 20°C)

$V_s$  = Velocidad de expulsión del gas en ft/seg.

$g$  = Aceleración de la gravedad, 32.2 ft/seg<sup>2</sup>.

$T$  = Temperatura de salida del gas, °K.

$T_1$  = Temperatura a la cual la densidad del gas es igual que la Atmósfera de los alrededores, °K

$Z_{max} / \sqrt{Q_1}$

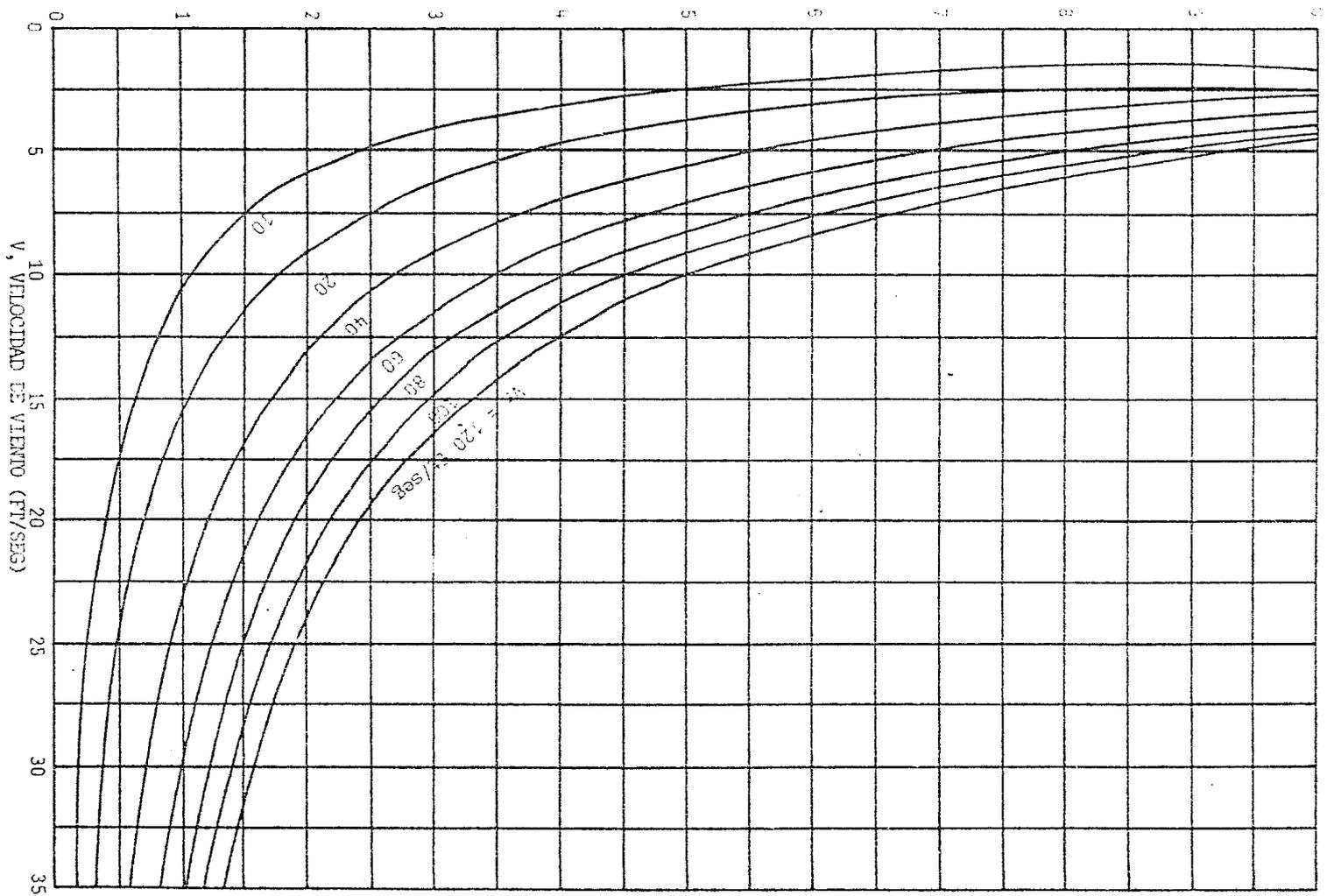


Fig. 10- Velocidad de elevación de la pluma

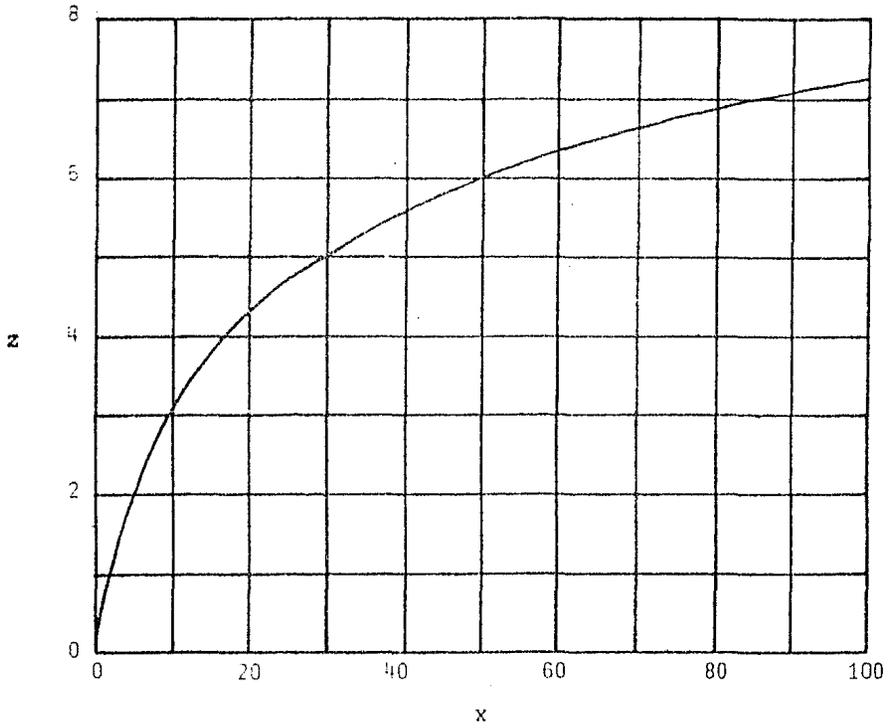


Fig. 11

Factores para la elevación de la pluma por diferencia de densidades. (Ref. 2)

$V$  = Velocidad del viento, ft/seg.

$x, z$  = Valores dados en la figura 11.

La ecuación anterior es valida cuando:

$$v^2 > \frac{(T - T_1)g}{T_1} \sqrt{\frac{Q_1}{V_s}}$$

Y cuando existan condiciones atmosféricas adiabáticas.

La aplicación de estas ecuaciones se muestra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 3

Para la misma chimenea del ejemplo 1, calcule la elevación de la pluma por diferencia de densidades; La temperatura Atmosférica es de 70°F.

$$Q_1 = 15780 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

$$T = 170^\circ\text{F} = 77^\circ\text{C} = 350^\circ\text{K}$$

$$V = 23.4 \text{ ft/seg.}$$

$$V_s = 60 \text{ ft/seg.}$$

Suponiendo que el gas de la chimenea es esencialmente aire

$$T_1 = 70^\circ\text{F} = 21^\circ\text{C} = 294^\circ\text{K}$$

$$\frac{(T - T_1)g}{T_1} \sqrt{\frac{Q_1}{V_s}} = \frac{(350 - 294)}{(294)} (32.2) \sqrt{\frac{15780}{60}} = 99$$

$$V^2 = (23.4)^2 = 547$$

asi que, esta condición es satisfactoria ( $547 > 99$ )

$$X = \frac{3.57 \sqrt{Q_1 V_s}}{V} \quad x = \frac{(3.57) \sqrt{(15780) (60)}}{23.4} \quad x = 148x$$

$$Z = \frac{6.37gQ_1(T - T_1)}{V^3 T_1} \quad z = \frac{(6.37) (32.2) (15780) (56)}{(23.4)^3 (294)} \quad z = 48z$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser resueltas por el siguiente procedimiento:

- (1) Selección de un valor de X
- (2) Resolver para x
- (3) Usando la figura 11 encontrar z
- (4) Resolver para Z

La solución en forma tabular es como sigue:

X	ft	x	z	Z	ft
500		3.38	1.5	72	
1000		6.76	2.4	115	
2000		13.52	3.5	168	
4000		27.04	4.8	230	

El ejemplo 3 muestra que el incremento en la elevación de la pluma puede ser importante para un gran diametro de chimenea. La elevación debido a la diferencia de densidades no es

de gran magnitud cerca del punto de descarga, pero generalmente si lo es, a cierta distancia de la chimenea.

El ejemplo 4 ilustra el efecto del diámetro de la chimenea.

#### Ejemplo 4

Para una chimenea de 4 ft de diámetro, que opera bajo las mismas condiciones que la chimenea del ejemplo 3, calcular la elevación de la pluma debido a la diferencia de densidades:

$$Q_1 = \frac{(4)^2}{(20)^2} (15780) = 631 \text{ ft}^3/\text{seg}$$

$$V = 23.4 \text{ ft/seg.}$$

$$V_s = 60 \text{ ft/seg.}$$

$$T_1 = 70^\circ\text{F} = 294 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T = 170^\circ\text{F} = 350 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\frac{(T - T_1)g}{T_1} \sqrt{\frac{Q_1}{V_s}} = \frac{(350 - 294)(32.2)}{(294)} \sqrt{\frac{631}{60}} = 20$$

$$V^2 = (23.4)^2 = 547$$

Ya que  $547 > 20$  satisface ésta condición.

$$X = \frac{3.57 \sqrt{Q_1 V_s}}{V} \quad x = \frac{(3.57) \sqrt{(631)(60)}}{23.4} \quad x = 29.7 \text{ x}$$

$$Z = \frac{6.37g Q_1 (T - T_1)}{V^3 T_1} \quad z = \frac{(6.37)(32.2)(631)(56)}{(23.4)^3 (294)} \quad z = 1.92 \text{ z}$$

La solución en forma tabular es la siguiente:

X ft	x	z	Z ft
500	16.8	3.9	7.5
1000	33.7	4.2	8.1
2000	67.3	6.5	12.5
4000	135.0	7.6	14.6

La comparación del ejemplo 4 con el ejemplo 3, ilustra, que la cantidad de gases descargados tiene un gran efecto en el aumento de densidad. La elevación de la pluma para la chimenea de 4 ft de diametro es aproximadamente  $1/10$  que para la de 20 ft de diametro.

#### IV a 4 - ELEVACION MAXIMA DE LA PLUMA DEBIDO A LA DIFERENCIA DE DENSIDADES

La elevación de la pluma debido a la diferencia de densidades se ha venido calculando para condiciones atmosféricas adiabáticas, esto es, se supuso que la temperatura de la atmósfera decrece con la altura a una relación de  $2^{\circ}\text{C}$  por 1000-ft, bajo estas condiciones, una pluma podrá continuar elevándose indefinidamente ya que habrá siempre diferencia de densidades entre la pluma y la Atmósfera.

Cuando el gradiente del potencial de temperatura atmosférica es positivo (el cambio en la temperatura es  $1 \text{ ó } 0^{\circ}\text{C}$  por 1000 ft y  $\Theta = r + 2 = -1 + 2 = 1 \text{ ó } \Theta = 0 + 2 = 2$ ) la pluma alcanzará una altura máxima ya que su densidad será igual a la atmósfera de los alrededores.

La máxima altura de una pluma debido a la diferencia de densidades esta dada por la siguiente ecuación:

$$Z_{\max} = 6.37 \text{ g} \frac{Q_1 (T - T_1)}{V^3 T_1} \left( \ln J^2 + \frac{2}{J} - 2 \right) \text{ ---- (4.6)}$$

Donde

$$J = \frac{V^2}{\sqrt{Q_1 V_s}} \left( 0.43 \sqrt{\frac{T_1}{g \theta}} - 0.28 \frac{V_s}{g} \frac{T_1}{(T - T_1)} \right) + 1$$

El uso de esta ecuación se ilustra a continuación.

Ejemplo 5

Para la chimenea descrita en los ejemplos 1 y 3, calcular la elevación máxima de la pluma debido a la diferencia de densidades, si el gradiente del potencial de temperatura Atmosférica,  $\theta = 1$ .

$$Q_1 = 15780 \text{ ft}^3/\text{seg}$$

$$T = 350 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 294 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$V = 23.4 \text{ ft}/\text{seg}$$

$$V_s = 60 \text{ ft}/\text{seg}$$

$$J = \frac{(23.4)^2}{\sqrt{(15780)(60)}} \left( 0.43 \sqrt{\frac{(294)}{(32.2)(1)}} - \frac{(0.28)(60)(294)}{(32.2)(56)} \right) + 1$$

$$J = 0.19$$

$$Z_{\max} = \frac{(6.37)(32.2)(15780)(56)}{(23.4)^3 (294)} \left[ \ln (0.19)^2 + \frac{2}{0.19} - 2 \right]$$

$$Z_{\max} = (48.0)(5.2) = 250 \text{ ft}$$

## IV a 5.- METODO DE HOLLAND

La ecuación de Holland fué desarrollada con datos experimentales comprobados por Moses y Strom (diametros de chimeneas de 1.7 m a 4.3 m y temperaturas de 82 a 204°C).

Dicha ecuación es la siguiente:

$$Z = \frac{V_s d}{V} (1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P \frac{T - T_1}{T} d) \text{ ---- (4.7)}$$

Donde:

Z = Elevación de la pluma sobre la chimenea, m

Vs = Velocidad de expulsión del gas, m/seg.

V = Velocidad del viento, m/seg.

T = Temperatura de salida del gas, °K.

T1 = Temperatura del aire, °K.

d = Diametro interno de la chimenea, m.

P = Presión atmosférica, mb (milibares).

$2.68 \times 10^{-3}$  es una constante cuyas unidades son  $\text{mb}^{-1} \text{m}^{-1}$

La ecuación presentada por Holland, muestra que la elevación de la pluma sobre la chimenea será válida a una distancia no mayor de 100 m desde la misma. Sugiere valores de corrección de Z, para condiciones inestables entre 1.1 y 1.2 y valores para condiciones estables entre 0.8 y 0.9.

## Ejemplo 6

Una chimenea de 1.5 m de diámetro y 30 m de altura emi-

te 72 g/seg. de  $\text{SO}_2$ . La temperatura de los gases de salida es de  $250^\circ\text{F}$  ( $394^\circ\text{K}$ ) y salen a una velocidad de 13 m /seg, -suponer una presión atmosférica de 970 mb y la temperatura del aire de  $20^\circ\text{C}$  ( $293^\circ\text{K}$ ). Calcular la máxima concentración a nivel de piso como una función de la velocidad de viento - para clases de estabildades B y D, y determinar la velocidad crítica de viento para estas estabildades.

Utilizando la ecuación 4.7

$$Z = \frac{(13)(1.5)}{V} \left[ 1.5 + (2.68 \times 10^{-3})(970) \left( \frac{394 - 293}{394} \right) (1.5) \right]$$

$$Z = \frac{48.8}{V}$$

La altura efectiva para varias velocidades de viento y estabildades están calculados en la siguiente tabla.

CLASE D			Clase B	
V m/seg	Z m	Z+h m	1.15Z m	h + 1.15 Z m
0.5	97.6	127.6	112.2	142.2
1.0	48.8	78.8	56.1	36.1
1.5	32.6	62.6	37.5	67.5
2.0	24.4	54.4	28.1	58.1
3.0	16.3	46.3	18.7	48.7
5.0	9.8	39.8	11.3	41.3
7.0	7.0	37.0	8	38.0
10.0	4.9	34.9		
20.0	2.4	32.4		

h = Altura física de chimenea

Z+h = Altura efectiva de chimenea (H)

Con la altura apropiada, la concentración máxima para cada velocidad de viento y estabilidad, puede determinarse obteniendo el máximo  $CV/Q$  como una función de  $H$  y la estabilidad (figura 12), y multiplicando por la apropiada  $Q/V$ . Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Clase de Estabilidad	V m/seg	H m	$GV/Q_{max}$ $s^{-2}$	Q/I g/m	$\sigma_{max}$ g/m <sup>3</sup>
B	0.5	142.2	$8.0 \times 10^{-5}$	144	$1.15 \times 10^{-3}$
	1.0	86.1	$2.0 \times 10^{-5}$	72	$1.44 \times 10^{-3}$
	1.5	67.5	$3.1 \times 10^{-5}$	48	$1.49 \times 10^{-3}$
	2.0	58.1	$4.1 \times 10^{-5}$	36	$1.48 \times 10^{-3}$
	3.0	48.7	$5.7 \times 10^{-5}$	24	$1.37 \times 10^{-3}$
	5.0	41.3	$7.8 \times 10^{-5}$	14.4	$1.12 \times 10^{-3}$
	7.0	38.0	$8.7 \times 10^{-5}$	10.3	$8.96 \times 10^{-4}$
D	0.5	127.6	$4.4 \times 10^{-6}$	144	$6.34 \times 10^{-4}$
	1.0	78.8	$1.42 \times 10^{-5}$	72	$1.02 \times 10^{-3}$
	1.5	62.6	$2.47 \times 10^{-5}$	48	$1.19 \times 10^{-3}$
	2.0	54.4	$3.5 \times 10^{-5}$	36	$1.26 \times 10^{-3}$
	3.0	46.3	$5.1 \times 10^{-5}$	24	$1.22 \times 10^{-3}$
	5.0	39.8	$7.3 \times 10^{-5}$	14.4	$1.05 \times 10^{-3}$
	7.0	37.0	$8.2 \times 10^{-5}$	10.3	$8.45 \times 10^{-4}$
	10.0	34.9	$9.4 \times 10^{-5}$	7.2	$6.77 \times 10^{-4}$
	20.0	32.4	$1.1 \times 10^{-4}$	3.6	$3.96 \times 10^{-4}$

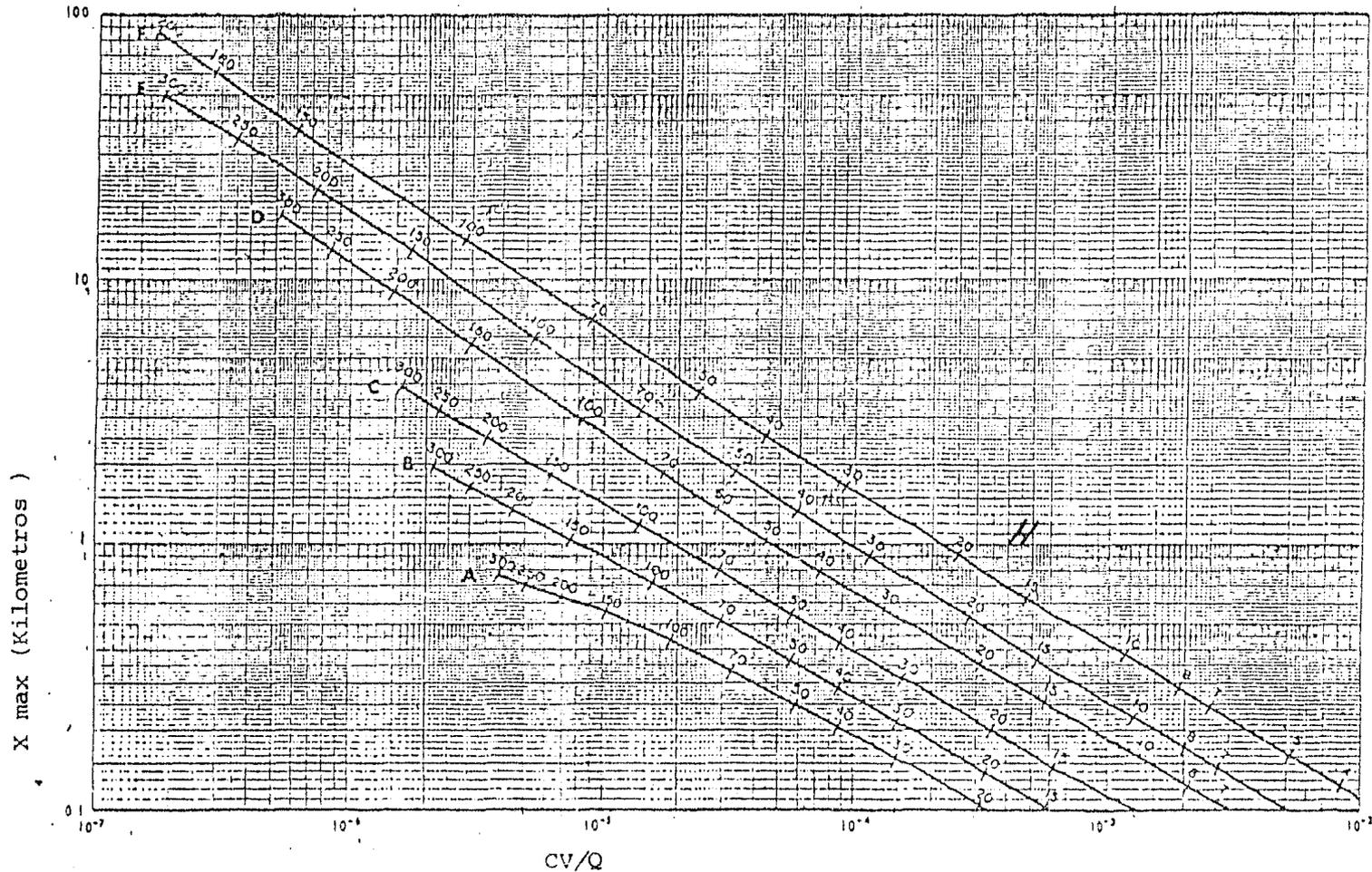


Fig. 12 Distancia de máxima concentración y máxima  $CV/Q$  como una función de la estabilidad y altura efectiva.

## IV a 6 - USO DE NOMOGRAMAS EN EL CALCULO DE LA ALTURA EFECTIVA.

Como hemos visto en la literatura existen gran número de formulas para calcular la elevación de la pluma sobre una chimenea. Para cálculos rápidos es común obtener la elevación por medio de nomogramas: A continuación se describe (32) el uso de uno de estos, basado en la proporción de calor que emite una chimenea y en la ecuación de Holland para el cálculo de elevación de la pluma.

Las ecuaciones involucradas son las siguientes:

$$QH = 263 D^2 PV_s PM C_p \frac{T_s - T_a}{T_s} \quad (4.8)$$

Donde:

QH = Emisión de calor, BTU/hr

D = Diametro de la chimenea, FT.

Vs = Velocidad de expulsión de los gases, FT/seg

P = Presión atmosférica, psia.

(14.7 usado en este nomograma).

Cp = Calor específico BTU/lb<sup>o</sup>R (0.242 usado en el nomograma).

Ta = Temperatura ambiente, <sup>o</sup>R.

Ts = Temperatura de salida de los gases, <sup>o</sup>R

PM = Peso molecular del efluente, lb

(29.3 usado en este nomograma).

Si es necesario usar valores de P, Cp, PM que difieran apreciablemente de los usados en la construcción del nomograma el valor de Q<sub>H</sub> encontrado puede ser multiplicado por cual

quiera o el total de los factores siguientes:

P/14.7, CP/0.242, PM/29.3 como sea requerida..

$$Z = \left( \frac{1}{V} \right) (1.5 V_s D + 0.04 QH) \text{ ---- (4.9)}$$

Donde:

Z = altura de la pluma, metros

V = velocidad de viento, m/seg.

V<sub>s</sub> = Velocidad de expulsión de los gases, m/seg.

QH = Emisión de calor de la chimenea, Kcal/seg.

D = Diametro de la chimenea, m.

El nomograma para elevación de la pluma muestra valores en ambas unidades inglesas y metricas. El nomograma para emisión de calor tiene dos escalas para diámetros de chimeneas y velocidades de emisión de calor, las dos escalas A de berán utilizarse simultaneamente, al igual que las B.

#### Ejemplo 7

Una chimenea de 10 FT de diametro tiene una velocidad de expulsión de gases de 39 FT/seg y una temperatura de salida de 540 °F, cuando la temperatura ambiente es de 70 °F. Encontrar la velocidad de Emisión de calor, si la velocidad del viento es de 18 millas/hr cuanto se elevará aproximadamente la pluma sobre la chimenea?

Solución:

Sobre el nomograma de velocidad de emisión de calor:

(1) Conectar 540 °F de la escala ts con 70 °F de la es

cala ta y marcar la intersección con la línea pivote No 1; (2) conectar este punto con 39 Ft/seg de la escala Vs y marcar el punto de cruce con la línea pivote No 2; (3) Usando la escala A, para D y QH alinear el punto marcado en la línea pivote 2 con 10 Ft de la escala D y prolongar hasta la escala - QH donde se leerá la respuesta. En este caso 50.2 millones - de BTU/Hr.

#### Nomograma de elevación de pluma

(1) Alinear 39 Ft/seg de la escala Vs con 10 Ft de la escala D y extender hasta la línea pivote No 1; (2) conectar este punto con 50.2 millones BTU/Hora de la escala QH marcando el punto de intersección con la línea pivote No 2; (3) conectar este punto con 18 millas/hora de la escala V y leer en la escala de altura de la pluma, en este caso la pluma se eleva cerca de 80 pies.

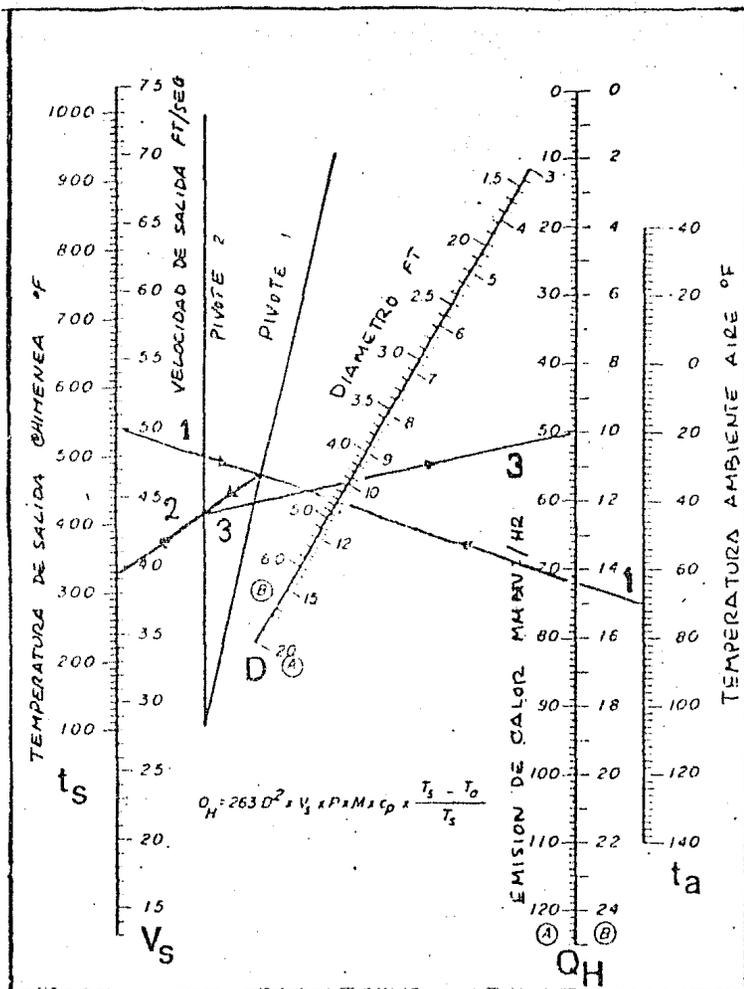


Fig. 13 .- Nomograma de velocidad de emisión de calor.

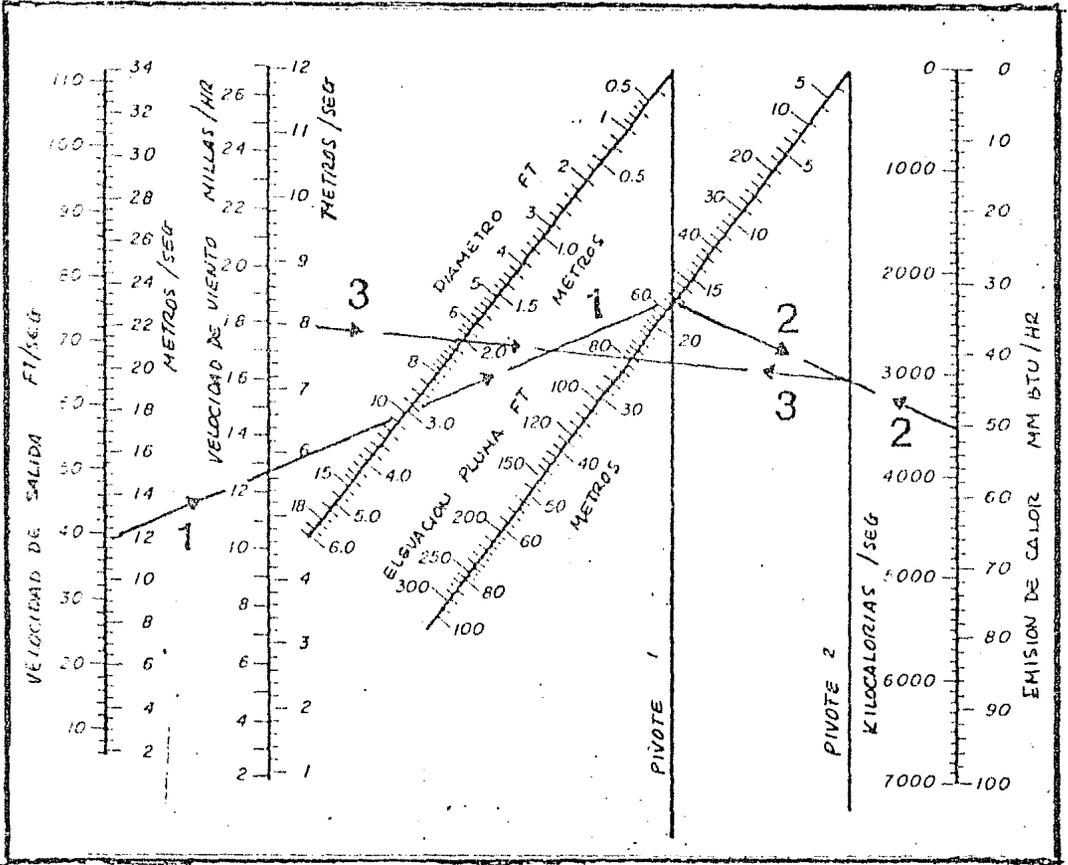


Fig. 14 .- Monograma de elevación de pluma.

## IV b) CONCENTRACIONES A NIVEL DE PISO

## IV b 1.- CONSIDERACIONES GENERALES

Se han desarrollado un gran número de ecuaciones para determinar a nivel de piso las concentraciones de contaminante emitidos por una chimenea.

Las consideraciones formuladas, para el desarrollo de ecuaciones, suponen que la pluma de la chimenea tiene forma conica (Pluma gaussiana) cuyas características se determinan por la altura efectiva, la distancia desde la chimenea y una distribución normal de contaminantes en la dirección vertical y horizontal (Cap. III d).

A continuación se detallan y ejemplifican las más importantes ecuaciones de Difusión.

## IV b 2.- ECUACION DE BOSANQUET.

La ecuación es la siguiente:

$$C_0 = \frac{M}{4.44 \, pq \sqrt{XZ}} e^{-a} \quad \text{---- (4.10)}$$

$$\text{donde } a = \frac{H}{PX} + \frac{Y^2}{2q^2 X^2}$$

$C_0$  = Concentración fraccional (en volumen) del gas de chimenea en aire a nivel de piso, adimensional

$M$  = Relación de volumen de emisiones de gases de chimenea,  $\text{ft}^3/\text{min}$

$V$  = Velocidad del viento, ft/min

$X$  = Distancia de la chimenea, ft

$H$  = Altura efectiva de chimenea, ft

$p$  = Coeficiente vertical de difusión, 0.05

$q$  = Coeficiente horizontal de difusión, 0.08

$Y$  = Distancia del eje longitudinal de la pluma, ft.

En la literatura se han reportado diferentes valores para los coeficientes de difusión  $p$  y  $q$ . Los mostrados a continuación pueden ser usados en ausencia de valores determinados, ya que son un promedio de los mismos para cualquier localización en particular.

Turbulencia baja (debil)  $p = 0.02$  ,  $q = 0.04$

Turbulencia Normal  $p = 0.05$  ,  $q = 0.08$

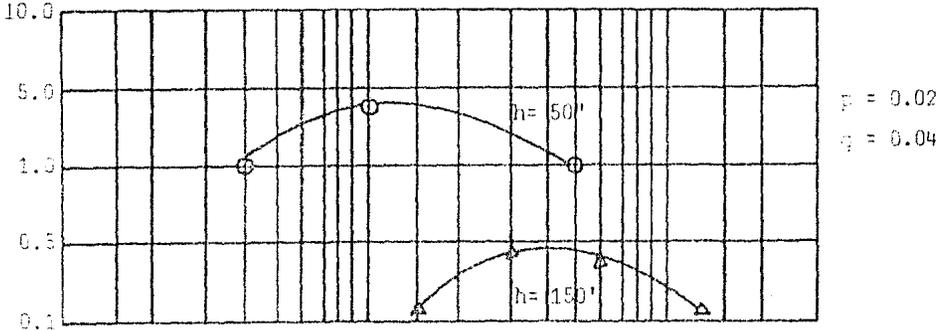
Turbulencia Moderada  $p = 0.10$  ,  $q = 0.16$

La figura 15 muestra los efectos en la variación de  $p$  y  $q$  para  $M = 10 \text{ ft}^3/\text{min}$  y  $v = 100 \text{ ft}/\text{min}$ .

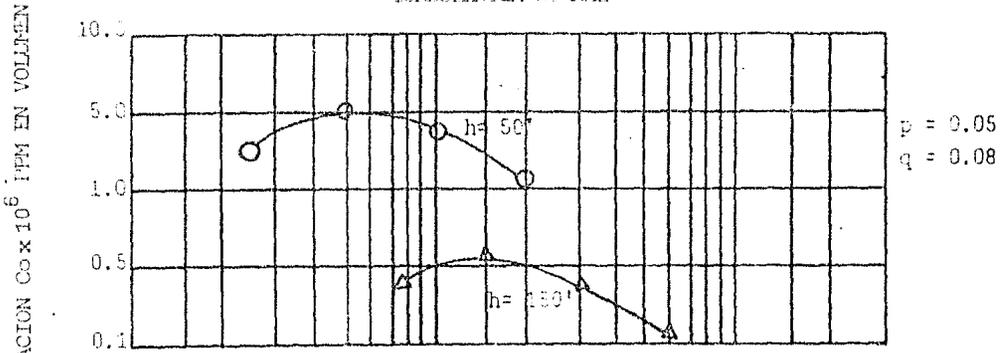
#### Ejemplo 8

50 000 CFM contienen 0.2% en volumen de HF, son expulsados por la chimenea de un proceso químico. La altura efectiva de la chimenea es de 150 ft y la velocidad del viento es de 10 millas/hr. Calcular la concentración de HF en la pluma como una función de la distancia desde la chimenea.

BAJA TURBULENCIA



TURBULENCIA NORMAL



TURBULENCIA MODERADA

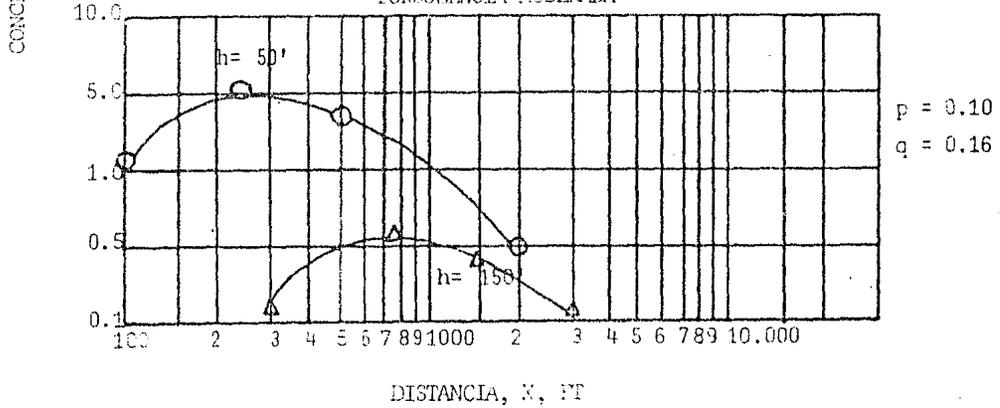


Fig. 15 Variación de los coeficientes vertical y horizontal de difusión.

La máxima concentración ocurrirá, donde  $y = 0$ , por lo tanto

$$a = \frac{H}{pk}$$

Suponiendo una turbulencia normal,  $p = 0.05$ ,  $q = 0.08$

$$a = \frac{150}{0.05 \cdot x} = \frac{3000}{x}$$

$$M = (0.002) (50\,000) = 100 \frac{\text{FT}^3 \text{ HF}}{\text{min}}$$

$$V = (10) (1.465) (60) = 879 \text{ FT/min}$$

$$C_0 = \frac{100}{(4.44) (0.05) (0.08) (879) x^2} e^{-\frac{3000}{x}}$$

$$C_0 = \frac{6.41}{x^2} e^{-\frac{3000}{x}}$$

resolviendo tabularmente se tiene:

x	$x^2$	$6.41/x^2$	$e^{-\frac{3000}{x}}$	$C_0$
300	$0.9 \times 10^5$	$7.12 \times 10^{-5}$	$0.045 \times 10^{-3}$	$0.0032 \times 10^{-6}$
600	$3.6 \times 10^5$	$1.785 \times 10^{-5}$	$6.76 \times 10^{-3}$	$0.121 \times 10^{-6}$
1000	$10 \times 10^5$	$0.541 \times 10^{-5}$	$49.8 \times 10^{-3}$	$0.319 \times 10^{-6}$
1500	$22.5 \times 10^5$	$0.286 \times 10^{-5}$	$135 \times 10^{-3}$	$0.386 \times 10^{-6}$
3000	$90 \times 10^5$	$0.0714 \times 10^{-5}$	$368 \times 10^{-3}$	$0.263 \times 10^{-6}$

El ejemplo anterior muestra que la concentración máxima ocurre a aproximadamente 10 veces la altura de la chimenea.

Pruebas experimentales reportan que la máxima concentra

ción a nivel de piso ocurre generalmente entre 5 y 10 veces - la altura de la chimenea.

La ecuación de Bosanquet puede también aplicarse a problemas de chimeneas en donde el contaminante en el aire es un aerosol, tal como neblina de ácido sulfúrico o neblina de ácido fosfórico.

Esta aplicación se ilustra en el siguiente ejemplo:

#### Ejemplo 9

50 000 CFM contienen 10 mg de neblina de ácido fosfórico por Ft<sup>3</sup>, son expulsados por la chimenea de una planta de ácido fosfórico. La altura efectiva de la chimenea es de 150 Ft y la velocidad de viento es de 10 mph. Calcule la concentración de neblina a nivel de piso como una función de la distancia desde la chimenea.

Del ejemplo 8 para  $p = 0.05$  y  $q = 0.08$

$$a = \frac{3000}{x} \quad v = 879 \text{ Ft/min}$$

Si nosotros consideramos

$$C_0 = \frac{\text{Volumen total de gases de chimenea}}{\text{Volumen de gases diluidos.}}$$

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{50000}{(4.44)(0.05)(0.08)(879)x^2} e^{-3000/x} \\ &= \frac{3203}{x} e^{-3000/x} \end{aligned}$$

Los valores de Co serán 500 veces más grandes que los reportados en el ejemplo 8, el valor de Co será la concentración Fraccional del total de los gases de chimenea en la atmósfera. Multiplicando valores de Co por 10 mg de neblina por FT<sup>3</sup>. La concentración de neblina en la atmósfera puede ser calculada de la siguiente forma:

x	$3203/x^2$	$e^{-3000/x}$	Co	Concentración de neblina
300	$35.6 \times 10^{-3}$	$0.045 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-6}$	$0.016 \times 10^{-3}$ mg/Ft <sup>3</sup>
600	$8.9 \times 10^{-3}$	$6.76 \times 10^{-3}$	$60 \times 10^{-6}$	$0.60 \times 10^{-3}$ "
1000	$3.2 \times 10^{-3}$	$49.3 \times 10^{-3}$	$159 \times 10^{-6}$	$1.59 \times 10^{-3}$ "
1500	$1.42 \times 10^{-3}$	$135 \times 10^{-3}$	$192 \times 10^{-6}$	$1.92 \times 10^{-3}$ "
3000	$0.035 \times 10^{-3}$	$368 \times 10^{-3}$	$131 \times 10^{-6}$	$1.31 \times 10^{-3}$ "

### III b). - MODIFICACION DE STEINBOCK

Steinbock (36) ha presentado una modificación de la ecuación de Bosanquet conjuntamente con graficas que ayudan a la solución.

El ha presentado la siguiente:

$$C = 9.4 \times 10^6 \frac{G}{v X^2} K \quad (4.11)$$

en donde  $K = e^{-20H/X}$

C = Concentración a nivel de piso, ft<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> por 10<sup>6</sup> ft<sup>3</sup> de aire (Para convertir a otro gas, que no sea SO<sub>2</sub> - multiplicar por 64.06/Peso molecular del gas).

G = Velocidad de emisión de contaminantes, TONS/día

V = Velocidad del viento, millas /hr.

X = Distancia desde la chimenea, FT

H = Altura efectiva de la Chimenea, FT.

Una ecuación para la máxima concentración a nivel de piso puede derivarse diferenciando la ecuación anterior. La concentración máxima,  $C_{max}$ , puede calcularse como sigue:

$$C_{max} = \frac{12700 G}{V H^2} \frac{(64.06)}{PM} \quad \text{---- (4.12)}$$

Donde G, V, H fueron definidas anteriormente, PM se refiere al peso molecular del gas contaminante.

Los valores de K estan dados en la figura 16.

El uso de esta gráfica y la ecuación que presenta Steinbock se demuestran con el siguiente ejemplo:

Ejemplo 10

Para la chimenea descrita en el ejemplo 8, calcular la concentración a nivel de piso como una función de la distancia desde la chimenea y usando las ecuaciones presentadas por Steinbock. Suponer que los gases se descargan a 400 °F y 14.7 psia, tambien calcular la concentración máxima en el piso.

$$C.F.M. \quad HF = (0.002) (50000) = 100$$

De la Ley de los gases ideales,

$$W = \frac{PM PV}{RT} = \frac{(20) (14.7) (100)}{(10.71) (860)}$$

$$= 3.19 \text{ Lb HF/min}$$

DISTANCIA DE LA CHIMENEA, X, FT

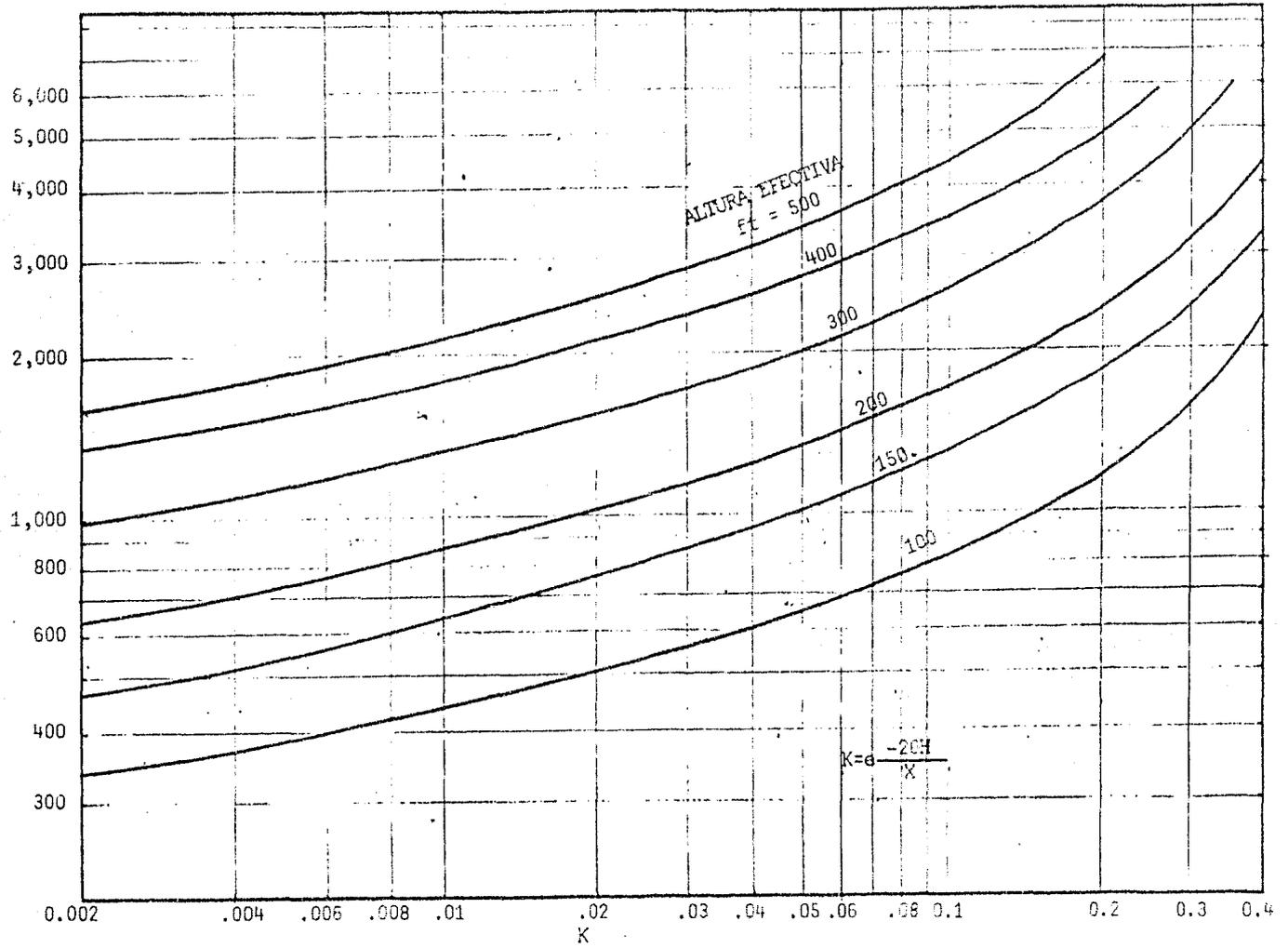


Fig. 16 Valores de K

$$Q = \frac{(60)(3.19)(24)}{2000} = 2.30 \text{ Ton HF/Día}$$

$$V = 10 \text{ mph}$$

Valores de K pueden ser encontrados en la figura número-15, para varios valores de x.

El valor calculado de C debe multiplicarse por 64.06/PM de HF (x20) entonces:

$$C_{HF} = \frac{64.06}{20} \times C_{SO_2} = \frac{(64.06)(9.4 \times 10^6)(2.30)}{(20)(10)x^2} K$$

$$= 7 \times 10^6 \frac{K}{x^2}$$

La solución tabular es como sigue:

X	$x^2$	K	$C_0$ ppm
600	$3.6 \times 10^5$	$6.7 \times 10^{-3}$	0.130
1000	$10 \times 10^5$	$49.8 \times 10^{-3}$	0.349
1500	$22.5 \times 10^5$	$135 \times 10^{-3}$	0.420
3000	$90 \times 10^5$	$368 \times 10^{-3}$	0.286

La ecuación máxima puede calcularse aplicando la ecuación 4.12:

$$C_{max} = \frac{(12700)(2.30)(64.06)}{(10)(150)^2(20)} = 0.420 \text{ ppm}$$

Los valores de concentración calculados en el ejemplo 10 son esencialmente los mismos que para el ejemplo 8. El método de Steinbock no incluye una corrección para el cambio de -

densidad del gas contaminante debido a diferencias en temperatura o presión. Sin embargo, la cantidad de esta corrección en muchos casos puede ser pequeña y del mismo orden que la exactitud del método.

Steinbock presenta una gráfica simple para encontrar las concentraciones máximas a nivel de piso de contaminantes emitidos por chimeneas de varias alturas, con diferentes velocidades de viento y de emisión. Esta gráfica se da en la figura 17. El siguiente ejemplo ilustra su uso.

#### Ejemplo 11

Dioxido de Azufre es expulsado a la velocidad de 20 Tons por día a través de una chimenea de 150 Ft. Cuál es la concentración máxima en el piso cuando  $V = 10$  mph. Solución: Trace una línea vertical desde  $G=20$  bajando a la curva  $V = 10$  en la figura 17 prosiga horizontalmente hasta la curva  $H = 150$  y luego baje verticalmente para encontrar  $C_{max} = 1.1$  ppm.

#### Ejemplo 12

30 Tons por día de monóxido de carbono es descargado por una chimenea con una altura efectiva de 100 FT. Cuál es la concentración máxima en el piso de  $CO$  cuando la velocidad de viento es de 5 mph?

Solución:

Dibuje una línea vertical desde  $G = 30$  a la curva  $V = 5$  en la figura 17, luego procedase horizontalmente a la curva  $H = 100$  y baje verticalmente para encontrar  $C_{max} = 8$  ppm. de  $SO_2$  luego convierta a  $CO$ .

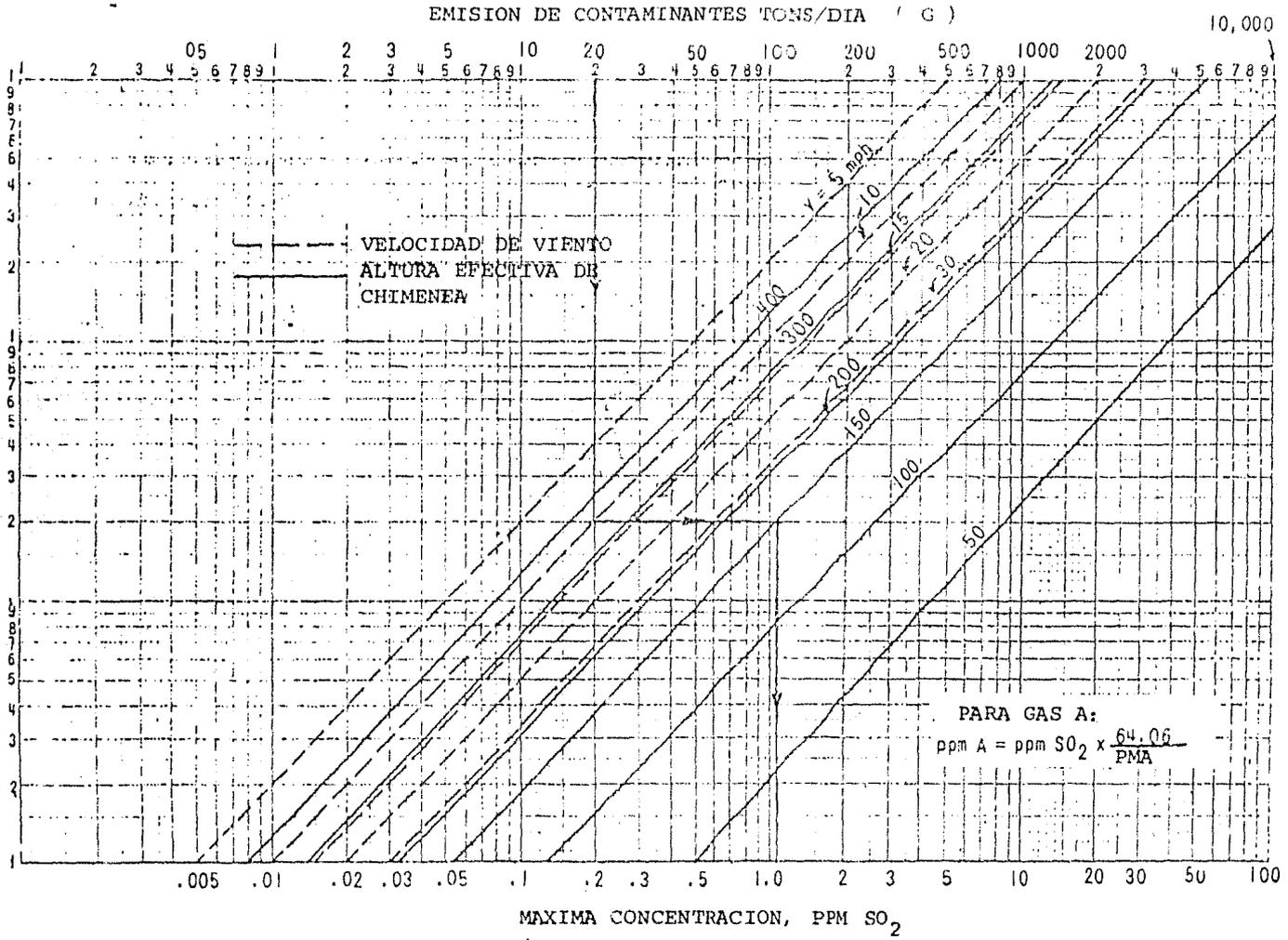


FIG. 17 MODIFICACION GRAFICA DE STEINBOCK

$$\frac{(8) (64.06)}{28} = 18.3 \text{ ppm}$$

28

## IV b 4.- ECUACION DE DIFUSION DE SUTTON

La ecuación de Sutton puede usarse de manera similar a la de Bosanquet.

La principal ecuación es como sigue:

$$C = \frac{2Q}{\pi C_y C_z V x^{2-\varphi}} e^{-a} \quad (4.13)$$

Donde

$$a = \frac{1}{x^{2-\varphi}} \left[ \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{h^2}{C_z^2} \right]$$

C = Concentración de contaminantes a nivel de piso,  $g/m^3$

V = Velocidad media del viento, m/seg.

x = Distancia desde la chimenea, m.

h = Altura de la chimenea, m.

y = Distancia normal al eje principal del flujo, m.

Q = Velocidad de emisión de material, g/seg.

$C_y$  = Coeficiente de difusión a lo largo del eje y.

$C_z$  = Coeficiente de difusión a lo largo del eje z.

$\varphi$  = Índice de turbulencia, adimensional, un número entre 0 y 1, (0.2 para un gran decremento de temperatura con la altura, 0.25 para condiciones promedio, y de 0.33 a 0.5 para incremento de temperatura con la altura).

Pruebas en campo han mostrado que la ecuación de Sutton es similar a los resultados de Bosanquet (2). Ya que la ecuación de Bosanquet es fácil de aplicar, el uso de la ecuación de Sutton no será demostrado aquí. La ilustración de esta ecuación la efectuó Thomas y colaboradores en la referencia (40).

#### IV b5. - ECUACION DE DIFUSION DE PASQUILL-GIFFORD

Esta ecuación esta basada en el modelo de dispersión - - Gaussiana para fuentes puntuales continuas como se especifica en el inciso "d" del capítulo 3, el modelo nos permite calcular la concentración (C) a nivel del piso de contaminante proveniente de una fuente puntual, en función del gasto de contaminante (Q), la velocidad del viento (V), la altura efectiva de emisión (H) y la estabilidad atmosférica. La ecuación a utilizar se definió en el capítulo anterior como la 3.23.

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zV} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \text{----- (3.23)}$$

Esta ecuación es valida cuando la difusión en la dirección del viaje de la pluma puede ser despreciada, esto significa que no haya difusión en el sentido del eje de las x, esto puede ser supuesto si la expulsión es continua, ó si la duración de la expulsión es igual o mayor que el tiempo de viaje ( $x/v$ ) de la fuente al punto de interés.

Para concentraciones calculadas a nivel de piso ( $z = 0$ ) - la ecuación se simplifica a:

$$C(x, y, 0; H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z V} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (3.23a)$$

cuando la concentración se calcula a lo largo del centro de la pluma ( $y=0$ ) la ecuación continúa simplificandose:

$$C(x, 0, 0; H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z V} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (3.23 b)$$

Para una fuente a nivel de piso, que no tiene altura efectiva ( $H = 0$ ) la ecuación se reduce en:

$$C(x, 0, 0; 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z V} \quad (3.23c)$$

El siguiente problema muestra estas variaciones

### Ejemplo 13.

Se estima que 80 g/seg de  $SO_2$  son expulsados de una refinería de petróleo que tiene una chimenea de 60 m de altura - - efectiva. Cuál será la concentración a nivel de piso cuando -  $x = 500$   $y = 50$  para condiciones de estabilidad de clase D y - una velocidad de viento de 6 m/seg?

### Solución:

De la referencia 42 a  $x = 500$  m  $\sigma_y = 36$ ,  $\sigma_z = 18.5$  m utilizando la ecuación 3.23 a

$$C(500, 50, 0; 60) = \frac{80}{\pi (36)(18.5)(6)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{50}{36} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{60}{18.5} \right)^2 \right]$$

$$C(500, 50, 0; 60) = 1.3 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3 \text{ de } SO_2$$

Si  $y = 0$

$$c(500,0,0;60) = \frac{80}{\pi(36)(18.5)(6)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{60}{18.5} \right)^2 \right]$$

$$c(500,0,0;60) = 3.3 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3 \text{ de SO}_2$$

Si los gases no fueran expulsados por ninguna chimenea-  
(H=0) el resultado sería:

$$c(500,0,0;0) = \frac{80}{\pi(36)(18.5)(6)}$$

$$c(500,0,0;0) = 6.37 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3 \text{ de SO}_2.$$

## IV c) APLICACION DE RESULTADOS DE TUNELES DE VIENTO

En la sección IIIa se describió el uso de un tunel de viento y su aplicación al diseño de chimeneas. A continuación se ilustran los resultados obtenidos experimentalmente.

## Ejemplo 14

Cual será la  $V_{cr}$  para una chimenea de 20 ft de diametro interno, 200 ft de altura, bloqueada por un edificio, si se descargan gases a  $170^{\circ}\text{F}$  y con una velocidad de expulsión de 20 y 60 ft/seg?

## Solución:

Refiriendose a la figura 4, la velocidad critica de viento para 20 ft/seg de velocidad de expulsión será de 14 mph y para 60 ft/seg de 25 mph.

El ejemplo anterior muestra como la velocidad de expulsión del gas afecta a la contaminación en chimeneas de gran diametro. Este efecto no es tan significativo para una chimenea de diametro pequeño.

El ejemplo ha tambien demostrado como los resultados de tuneles de viento pueden aplicarse al diseño de chimeneas.

Los datos presentados en la figura 4 pueden evaluarse en terminos de altura efectiva, como se explica en la sección IVa. La tabla siguiente resume estos datos para diferentes velocidades de viento y de alturas de chimenea.

## a) Chimenea de 100 FT

Velocidad de viento (mph)	Elevación de la Pluma (ft)	Altura de Chimenea + Elevación
6	64	164
8	105	205
10	131	231
12	149	249
16	171	271

## b) Chimenea de 200 ft

Velocidad de viento	Elevación de la Pluma	Altura de Chimenea + Elevación
12	25	225
14	58	268
17	52	252
20	80	280
26	95	295

Los datos anteriores se graficaron en la figura 18. In-  
distintamente los puntos para 100 ft y 200 ft de altura de -  
Chimenea caen en una sola curva.

La aplicación de la figura 18 se muestra con los si- -  
guientes ejemplos:

## Ejemplo 15

Una chimenea de 150 ft de altura, maneja un gasto de -  
50000 ft<sup>3</sup>/min a 50°C y una velocidad de expulsión de los ga-  
ses de 80 ft/seg, bajo estas condiciones cuál será la velo-  
cidad crítica de viento y la altura efectiva de la Chimenea?

$$Q_1 = \frac{(50000) (293)}{(60) (323)} = 756 \frac{\text{ft}^3}{\text{seg.}}$$

Suponiendo una velocidad del viento de 10 mph ( $14.65 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}$ ) y refiriéndose a la figura 10, se obtiene:

$$\frac{Z_{\max}}{\sqrt{Q_1}} = 2.7$$

$$Z_{\max} = 2.7 \sqrt{756} = 74.2 \text{ ft}$$

La altura es:

$$H = 150 + 74.2 = 224 \text{ ft}$$

El punto (10,224) caé en la curva de la figura 18, por lo tanto el valor supuesto de 10 mph de velocidad de viento, corresponde a la velocidad crítica de viento ( $V_{cr}$ ).

#### Ejemplo 16

Repetir el ejemplo 15 variando el gasto a  $10000 \text{ ft}^3/\text{min}$  considerando las demas condiciones iguales

$$Q_1 = \frac{757}{5} = 151.4 \frac{\text{ft}^3}{\text{seg.}}$$

Suponiendo  $V = 7 \text{ mph}$  ( $10.25 \text{ ft/seg}$ )

De la figura 10

$$\frac{Z_{\max}}{\sqrt{Q_1}} = 3.95$$

$$Z_{\max} = 3.95 \sqrt{151.4} = 48.6 \text{ ft.}$$

La altura efectiva de la chimenea es igual a la altura-

física de la chimenea mas la elevación de la pluma

$$H = 48.6 + 150 = 198.6 \text{ ft.}$$

El punto (7,198.6) estan cerca de la curva de la figura 18, asi que la suposición es satisfactoria.

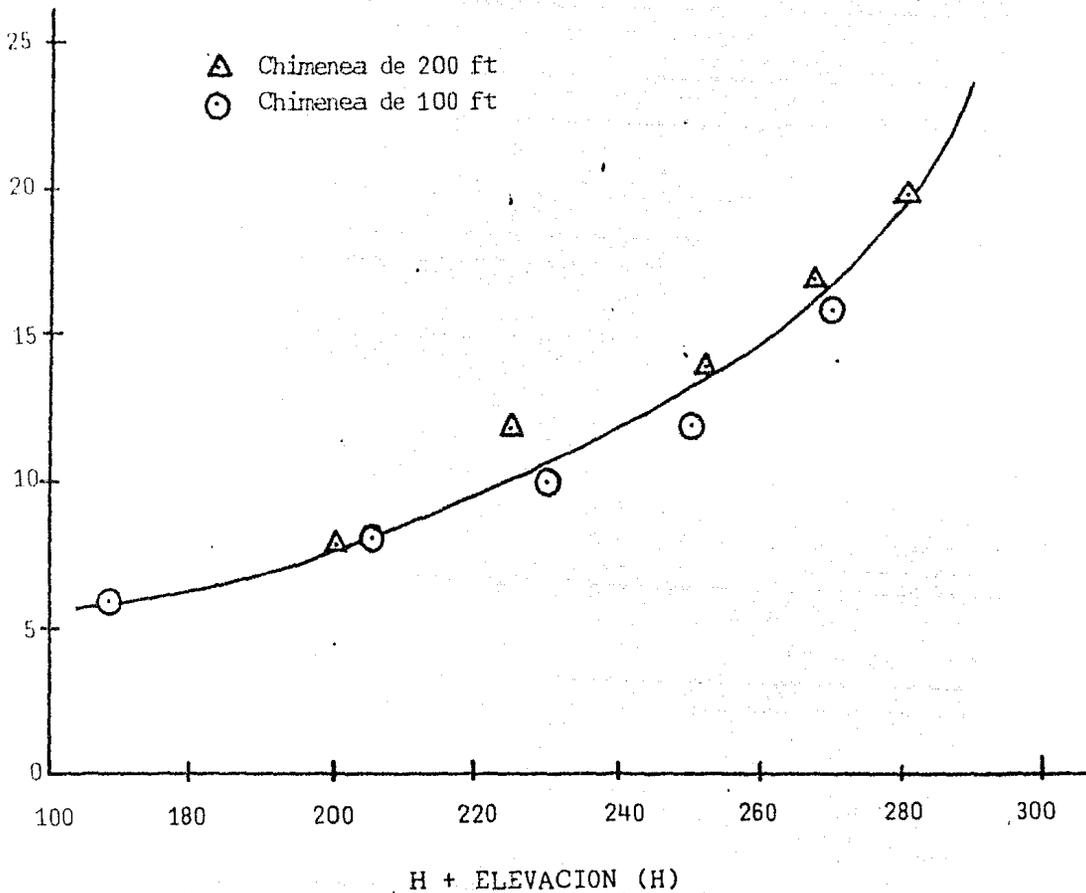


Fig. 18- Velocidad crítica de viento como una función de h + elevación

#### IV d) DISEÑO DE CHIMENEAS BASADO EN CALCULOS DE ALTURA EFECTIVA Y DIFUSION ATMOSFERICA.

En la sección anterior los ejemplos mostraron como se incrementa la contaminación cuando las chimeneas tienen un gran diametro; en esta sección veremos como afectan las concentraciones a nivel de piso en el diseño de una chimenea.

El instalar chimeneas de gran altura normalmente con lleva un gran costo de construcción, por lo tanto un diseñador deberá tomar en cuenta que la altura de una chimenea sea mínima y con un costo razonable. Por eso es necesario conocer una velocidad óptima de expulsión de gases y aumentar la altura efectiva de la chimenea.

##### IV d 1.-VELOCIDADES OPTIMAS DE EXPULSION

Como se mostró en la sección IVA, las velocidades altas de expulsión de gases incrementan la altura efectiva de una chimenea. Estas también incrementan la caída de presión en el sistema y los costos de operación. Un método para reducir lo expuesto es instalar boquillas en el tope de la chimenea. Con esto la caída de presión puede reducirse y mantenerse la velocidad de expulsión alta.

La caída de presión através de una boquilla para diferentes velocidades de expulsión y coeficientes de boquilla, se presentan en la siguiente Tabla:

## CAIDA DE PRESION EN LA BOQUILLA\*

Velocidad de expulsión (FT/seg)	Coefficiente de la Boquilla (adimensional)	Caida de Presión (in H <sub>2</sub> O)
60	0.98	0.318
60	0.70	0.625
80	0.98	0.820
80	0.70	1.740
100	0.98	1.620
100	0.70	3.180

\*La caída de presión debido a la boquilla varía con el diseño de esta.

Las boquillas normalmente se diseñan con coeficientes entre 0.7 y 0.98.

De la tabla anterior se observa que una boquilla bien diseñada puede dar una velocidad de expulsión elevada con una caída de presión razonable.

## IV a 2.- BOQUILLAS PARA CHIMENEAS

El uso de boquillas para chimeneas se ilustra con los siguientes ejemplos:

## Ejemplo 17

16000 ft<sup>3</sup>/min a 70°C son expulsados por una chimenea de una planta de ácido sulfúrico con velocidad de 15 ft/seg. Preparar una gráfica que muestre la elevación de la pluma a la presente velocidad (15 ft/seg) y para una boquilla de velo

idad de expulsión de 100 ft/seg.

$$Q_1 = \frac{(16000)(273 + 20)}{(60)(273 + 70)} = 228 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

$$\sqrt{Q_1} = 15.1$$

Refiriéndose a la figura 10, la elevación de la pluma -  
fué calculada como sigue:

V ft/seg	Vs = 15		Vs = 100	
	Zmax/ $\sqrt{Q_1}$	Zmax	Zmax/ $\sqrt{Q_1}$	Zmax
5	3.2	48	9.3	140
10	1.4	21	4.6	69
20	0.6	9	2.2	33
30	0.3	4.5	1.4	21

El resultado de la elevación de la pluma se grafico' como  
la figura 19.

Ejemplo 18

Repetir el ejemplo 17 para 50000 ft<sup>3</sup>/min, los demas fac-  
tores son los mismos.

$$Q_1 = \frac{(50000)(293)}{(60)(343)} = 712 \text{ ft}^3/\text{seg}$$

$$\sqrt{Q_1} = 26.7$$

de la figura 10 la elevación fué evaluada como sigue:

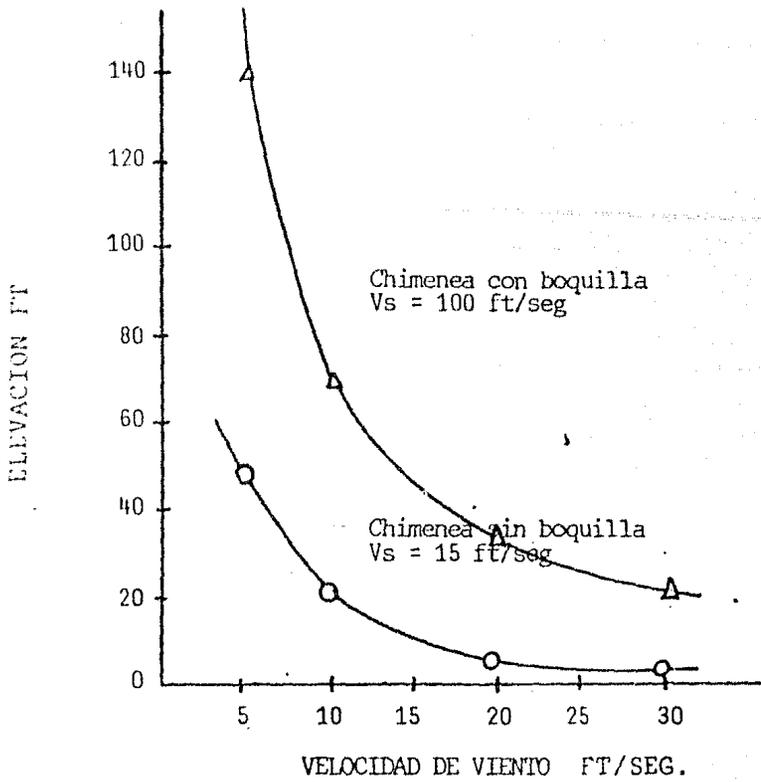


Fig. 19 Solución problema 17

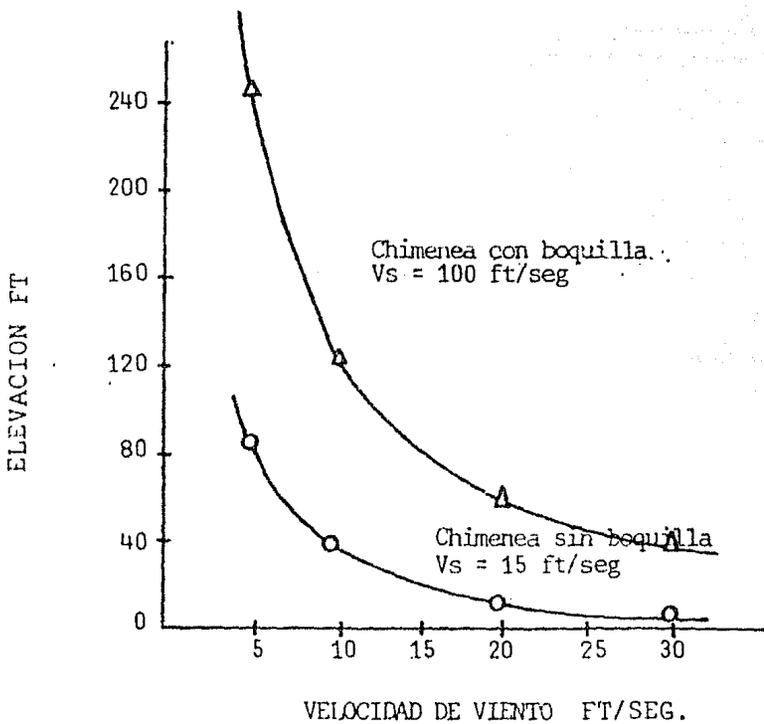


Fig. 20 Solución problema 18

V ft/seg	Vs = 15		Vs = 100	
	$Z_{max}/\sqrt{Q_1}$	$Z_{max}$	$Z_{max}/\sqrt{Q_1}$	$Z_{max}$
5 ft/seg	3.2	85	9.3	248
10	1.4	37	4.6	122
20	0.6	16	2.2	58
30	0.3	8	1.4	37

Los resultados se graficaron como la figura 20.

### Ejemplo 19

Actualmente una planta opera con 3 unidades de ácido localizadas una junto a otra, cada unidad posee una chimenea pequeña que descarga  $16000 \text{ ft}^3/\text{min}$  a  $70^\circ\text{C}$  a una velocidad de expulsión de 15 ft/seg.

Ya que existen problemas de contaminación bajo las presentes condiciones el departamento de ingeniería considera - instalar chimeneas mas altas y/o el uso de boquillas para eliminar dichos problemas. Cúal será el efecto esperado en la elevación de la pluma?

- Bajo las presentes condiciones.
- Si se diseñaran boquillas con velocidades de expulsión de 100 ft/seg y fueran instaladas en las chimeneas actuales.
- Si se instalara una chimenea común, dando una velocidad de expulsión de 15 ft/seg.

d) O si se instalara una chimenea comun dando una velocidad de expulsión de 100 ft/seg, al instalarse una boquilla.

Estas condiciones corresponden a los casos presentados - en los ejemplos 17 y 18 graficados en las figuras 19 y 20.

Las posibles soluciones al presente problema se muestran graficamente en la figura 21.

Como se muestra en la figura, si se instalaran boquillas en las chimeneas actuales aumentaría la velocidad de expulsión y se incrementaría la elevación de la pluma, si se instalara una chimenea comun respetando la actual velocidad de expulsión de los gases, tambien causaría este efecto pero con una menor elevación de la pluma, sin embargo la mejor solución es una chimenea comun con una velocidad de expulsión de 100 ft/seg causada por una boquilla.

Las curvas presentadas en la figura dependen de la suposición de que la pluma se descarga lo suficientemente alto para escapar a la turbulencia causada por el edificio.

A baja velocidad de expulsión, las plumas probablemente puedan afectarse por la turbulencia al salir de la chimenea, a si que la boquilla servirá a 2 propositos:

- i) Expulsar la pluma lo suficientemente alto para escapar de la turbulencia creada por la chimenea y edificios.

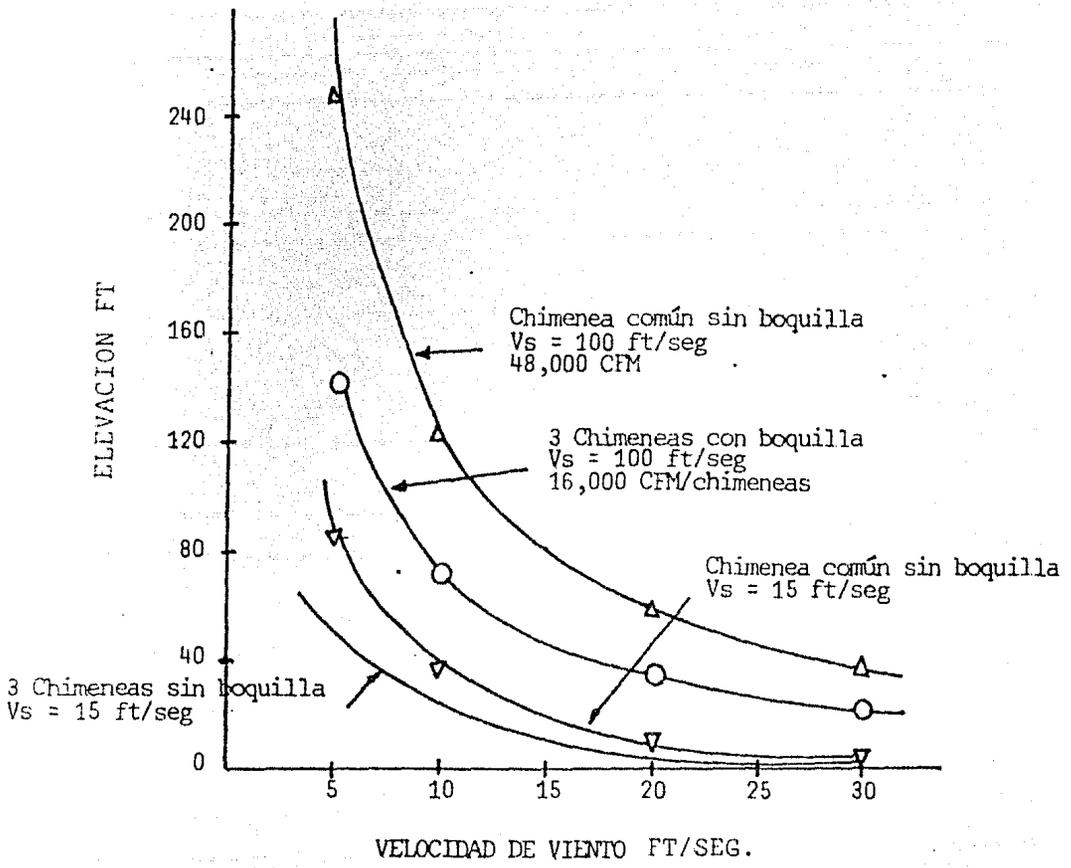


Fig. 21- Solución al ejemplo 19

ii) Dar una mayor elevación a la pluma

IV d 3.- PREDICCIÓN DE CONCENTRACIONES A NIVEL DE PISO

En la sección IVa y IVb se describieron los métodos más comunes, para calcular la altura efectiva de una chimenea y las concentraciones de contaminante a nivel de piso.

En esta parte de la sección d se pretende dar una aplicación global a los métodos antes mencionados desarrollándose bajo la secuencia de un solo problema presentado a continuación.

#### Ejemplo 20

Actualmente una planta opera con tres unidades de ácido, localizadas una junto a otra. Cada unidad tiene una chimenea de 70 ft de altura, que descarga 16,000 ft<sup>3</sup>/min. de gases a 70°C, con una velocidad de expulsión de 15 ft/seg.

Como existen problemas de contaminación ambiental bajo las presentes condiciones, se está considerando la instalación de una chimenea común de 150 ft de altura, con una boquilla que registra una velocidad de expulsión de 100 ft/seg.

Las actuales chimeneas expulsan gases que contienen 10 mg. de neblina de ácido por pie cúbico.

Calcular las concentraciones a nivel de piso con velocidades de viento de 10, 20, 30 ft/seg. a varias distancias de las instalaciones existentes y de la propuesta.

(Suponer que la turbulencia causada por el edificio no es un factor para las chimeneas presentes).

Solución:

Para cada una de las tres chimeneas, la elevación de la pluma por diferencia de densidades puede calcularse como sigue:

$$Q_1 = \frac{(16000)(293)}{(60)(343)} = 228 \text{ ft}^3/\text{seg} @ 20^\circ\text{C}$$

$$T = 70 + 273 = 343 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 293 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$V = 10, 20 \text{ y } 30 \text{ ft/seg}$$

$$V_B = 15 \text{ ft/seg}$$

$$\frac{(T - T_1)g}{T_1} \sqrt{\frac{Q_1}{V_S}} = \frac{(343 - 293)(32.2)}{293} \sqrt{\frac{228}{15}} = 21.4$$

Para  $V = 10$ ,  $V^2 = 100$  así que la condición es satisfactoria para todos los valores de  $V$  bajo consideración, ya que  $V^2 > 21.4$ .

$$X = \frac{3.57 \sqrt{Q_1 V_S}}{V} x = \frac{3.57 \sqrt{(228)(15)}}{V} x = \frac{209x}{V}$$

$$Z = \frac{6.57g Q_1 (T - T_1) z}{V^3 T_1} = \frac{(6.57)(32.2)(228)(50)z}{V^3 (293)} = \frac{7980}{V^3} z$$

La elevación de la pluma por diferencia de densidades a varias distancias desde la chimenea puede calcularse en forma tabular como sigue:

## ELEVACION POR DIFERENCIA DE DENSIDADES.

X ft	V ft/seg	x	z	$v^3$	Z ft
350	10	17	3.9	$1 \times 10^3$	31
350	20	33	5.2	$8 \times 10^3$	4
350	30	50	6.0	$27 \times 10^3$	2
700	10	33.5	5.2	$1 \times 10^3$	42
700	20	67	6.5	$8 \times 10^3$	6
700	30	100	7.2	$27 \times 10^3$	2
1400	10	67	6.5	$1 \times 10^3$	52
1400	20	134	8.0	$8 \times 10^3$	8
1400	30	200	8.0	$27 \times 10^3$	2
2800	10	134	8.0	$1 \times 10^3$	64
2800	20	268	8.0	$8 \times 10^3$	8
2800	30	400	8.0	$27 \times 10^3$	2

La elevación de la pluma por velocidad se calcula de los valores de máxima elevación calculados en el ejemplo 17

$$Z = Z_{\max} (1 - 0.8 Z_{\max}/x)$$

## ELEVACION POR VELOCIDAD.

X ft	V ft/seg	Z <sub>max</sub>	0.8 Z <sub>max</sub> /x	Z ft
350	10	21	0.048	20
350	20	6	0.014	6
350	30	3	0.007	3
700	10	21	0.024	20
700	20	6	0.007	6
700	30	3	0.003	3
1400	10	21	0.012	21
1400	20	6	0.003	6
1400	30	3	0.002	3
2800	10	21	0.006	21
2800	20	6	0.002	6
2800	30	3	0.001	3

La altura efectiva de la chimenea (suma de la altura física más la elevación por diferencia de densidad y velocidad) para --  
70 ft de chimenea es:

X ft	V ft/seg	H ft
350	10	121
350	20	80
350	30	75
700	10	132
700	20	82
700	30	75
1400	10	143
1400	20	84
1400	30	75
2800	10	155
2800	20	84
2800	30	75

Para una sola chimenea en común:

$$Q_1 = (3) (228) = 684 \text{ FT}^3/\text{seg}$$

$$T = 343 \text{ } ^\circ\text{K} \quad T_1 = 293 \text{ } ^\circ\text{K} \quad V = 10, 20 \text{ ó } 30 \text{ FT}^3/\text{seg}.$$

$$V_s = 100 \text{ FT}/\text{seg}.$$

$$X = \frac{3.57 \sqrt{Q_1 V_s}}{V} \quad x = \frac{3.57 \sqrt{(684) (100)}}{V} \quad x = 933 \frac{x}{V}$$

$$Z = \frac{6.37 \sqrt[3]{Q_1 (T-T_1)}}{V^3 T_1} \quad z = \frac{(6.37) (32.2) (684) (50)}{V^3 (293)} \quad z = 24000 \frac{z}{V^3}$$

La elevación de la pluma por diferencia de densidades a varias distancias desde la chimenea se calcula en forma tabular como sigue:

## ELEVACION POR DIFERENCIA DE DENSIDAD.

X ft	V ft/seg	Z	z	v <sup>3</sup>	Z ft
750	10	8	2.6	1000	62
750	20	16.1	3.8	8000	11
750	30	24.1	4.6	27000	4
1500	10	16.1	3.8	1000	91
1500	20	32.2	5.1	8000	15
1500	30	48.3	5.9	27000	5
3000	10	32.2	5.1	1000	122
3000	20	64.4	6.4	8000	19
3000	30	96.6	7.1	27000	6
6000	10	64.4	6.4	1000	154
6000	20	128.6	7.5	8000	22
6000	30	193.2	8.0	27000	7

La elevación de la pluma por velocidad puede ser calculada por los valores máximos presentados en el ejemplo 18.

$$Z = Z_{\max} (1 - 0.8 Z_{\max}/x)$$

## ELEVACION POR DIFERENCIA DE VELOCIDAD.

X FT	V ft/seg	Z <sub>max</sub>	0.8 Z <sub>max</sub> /x	Z FT
750	10	122	.13	106
750	20	58	.062	54
750	30	37	.040	35
1500	10	122	.065	114
1500	20	58	.031	56
1500	30	37	.020	36
3000	10	122	.033	118
3000	20	58	.015	57
3000	30	37	.010	37
6000	10	122	.016	120
6000	20	58	.008	58
6000	30	37	.005	37

La altura efectiva para los 150 FT de chimenea es:

X FT	V ft/seg	H FT
750	10	318
750	20	215
750	30	189
1500	10	355
1500	20	221
1500	30	191
3000	10	390
3000	20	226
3000	30	193
6000	10	424
6000	20	230
6000	30	194

Las concentraciones a nivel de piso pueden calcularse de las ecuaciones presentadas en la sección IV-b.

$$C_0 = \frac{(10 \text{ mg/FT}^3) M}{4.4 \text{ pqV x}^2} e^{-a}$$

Donde  $C_0$  = mg de niebla de acido/FT<sup>3</sup>

para todas las chimeneas consideradas las tres plumas serán mezcladas juntas, así que  $M = (3) (16000) = 48000$  CFM para las tres chimeneas y para la chimenea común.

$a = 20 \frac{H}{x}$  donde H es la altura efectiva

$$C_0 = \frac{(10) (48000)}{(4.44) (0.05) (0.08) Vx^2} e^{-20 \frac{H}{x}}$$

$$= \frac{2.7 \times 10^7}{V x^2} e^{-20 H/x}$$

Los valores de  $C_0$  se calculan en forma tabular como sigue:

## 70 FT. de Chimenea.

X ft	V ft/seg	H ft	20 H/x	$e^{-20 H/x}$	Co mg/ft <sup>3</sup>
350	10	121	6.91	.0010	$2.2 \times 10^{-2}$
350	20	80	4.57	.0103	$11.35 \times 10^{-2}$
350	30	75	4.28	.0139	$10.2 \times 10^{-2}$
700	10	132	3.77	.0230	$12.7 \times 10^{-2}$
700	20	82	2.34	.0960	$26.5 \times 10^{-2}$
700	30	75	2.15	.1165	$12.9 \times 10^{-2}$
1400	10	143	2.04	.1300	$17.9 \times 10^{-2}$
1400	20	84	1.20	.301	$41.4 \times 10^{-2}$
1400	30	75	1.07	.342	$15.7 \times 10^{-2}$
2800	10	155	1.11	.330	$11.37 \times 10^{-2}$
2800	20	84	0.602	.547	$9.43 \times 10^{-2}$
2800	30	75	0.535	.586	$6.71 \times 10^{-2}$

## Chimenea común de 150 FT

X ft	V ft/seg	H ft	20 H/x	$e^{-20 H/x}$	Co mg/ft <sup>3</sup>
750	10	318	8.48	.000208	0.1 x10 <sup>-2</sup>
750	20	215	5.74	.00324	0.778x10 <sup>-2</sup>
750	30	189	5.04	.00647	1.04 x10 <sup>-2</sup>
1500	10	355	4.73	.0088	1.06 x10 <sup>-2</sup>
1500	20	221	2.95	.0525	3.15 x10 <sup>-2</sup>
1500	30	191	2.55	.0783	3.13 x10 <sup>-2</sup>
3000	10	390	2.6	.0743	2.23 x10 <sup>-2</sup>
3000	20	226	1.51	.222	3.33 x10 <sup>-2</sup>
3000	30	193	1.29	.276	2.76 x10 <sup>-2</sup>
6000	10	424	1.41	.243	1.82 x10 <sup>-2</sup>
6000	20	230	0.767	.465	1.74 x10 <sup>-2</sup>
6000	30	194	0.647	.524	1.31 x10 <sup>-2</sup>

## IV e).-REGLAS SIMPLES PARA EL DISEÑO DE CHIMENEAS

Una gran variedad de chimeneas se han diseñado aplicando reglas simples (THUMB RULES) y probablemente un gran número se sigan diseñando por este método.

En la solución de problemas de chimeneas a partir de reglas simples, los resultados económicos no son muy satisfactorios, debido principalmente a la seguridad o sobre diseño que se le da a una chimenea calculada por este método.

Las reglas mostradas en el presente inciso, son útiles para diseñar chimeneas pequeñas (un pie o menos de diametro), en donde los costos de construcción y diseño son relativamente bajos.

- 1<sup>o</sup>- Las chimeneas deberan ser de 2 a 2.5 veces más altas que los edificios de los alrededores.
- 2<sup>o</sup>- La velocidad de expulsión de los gases debe ser mayor de 60 FT/seg para que la pluma escape de la zona de turbulencia de la chimenea.
- 3<sup>o</sup>- Los gases que se expulsan de chimeneas con un diametro menor de 5 pies y una altura menor de 200 pies - tocan el suelo una considerable parte del tiempo.
- 4<sup>o</sup>- La máxima concentración a nivel de piso de gases de una chimenea sujetos a la difusión atmosférica, generalmente se encuentra a una distancia de 10 veces la altura de la chimenea.

- 5<sup>o</sup> - Cuando los gases de chimenea están sujetos a difusión atmosférica (y la turbulencia creada por edificios cercanos no es un factor importante), concentraciones a nivel de piso del orden de 0.1 a 1% de la concentración en la chimenea son sintoma de un buen diseño.
- 6<sup>o</sup> - Las concentraciones a nivel de piso varían inversamente con el cuadrado de la altura efectiva de la chimenea.

## V.- CONCLUSIONES

Como se ha mencionado en el capítulo II, la contaminación es un tema que ha generado una atención muy especial en casi todas las partes del mundo. En México, y especialmente en la Ciudad de México se participa de esta gran inquietud.

Conforme el problema se agrava, aumenta la atención, selección y estudio de acciones conducentes. El presente trabajo pretende ilustrar, concientizar y de alguna manera cooperar en la solución y prevención de un problema que día a día se recrudece y expande.

En las páginas precedentes se han tratado explícitamente los métodos principales para el diseño de chimeneas, las cuales habrán logrado su objetivo cuando un problema de este tipo se trate de resolver a través de las formas analítica, gráfica o siguiendo las recomendaciones de las reglas simples que en los capítulos anteriores se han expuesto detalladamente.

Cabe hacer notar que los métodos de referencia son de una complejidad considerable, ya que involucran disciplinas que particularmente representan una dificultad inherente debido a los conceptos tan especializados que manejan, caso concreto la Meteorología. Sin embargo, las alternativas más fáciles e ilustrativas que nos llevan a resolver los problemas del diseño de una chimenea, son los que se han querido mostrar.

Debido a que el problema de la contaminación es más grave de lo que se le concidera, es necesario que todos los organismos existentes contribuyan a aumentar el grado de conciencia pública, ya que por ignorancia o indiferencia, se pueden causar daños inmensos e irreparables al medio ambiente del que dependen nuestras vidas y bienestar. Por lo contrario con un conocimiento más profundo y una acción más prudente, podemos conseguir para nosotros y nuestra posteridad unas condiciones de vida mejores en un medio más en consonancia con las necesidades y aspiraciones de la humanidad.

Las perspectivas de elevar la calidad del medio y de crear una vida satisfactoria son grandes. Lo que se necesita es entusiasmo, pero, a la vez, serenidad de ánimo; trabajo afanoso pero sistemático.

Para llegar a la plenitud de su libertad dentro de la naturaleza el hombre debe aplicar sus conocimientos a forjar, en armonía con ella, un medio mejor. La defensa y mejoramiento del medio humano para las generaciones presentes y futuras se ha convertido en una meta imperiosa del hombre. Para llegar a esa meta será necesario que ciudadanos y comunidades, empresas e instituciones, en todos los planos, acepten las responsabilidades que les incumben y que todos ellos participen equitativamente en la lucha contra la contaminación.

Este es otro de los objetivos que persigue el presente trabajo,

el de asentar y definir claramente, que el civismo y la conciencia pública sobre el grave problema de la contaminación, serán los factores más importantes, que habrán de motivar, para que el hombre, con su espíritu invencible y su inagotable fuerza de voluntad; con su decisión creadora, listo para enfrentarse a la compleja problemática de su tiempo y de su planeta ; dueño y señor de su más firme convicción; siga viviendo en un mundo que cada día sea más bello y más sano, para él, y sus hijos y para las futuras generaciones.

**VI. APENDICE**

## a, FACTORES DE CONVERSION

## ENERGIA

$$1 \text{ BTU} = 252 \text{ CAL} = 0.252 \text{ KCAL} = 1060 \text{ joules}$$

## VELOCIDAD

$$1 \text{ Milla/hr} = 1.465 \text{ FT/seg} = 0.447 \text{ m/seg}$$

## PRESION

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 14.7 \text{ lb/in}^2 = 1.033 \text{ kg/cm}^2 = 1013.27 \text{ mb} = \begin{matrix} 40.7 \\ \text{inH}_2\text{O} \\ \text{a } 60^\circ\text{F} \end{matrix}$$

## TEMPERATURA

$$^\circ\text{C} = 5/9 (^\circ\text{F} - 32)$$

$$^\circ\text{F} = 9/5 (^\circ\text{C} + 32)$$

$$^\circ\text{R} = ^\circ\text{F} + 460$$

$$^\circ\text{K} = ^\circ\text{C} + 273$$

## MASA

$$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ Kg} = 454 \text{ g}$$

$$1 \text{ TON} = 1000 \text{ Kg} = 2200 \text{ lb}$$

$$1 \text{ g} = 1000 \text{ mg}$$

## LONGITUD, AREA Y VOLUMEN

$$1 \text{ m} = 39.4 \text{ in} = 3.28 \text{ FT}$$

$$1 \text{ Milla} = 5280 \text{ FT} = 1.608 \text{ Km} = 1608 \text{ m}$$

$$1 \text{ M}^2 = 10.76 \text{ FT}^2$$

$$1 \text{ M}^3 = 35.314 \text{ FT}^3 = 1000 \text{ L}$$

## CONSTANTES

Aceleración de la gravedad =  $9.8 \text{ m/seg}^2 = 32.2 \text{ FT/seg}^2$

$e = 2.7, e^{-1} = \frac{1}{e} = 0.368, \log e = 0.434$

$R = 1.987 \text{ Cal mol}^{-1} \text{ grado}^{-1}$

$R = 0.082 \text{ atm-lto mol}^{-1} \text{ grado}^{-1}$

$R = 82.057 \text{ atm-cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ grado}^{-1}$

$R = 29.27 \text{ m/}^\circ\text{C}$

FACTORES DE CONVERSION DE VELOCIDAD

Unidades deseadas Unidades Base	m/seg	ft/seg	ft/min	Km/h	millas/h	nudos	millas/dia
m/seg	1.0	3.2808	1.9685 X 10 <sup>2</sup>	3.6	2.2369	1.9425	5.3687 X 10
ft/seg	3.0480 X 10 <sup>-1</sup>	1.0	60	1.0973	6.8182 X 10 <sup>-1</sup>	5.9209 X 10 <sup>-1</sup>	1.6364 X 10
ft/min	5.0080 X 10 <sup>-3</sup>	1.6667 X 10 <sup>-2</sup>	1.0	1.8288 X 10 <sup>-2</sup>	1.1364 X 10 <sup>-2</sup>	9.8681 X 10 <sup>-3</sup>	2.7273 X 10 <sup>-1</sup>
Km/h	2.7778 X 10 <sup>-1</sup>	9.1134 X 10 <sup>-1</sup>	5.4681 X 10	1.0	6.2137 X 10 <sup>-1</sup>	5.3959 X 10 <sup>-1</sup>	1.4913 X 10
millas/h	4.4707 X 10 <sup>-1</sup>	1.4667	88.0	1.6093	1.0	8.6839 X 10 <sup>-1</sup>	24
nudos	5.1479 X 10 <sup>-1</sup>	1.6890	1.0134 X 10 <sup>2</sup>	1.8533	1.1516	1.0	2.7637 X 10
millas/dia	1.8627 X 10 <sup>-2</sup>	6.1111 X 10 <sup>-2</sup>	3.6667	6.7056 X 10 <sup>-2</sup>	4.1667 X 10 <sup>-2</sup>	3.6183 X 10 <sup>-2</sup>	1.0

FACTORES DE CONVERSION .

Unidades deseadas Unidades Base	gms /seg	gms /min	kg/h	kg/día	lbs/min	lbs/h	lbs/día	tons/h	tons/día	tons/año
gms/seg	1,0	60,0	3,6	8,640 × 10	1,3228 × 10 <sup>-1</sup>	7,9367	1,9048 × 10 <sup>2</sup>	3,9663 × 10 <sup>-3</sup>	9,5240 × 10 <sup>-2</sup>	3,4763 × 10
gms/min	1,6667 × 10 <sup>-2</sup>	1,0	6,0 × 10 <sup>-2</sup>	1,4400	2,2046 × 10 <sup>-3</sup>	1,3228 × 10 <sup>-1</sup>	3,1747	6,6139 × 10 <sup>-5</sup>	1,5873 × 10 <sup>-3</sup>	5,7938 × 10 <sup>-1</sup>
kg/h	2,7778 × 10 <sup>-1</sup>	16,667	1,0	2,4000 × 10	3,6744 × 10 <sup>-2</sup>	2,2046	5,2911 × 10	1,1023 × 10 <sup>-3</sup>	2,6456 × 10 <sup>-2</sup>	9,6563
kg/día	1,1574 × 10 <sup>-2</sup>	6,9444 × 10 <sup>-1</sup>	4,1667 × 10 <sup>-2</sup>	1,0	1,5310 × 10 <sup>-3</sup>	9,1860 × 10 <sup>-2</sup>	2,2046	4,5930 × 10 <sup>-5</sup>	1,1023 × 10 <sup>-3</sup>	4,0235 × 10 <sup>-1</sup>
lbs/min	7,5598	4,5359 × 10 <sup>2</sup>	2,7215 × 10	6,5317 × 10 <sup>2</sup>	1,0	60,0	1,44 × 10 <sup>3</sup>	3,000 × 10 <sup>-2</sup>	7,2000 × 10 <sup>-1</sup>	2,6280 × 10 <sup>2</sup>
lbs/h	1,2600 × 10 <sup>-1</sup>	7,5598	4,5359 × 10 <sup>-1</sup>	1,0886 × 10	1,6667 × 10 <sup>-2</sup>	1,0	24,0	5,0000 × 10 <sup>-4</sup>	1,2000 × 10 <sup>-2</sup>	4,3800
lbs/día	5,2499 × 10 <sup>-3</sup>	3,1499 × 10 <sup>-1</sup>	1,0900 × 10 <sup>-2</sup>	4,5359 × 10 <sup>-1</sup>	6,9444 × 10 <sup>-4</sup>	4,1667 × 10 <sup>-2</sup>	1,0	2,0833 × 10 <sup>-5</sup>	5,0000 × 10 <sup>-4</sup>	1,8250 × 10 <sup>-1</sup>
tons/h	2,5199 × 10 <sup>2</sup>	1,5120 × 10 <sup>4</sup>	9,0718 × 10 <sup>2</sup>	2,1772 × 10 <sup>4</sup>	3,3333 × 10	2,0 × 10 <sup>3</sup>	4,8000 × 10 <sup>4</sup>	1,0	24,0	8,7600 × 10 <sup>3</sup>
tons/día	1,0500 × 10	6,2999 × 10 <sup>2</sup>	3,7799 × 10	9,0718 × 10 <sup>2</sup>	1,3889	8,3333 × 10	2,0 × 10 <sup>3</sup>	4,1667 × 10 <sup>-2</sup>	1,0	365,0
tons/año	2,0766 × 10 <sup>-2</sup>	1,7260	1,0356 × 10 <sup>-1</sup>	2,4854	3,8052 × 10 <sup>-3</sup>	2,2831 × 10 <sup>-1</sup>	5,4785	1,1416 × 10 <sup>-4</sup>	2,7397 × 10 <sup>-3</sup>	1,0

## VII.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- BELTRAN, ENRIQUE. " LA CONTAMINACION Y LOS PROBLEMAS DE AMERICA LATINA ".  
MEDIO AMBIENTE  
1: 2: 16 - 24 DE JULIO 1973.
- 2.- BOSANQUET, M. A.; CAREY, W. F.; HALTO E. M.  
" DUST DEPOSITION FROM CHIMNEY STACKS "  
INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS 162,  
P. 355 - 367, DICIEMBRE 1950.
- 3.- BOSANQUET, C. H.; PEARSON, J. L.  
" THE SPREAD OF SMOKE AND GASES FROM CHIMNEY "  
TRANS. FARADAY SOC. 32 P. 1249 - 1936
- 4.- CAPLAN F.  
" NOMOGRAM DETERMINES STACK EFFECT "  
POWER ENG. 81: 40 A SEPTIEMBRE 1977
- 5.- CARPENTER, S. B.; MONTGOMERY, T. L.  
" PRINCIPAL PLUME DISPERSION MODELS "  
JOURNAL OF THE AIR POLLUTION CONTROL ASSOCIATION. 21: 8 AGOSTO 1971.
- 6.- CARSON, J. E., MOSES H.  
" THE VALIDITY OF SEVERAL PLUME RISE FORMULAS "  
JOURNAL OF THE AIR POLLUTION CONTROL ASSOCIATION. 19: 11, NOVIEMBRE 1969.
- 7.- CONSTANCE, J. D.  
" CALCULATE EFFECTIVE STACK HEIGHT QUICKLY "  
CHEMICAL ENG.  
79: 81 - 83 SEPTIEMBRE 4, 1972.
- 8.- DAVISON, W. F.  
" ESTUDIES OF STACK DISCHARGE UNDER - VARYING CONDITIONS "  
AIR POLLUTIONS AND SMOKE PREVENTION ASSOC. OF AMERICA 1951.

- 9.- ECHEVERRIA, A. E. " PANORAMA GENERAL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL " MEDIO AMBIENTE 1: 20 - 23 MARZO 1973.
- 10.- ELIZONDO, B. J. " FENOMENOS TERMICOS URBANOS SOBRE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN LA CIUDAD DE MEXICO " CENTRO CIENTIFICO DE AMERICA LATINA I B M DICIEMBRE 1974.
- 11.- GOSLINE, C. A. " DISPERSION FROM SHORT STACKS " CHEMICAL ENG. PROG. 48: 165 - 172. ABRIL 1952.
- 12.- GOTAS, Y. " ESTIMATING MINIMUM STACK HEIGHT A SIMPLIFIED PROCEDURE " JOURNAL OF THE AIR POLLUTION CONTROL ASSOCIATION 27: 12 DICIEMBRE 1977.
- 13.- HOLLAND, J. Z. " THE DIFUSSION PROBLEM AND HILLY TE -- RRRAIN ". CHAPT 96, AIR POLLUTION MCGRAW HILL Co. INC. P. 815 - 821 , -- 1952.
- 14.- JOHNSON, W. B. " THE STATUS OF AIR QUALITY SIMULATION MODELING ". DIVISION OF METEOROLOGY NATIONAL ENVIROMENTAL RESEARCH CENTER U. S. A. EPA, 1973.
- 15.- LEVY, V. A., CARDENAS, A. F. " MODELO DE CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA LA CIUDAD DE MEXICO " CENTRO CIENTIFICO DE AMERICA LATINA I B M MAYO, 1974.

- 16.- LORETTA, F. B., PEREZ DE MENDOZA A.  
 " EL ABATIMIENTO DE LA CONTAMINACION  
 ATMOSFERICA EL CASO DE LA CIUDAD DE  
 MEXICO "  
 IMIQ OCTUBRE, 1972.
- 17.- LOWRY, P. H.  
 " MICROCLIMATE FACTORS IN SMOKE POLLU  
 TION FROM TALL STACKS "  
 METEOROLOGICAL MONOGRAPHS  
 1: 24 - 29. NOVIEMBRE 1951.
- 18.- MAHAJAN, K. K.  
 " TALL STACK DESIGN SIMPLIFIED "  
 HYDROCARBON PROCESSING.  
 SEPTIEMBRE, 1975.
- 19.- MARQUEZ, M. E.  
 " LOS CONTAMINANTES QUE PRODUCEN DAÑO  
 AL HOMBRE "  
 MEDIO AMBIENTE  
 1: 2: 13 - 15 JULIO, 1973.
- 20.-  
 " MEMORIA PRIMERA REUNION NACIONAL SOBRE  
 PROBLEMAS DE CONTAMINACION AMBIENTAL "  
 ENERO, 1973. TOMO II.
- 21.- MOINARD, J.  
 " METODO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMI -  
 NACION DE LA ALTURA DE CHIMENEAS "  
 POLLUTION ATMOSPHERIQUE  
 N. 51 JULIO - SEPTIEMBRE, 1971  
 P. 189- 194.
- 22.- NEMEC, L.  
 " AN EXPERIMENTAL CONTRIBUTION TO THE  
 METHOD OF CALCULATING THE GROUND LEVEL  
 CONCENTRATION OF GASEOUS POLLUTANTS  
 EMITTED FROM HIGH STACKS ".  
 ATMOSPHERIC ENVIRONMENT  
 3: 505 - 517 1969.

- 23.- ORDOÑEZ, B. R. " ASPECTOS GENERALES DE LOS EFECTOS EN LA SALUD DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL " 1a. REUNION NAL. SOBRE PROBLEMAS DE CONTAMINACION AMBIENTAL , ENERO 1973.
- 24.- PALOMERA, S. E. " EDUCACION Y CONTAMINACION AMBIENTAL " 1a. REUNION NAL. SOBRE PROBLEMAS DE CONTAMINACION AMBIENTAL, ENERO 1973.
- 25.- PERKINS, H. C. " AIR POLLUTION " MCGRAW HILL N. Y. 1a. EDICION
- 26.- PORTER, R. A. " DISPERSION EQUATION SOLUTIONS BY CALCULATOR METEOROLOGY " TEXAS AIR CONTROL BOARD NOVIEMBRE, 1975
- 27.- RAGLAND, K. W. " WORST-CASE AMBIENT AIR CONCENTRATIONS FROM POINT SOURCES USING THE GAUSSIAN PLUM MODEL " ATMOSPHERIC ENVIRONMENT 10: 371 - 374. 1976
- 28.- RODRIGUEZ C. " VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA EN UN PUNTO " . INSTITUTO DE INGENIERIA, U.N.A.M. INFORME No. 4, 1961.
- 29.- ROSS, R. D. " LA INDUSTRIA DE LA CONTAMINACION DEL AIRE " EDITORIAL DIANA 1a. EDICION
- 30.- SALVAT EDIT. " LA CONTAMINACION " BIBLIOTECA SALVAT DE GRANDES TEMAS SALVAT EDITORES 1973.
- 31.- SHERLOCK, R. H. LESHER, E. L. "ROLE OF CHIMNEY DESIGN IN DISPERSION OF WASTE GASES " AIR REPAIR 4: 2 AGOSTO 1954

- 32.- SISSON, W. " NOMOGRAM ESTIMATES STACK HEAT EMISSION RATE AND PLUME RISE "  
POWER ENG.  
81: 79 - 80 JUNIO 1977
- 33.- SMITH, R. S. " CONTROL STACK GAS POLLUTION "  
HYDROCARBON PROCESSING  
51: 223 - 225 SEPTIEMBRE 1972
- 34.- SMITH, E. M. " REDUCTION OF AMBIENT AIR CONCENTRATIONS OF POLLUTANTS BY DISPERSION FROM HIGH STACKS "  
COMBUSTION, ABRIL 1967
- 35.- SOMMERFIELD, E. M. " HOW HIGH A STACK DO YOU NEED TO PREVENT AIR POLLUTION "  
POWER ENG.  
SEPTIEMBRE 1965
- 36.- STEINBOCK, R. S. " STACKS FOR POLLUTION CONTROL I Y II "  
CHEMICAL ENG.  
59: 202 - 203 FEBRERO 1952  
59: 144 - 147 MARZO 1952
- 37.- STERN " HANDBOOK OF ATMOSPHERIC POLLUTION "
- 38.- STERNFIELD, A. " LOS SEIS MAYOR CONTAMINANTES DEL AIRE "  
MEDIO AMBIENTE  
1: 24 - 27 MARZO 1973
- 39.- STROM, G. H. " WIND TUNNEL TECHNIQUES USED TO STUDY INFLUENCE OF BUILDING CONFIGURATION ON STACK GAS DISPERSAL "  
INDUSTRIAL HYGIENE ASS. QUARTERLY  
13: 76 - 80 JUNIO 1952
- 40.- STROM, G. H., HALITSKY J. " TOPOGRAPHICAL INFLUENCES ON DISPERSAL OF STACK GASES "  
COMBUSTION  
24: 40 - 43 JUNIO 1953

- 41.- THOMAS, M. D., HILL G. R., ABERSOLD, J. N.  
" DISPERSION OF GASES FROM TALL STACKS "  
INDUSTRIAL AND ENG. CHEM.  
41: 2409 - 2417 NOVIEMBRE 1949
- 42.- TURNER, D. B.  
" WORKBOOK OF ATMOSPHERIC DISPERSION  
ESTIMATES ."  
U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY  
RTP, N. O. 1970
- 43.- VARIOS  
" LA BIOSFERA "  
SCIENTIFIC AMERICAN  
ALIANZA EDITORIAL.
- 44.- VI LLARREAL, D. J.  
" ESTUDIO SOBRE CONTAMINACION AMBIENTAL "  
CONACYT  
P. 34 - 55.
- 45.- VIZCAINO, M. F.  
" LA CONTAMINACION EN MEXICO "  
FONDO DE CULTURA ECONOMICA  
1a. EDICION
- 46.- WHALEY H.  
" THE DERIVATION OF PLUME DISPERSION PARA\_  
METERS FROM MEASURED THREEDIMENSIONAL --  
DATA "  
ATMOSPHERIC ENVIRONMENT  
8: 281 - 290 1974