

01177

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO



Facultad de Ingeniería  
División de Estudios de Postgrado

METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE  
EMISIONES CONTAMINANTES DE LA  
AGRICULTURA

T E S I S

Que para obtener el título de  
Maestro en Ingeniería (Ambiental)

p r e s e n t a

ING. VERONA <sup>Rebeca</sup> D'ARCANGELI ROJAS

Director de Tesis: Dra. Rina Aguirre Saldívar



MEXICO D.F.

JULIO DE 2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## PREFACIO

Este trabajo fue realizado para el Instituto Nacional de Ecología (INE), con el apoyo de la Comisión de Cooperación Ambiental (CCA), como una herramienta para el mejoramiento del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México (RETC).

En dicho registro se contabilizan las emisiones de 178 contaminantes provenientes de diversas fuentes. Este inventario quedará integrado por fuentes puntuales, las que reportan directamente sus emisiones a través de la Cédula de Operación Anual (COA), y por fuentes difusas, las cuales no pueden ser medidas y, por lo tanto, deben ser estimadas a través de métodos indirectos.

Una de estas fuentes difusas de contaminación corresponde a la agricultura. A pesar de que las actividades agrícolas y ganaderas sólo representan alrededor de un 6% del PIB de México, éstas ocupan aproximadamente el 22% del empleo, lo que muestra su importancia dentro de la economía del país. Estas actividades son generadoras de emisiones al aire, agua y suelo que es necesario estimar, destacándose las emisiones de gases invernadero tales como el metano, óxido nitroso y dióxido de carbono y de compuestos orgánicos tóxicos derivados de la aplicación de plaguicidas.

En el presente trabajo se plantea la metodología de estimación indirecta de las emisiones propias de la agricultura y se desarrollan dos ejemplos: emisiones de paratión metílico por aplicación de plaguicidas a nivel nacional y emisión de gases invernadero por ganado bovino en un Estado de la República.

La mayoría de los métodos recomendados están basados en el uso de factores de emisión. Al no existir en México factores de emisión estimados para las condiciones locales/nacionales específicas, se propone el uso de factores remendados en la literatura internacional. Sin embargo, es necesario validar dichos factores a través de un programa priorizado de calibración de éstos, el que incluye el diseño experimental adecuado a cada factor con el fin de realizar su validación estadística y, de esta manera, aumentar la confiabilidad de las estimaciones. Así mismo, es importante el mejoramiento de la información necesaria para la estimación de las emisiones, destacándose la necesidad de un esfuerzo de coordinación entre las instituciones generadoras de dicha información y el INE.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este trabajo de tesis.

Quiero dar las gracias a los sinodales, M. en I. Augusto Villarreal, Dra. Rina Aguirre Saldívar, M. en I. Ana Elisa Silva, M. en C. Luis Sánchez Cataño y M. en I. Ann Wellens, por sus valiosas sugerencias, apoyo e excelente disposición para llevar a buen término esta tesis.

Agradezco de manera especial a la Dra. Aguirre, por su guía siempre acertada, su dedicación y rigurosidad en la revisión de la tesis.

Finalmente, mil gracias al personal del Instituto Nacional de Ecología, en particular a la Dirección de Gestión Ambiental y a su Director, el M. en C. Luis Sánchez Cataño, por haberme permitido el acceso a la información necesaria para la comprensión del registro de emisiones de México y de sus necesidades y por el apoyo logístico que me brindaron.

Muchas gracias a todos.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi querida familia, a mis padres, a Carmen, a mis hermanas y a mi pequeño y terrible sobrino, por quererme y apoyarme incondicionalmente, tanto en la distancia como en la cercanía.

También quiero dedicarlo a los maravillosos amigos que hice en México y que hicieron de este tiempo de estudiante una experiencia tan valiosa e imposible de olvidar, les agradezco su amistad, cariño y el haberme hecho sentir tan bien recibida.

Por último, dedico esta tesis a México, lindo y querido, por hacerme difícil vivir lejos de él.

# INDICE

## DEFINICIÓN DE VARIABLES

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes	2
1.2	Objetivo	3
1.3	Alcances y limitaciones	4
<b>2.</b>	<b>SISTEMAS DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL Y REGISTROS DE EMISIONES</b>	<b>6</b>
2.1	Registros de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (PRTR)	7
2.1.1	Experiencia internacional	10
2.1.2	Experiencia en México	13
2.2	Métodos indirectos de estimación de emisiones	15
2.2.1	Extrapolación	15
2.2.2	Balance de materiales	16
2.2.3	Modelos matemáticos	16
2.2.4	Factores de emisión	17
<b>3.</b>	<b>FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO</b>	<b>21</b>
3.1	Contaminación del aire	21
3.2	Contaminación de cuerpos de agua	22
3.3	Contaminación de suelo	24
3.4	La agricultura en México	25
3.4.1	Importancia económica	25
3.4.2	Actividades agrícolas	28
3.4.3	Actividades pecuarias	29
3.5	Mecanismos de contaminación de la agricultura	31
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE LA AGRICULTURA</b>	<b>40</b>
4.1	Definición del sistema	40
4.1.1	Identificación de contaminantes emitidos	42
4.2	Métodos para la estimación de emisiones de la agricultura	50
4.2.1	Emisiones al aire	50
4.2.1.1	Preparación de suelos	51
4.2.1.2	Aplicación de fertilizantes	51
4.2.1.3	Aplicación de plaguicidas	54
4.2.1.4	Etapa de crecimiento	55
4.2.1.5	Etapa de cosecha	56

4.2.1.6	Quema de residuos vegetales en los campos	57
4.2.1.7	Fermentación entérica	59
4.2.1.8	Manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	61
4.2.2	Emisiones al agua y suelo	66
4.3	Análisis y adaptación de factores de emisión	67
4.4	Programa de calibración de factores de emisión	74
4.4.1	Priorización para la calibración	75
4.4.2	Adaptación de factores de emisión	77
4.4.3	Diseño de la calibración	80
<b>5.</b>	<b>EJEMPLOS</b>	<b>87</b>
5.1	Emisión de paratión metílico	87
5.1.1	Análisis de información	87
5.1.2	Estimación de emisiones	88
5.1.3	Análisis de factores de emisión	89
5.2	Emisión de gases invernadero por ganado bovino	90
5.2.1	Análisis de información	91
5.2.2	Estimación de emisiones	92
5.2.3	Análisis de factores de emisión	98
5.3	Conclusiones del desarrollo de los ejemplos	100
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>102</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO 1: LISTA DE SUSTANCIAS RETC</b>	
	<b>ANEXO 2: FACTORES DE EMISIÓN</b>	

## INDICE DE TABLAS

		PÁGINA
3.1	Contribución de los distintos sectores al total de emisiones al aire	21
3.2	Características de los retornos a los cuerpos de agua	23
3.3	Procesos más importantes en la degradación de suelos	26
3.4	Evolución del PIB y del empleo en el sector agropecuario, silvícola y pesquero	28
3.5	Producción agrícola y ganadera en México	30
3.6	Evolución de las existencias ganaderas (miles de cabezas)	31
3.7	Contaminantes característicos introducidos por la incorporación de nutrientes al suelo	33
3.8	Contaminantes que pueden ser emitidos a la atmósfera	39
3.9	Contaminantes que pueden alcanzar las aguas superficiales y subterráneas	39
4.1	Tabla resumen de las actividades de la agricultura	42
4.2	Contaminantes emitidos	43
4.3	Identificación de sustancias RETC emitidas al aire	46
4.4	Identificación de sustancias RETC emitidas al agua y al suelo	46
4.5	Información necesaria para la aplicación de los métodos específicos de estimación de emisiones	47
4.6	Fuentes de información	49
4.7	Métodos recomendados de estimación de emisiones al aire	50
4.8	Contenido de nitrógeno de fertilizantes comerciales	51
4.9	Masa típica animal ( $M_j$ ), producción de sólidos volátiles ( $sv_j$ ), producción potencial máxima de metano ( $Bo_j$ ) y producción unitaria de nitrógeno Kjeldahl, por masa de animales ( $K_j$ ) en USA	53
4.10	Nitrógeno excretado por tipo de animal ( $K_{Tj}$ ) y porcentaje de excretas manejado por distintos sistemas ( $w_{jk}$ )	53
4.11	Factor de emisión para ingredientes activos	55
4.12	Características de los residuos vegetales sobrantes de la cosecha de algunos tipos de cultivo	57
4.13	Características de los residuos vegetales a quemar de algunos tipos de cultivo	59
4.14	Factores de emisión de metano por fermentación entérica del ganado	61
4.15	Factores de conversión de metano ( $m_k$ ) para los sistemas de manejo de excretas más comunes	62
4.16	Factores de emisión de metano por manejo de excretas	63
4.17	Factores de emisión de óxido nitroso para los sistemas de manejo de excretas	65
4.18	Métodos recomendados de estimación de emisiones al agua y suelo	66
4.20	Variables utilizadas para calcular los niveles de actividad	69
4.21	Variables que pueden ser fuentes de error	75
4.22	Evaluación de los criterios para la priorización de la calibración de los factores de emisión	79

	<b>PÁGINA</b>	
4.23	Programa priorizado de calibración de factores de emisión	80
4.24	Diseños estadísticos recomendados para analizar los factores de emisión	86
5.1	Información necesaria para la estimación de emisiones de paratión metílico	87
5.2	Información necesaria para la estimación de emisiones de gases invernadero por ganado bovino	91
5.3	Población bovina en el Estado de Querétaro	93
5.4	Factores de emisión utilizados	98

## **INDICE DE FIGURAS**

	<b>PÁGINA</b>	
2.1	Tendencia de la Administración Ambiental	6
2.2	Estructura del RETC	15
2.3	Balance de materiales	16
2.4	Jerarquía de los métodos de estimación de emisiones de fuentes de área	19
2.5	Selección del método para estimar emisiones	20
3.1	Uso del suelo en México	25
3.2	Distribución del PIB por actividad económica (1996)	27
3.3	Distribución del empleo por actividad económica (1996)	27
3.4	Flujo del nitrógeno incorporado a los suelos agrícolas	34
4.1	Diagrama de actividades de la agricultura y ganadería	41
4.2	Determinación de la emisión de un ingrediente activo o inerte al agua y suelo	68
4.3	Proceso de análisis de un factor de emisión	76

## DEFINICIÓN DE VARIABLES

<b>A</b>	área total sembrada (há)
<b>A<sub>a</sub></b>	área cultivada con arroz por inundación (há)
<b>A<sub>c</sub></b>	área cosechada de arroz en campos inundados (há/año)
<b>a</b>	fracción de ingrediente activo del pesticida
<b>Bo<sub>j</sub></b>	capacidad máxima de producción de metano por kilo de SV <sub>j</sub> producido, para cada tipo de animal <i>j</i> (m <sup>3</sup> / kg SV)
<b>C</b>	cantidad de cal usada (ton/año)
<b>C<sub>j</sub></b>	producción del cultivo <i>j</i> (kg/año)
<b>c<sub>j</sub></b>	contenido de carbono de los residuos del cultivo <i>j</i> (kg carbono / kg de materia seca)
<b>D</b>	cantidad de dolomita usada (ton/año)
<b>d<sub>j</sub></b>	fracción de biomasa seca del residuo del cultivo <i>j</i>
<b>E</b>	emisión total
<b>Ea<sub>ia</sub></b>	emisión al aire del ingrediente activo del pesticida (kg/año)
<b>Ea<sub>i</sub></b>	emisión al aire del ingrediente inerte del pesticida (kg/año)
<b>Ea<sub>c</sub></b>	emisión total de bióxido de carbono por uso de cal y dolomita (ton CO <sub>2</sub> /año)
<b>Ea<sub>cq</sub></b>	emisión de carbono por la quema de residuos de los cultivos (kg C/año)
<b>Ea<sub>M</sub></b>	emisión al aire de metano (kg/año)
<b>Ea<sub>max</sub>, Ea<sub>min</sub></b>	emisión máxima y mínima al aire de metano por cultivos de arroz por inundación (kg/año)
<b>Ea<sub>N</sub></b>	emisión al aire de óxido nitroso (kg/año)
<b>Ea<sub>Na</sub></b>	emisión al aire de óxido nitroso por estiércol no manejado (kg/año)
<b>Ea<sub>Nm</sub></b>	emisión al aire de óxido nitroso por estiércol manejado (kg/año)
<b>Ea<sub>N1</sub></b>	emisión al aire directa de óxido nitroso por uso de fertilizantes (kg/año)
<b>Ea<sub>N2</sub></b>	emisión al aire indirecta de óxido nitroso por volatilización/depositación, por uso de fertilizantes (kg/año)
<b>Ea<sub>N3</sub></b>	emisión al aire indirecta de óxido nitroso por fufas en el agua subterránea y escorrentía superficial, por uso de fertilizantes (kg/año)
<b>Ea<sub>cov</sub></b>	emisión total al aire de COVs (kg/año)
<b>ES<sub>i</sub></b>	emisión total al agua del ingrediente inerte del pesticida (kg/año)
<b>ES<sub>ia</sub></b>	emisión total al suelo del ingrediente activo del pesticida (kg/año)
<b>EW<sub>i</sub></b>	emisión total al suelo del ingrediente inerte del pesticida (kg/año)
<b>EW<sub>ia</sub></b>	emisión total al agua del ingrediente activo del pesticida (kg/año)
<b>F<sub>ci</sub></b>	cantidad de fertilizante comercial <i>i</i> aplicado (kg/año)
<b>F<sub>o</sub></b>	cantidad de otros fertilizantes orgánicos aplicados, con excepción del estiércol (kg/año)
<b>f, f<sub>j</sub>, f<sub>k</sub></b>	factor de emisión
<b>f<sub>min</sub>, f<sub>max</sub></b>	factores de emisión mínimo y máximo
<b>i</b>	fracción del ingrediente inerte del pesticida
<b>icov</b>	fracción de COV del ingrediente inerte del pesticida
<b>K<sub>j</sub></b>	nitrógeno Kjeldahl por cada 1000 kg de masa de animal tipo <i>j</i> (kg/día)
<b>KN</b>	nitrógeno Kjeldahl total excretado (kg N/año)

$KN_a$	nitrógeno Kjeldahl del estiércol depositado directamente por los animales sobre los campos, establos y corrales (kg N/año)
$KN_e$	nitrógeno Kjeldahl en el estiércol usado como fertilizante (kg N/año)
$KN_k$	nitrógeno Kjeldahl excretado que es tratado por el sistema de manejo $k$ (kg N/año)
$K_{Tj}$	nitrógeno Kjeldahl excretado por el animal tipo $j$ (kg N/cabeza/año)
$M_j$	masa típica del animal tipo $j$ (kg/cabeza)
$L$	producción anual de leche (kg/cabeza/año)
$M_{qj}$	cantidad de materia seca quemada del cultivo $j$ (kg/año)
$m_k$	factor de conversión a metano del sistema de manejo de estiércol $k$ (%) o (kg de $CH_4$ /kg de estiércol manejado en el sistema $k$ )
$N$	nivel de actividad
$N_a^*$	nitrógeno no volatilizado del estiércol depositado directamente por los animales sobre el suelo (kg N/año)
$N_c$	cantidad total de nitrógeno en los fertilizantes comerciales aplicados (kg N/año)
$N_c^*$	cantidad de nitrógeno del fertilizante comercial no volatilizado (kg N/año)
$N_{ci}$	porcentaje de nitrógeno en el fertilizante comercial $i$ (%)
$N_{ev}$	nitrógeno volatilizado por producción de estiércol (kg N/año)
$N_{ew}$	nitrógeno del estiércol que se fuga en el agua (kg N/año)
$N_e$	nitrógeno del estiércol usado como fertilizante, no volatilizado (kg N/año)
$N_f$	cantidad de nitrógeno en los cultivos fijadores $j$ (kg N/año)
$N_{fv}$	nitrógeno volatilizado por uso de fertilizantes (kg N/año)
$N_{fw}$	nitrógeno de los fertilizantes que se fuga en el agua (kg N/año)
$N_{mk}$	nitrógeno del estiércol manejado por el sistema $k$ , no volatilizado (kg N/año)
$N_o$	cantidad de nitrógeno en otros fertilizantes orgánicos (kg N/año)
$N_o^*$	nitrógeno de fertilizantes orgánicos, con excepción del estiércol, no volatilizado (kg N/año)
$N_q$	cantidad de nitrógeno en los residuos de los cultivos (kg N/año)
$N_{rj}$	contenido de nitrógeno en los residuos vegetales del cultivo $j$ (kg de N / kg biomasa seca)
$N_r$	nitrógeno total en los residuos vegetales incorporados al suelo (kg N/año)
$(N/C)_j$	proporción nitrógeno/carbono del cultivo $j$
$\eta_q$	eficiencia de quemado (%), fracción de biomasa seca expuesta a quemarse que realmente se quema
$\eta_c$	eficiencia de combustión (%), fracción de carbono en el fuego que es emitido a la atmósfera
$P$	cantidad del pesticida aplicada por unidad de tiempo y unidad de área sembrada (kg/há/año)
$P'$	cantidad total de cada pesticida aplicado (kg/año)
$P_j$	población del animal tipo $j$ (cabezas)
$P_v$	presión de vapor de los ingredientes activo e inerte de un pesticida (mm de Hg, entre 20 y 25 C)
$p_j$	proporción en peso (residuo $j$ / cultivo $j$ )
$q_j$	fracción quemada del cultivo $j$
$r$	factor de corrección (%)

$S_w$	solubilidad en el agua (mg/l)
$SV_j$	producción total de sólidos volátiles del animal tipo $j$ (kg/año)
$sv_j$	producción de sólidos volátiles del animal tipo $j$ por unidad de masa del animal (kg SV / kg animal / año)
$T^\circ$	temperatura media ( $^\circ$ C)
$t_m$	tasa de emisión de metano
$w_{jk}$	porcentaje del estiércol del tipo de animal $j$ manejado por el sistema $k$ (%)

## 1. INTRODUCCION

Las transformaciones demográficas y económicas en el mundo, fuertemente acentuadas en las últimas cinco décadas, han tenido impactos significativos en el entorno, provocando importantes procesos de deterioro ambiental. Los factores del desarrollo humano ejercen presión sobre los recursos naturales, generalmente a una escala mayor que la capacidad de respuesta y asimilación de la naturaleza, con consecuencias tales como la degradación de la calidad ambiental y el agotamiento de los recursos naturales.

A partir de los años 40's, en México se empezó a experimentar una marcada transformación económica con la evolución de una economía fuertemente agrícola a otra cada vez más industrial y, posteriormente, con predominancia en los servicios. La modernización internacional se concentró en aspectos sectoriales de desarrollo y promoción a la industria para generar riqueza, apoyar el abastecimiento de las ciudades e incrementar las exportaciones. En esa política general del desarrollo no se planteó el impacto ambiental ocasionado por las actividades económicas, ni por la concentración de la población.

Esta dinámica económica influyó en el deterioro del ambiente y no fue sino hasta 1970, ya que había indicios de impactos crecientes, particularmente en términos de contaminación atmosférica y generación de desechos, que se empezaron a manejar los primeros criterios ambientales para el desarrollo. Se estima que entre 1950 y 1960 el incremento de efectos adversos al ambiente sufrió una notable aceleración, debido al aumento de la presencia de ciertas ramas industriales y tecnologías que producían más contaminación. Adicionalmente, las afectaciones ambientales derivadas de la industria eran asumidas como efectos locales y eran percibidas a una escala que, se pensaba, no ameritaba una preocupación mayor. En cuanto al uso de recursos naturales y la explotación agrícola y ganadera, predominaba la idea de éstos como fuente inagotable y, por tanto, sin necesidad de imponer restricciones.

A partir de 1970 el gobierno de México inició acciones preliminares para controlar el comportamiento ambiental de la industria y de la explotación de los recursos naturales con el establecimiento de leyes, reglamentos y normas que rigen las actividades de estos sectores, con el fin de integrar al desarrollo la visión de sustentabilidad. Estos instrumentos legales se han modificado hasta constituir lo que hoy conocemos como la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1996), significando un paso importante en el desarrollo de la legislación ambiental en México.

En la actualidad, debido al proceso de globalización y la apertura de los mercados de bienes y servicios, el tema ambiental está siendo incorporado como una variable fundamental de negociación económica internacional, principalmente en cuanto a los esquemas regulatorios que rigen dichas negociaciones. Por esta razón, México ha adquirido compromisos internacionales que han motivado la formulación de políticas que requieren de un entendimiento de la problemática ambiental del país, de manera cada vez más detallado y preciso. En este contexto, las autoridades ambientales han implementado una serie de programas gubernamentales que tienen como objetivo la cuantificación de las emisiones

contaminantes del país, recabando la información bajo formatos de encuesta preestablecidos y la aplicación de metodologías de estimación de emisiones. Dicha información es fundamental para el desarrollo de políticas y establecimiento de objetivos y prioridades en la administración ambiental, así como para evaluar su desempeño.

Cabe aclarar que al hablar de administración ambiental, se hace referencia a todas las actividades técnico administrativas, financieras, legales y de planeación involucradas en la protección ambiental, acorde con los principios de salud pública, conservación de ecosistemas y desarrollo sustentable.

La inducción de estas prácticas de desarrollo demanda importantes esfuerzos para coordinar las decisiones de la iniciativa privada con los objetivos públicos, y sólo puede lograrse a través de la utilización de una amplia gama de instrumentos que deberán estar disponibles en la legislación ambiental y la estructura de las instituciones nacionales e internacionales.

### 1.1 Antecedentes

La descarga de contaminantes al ambiente, con la consecuente degradación de su calidad, es uno de los temas importantes a abordar dentro de las políticas ambientales y de un sistema de administración ambiental. Los contaminantes son descargados al ambiente en forma de gases, sustancias disueltas o como partículas, siguiendo una variedad de rutas entre los distintos medios (agua, aire y suelo).

Desde el punto de vista de la dimensión espacial de las emisiones contaminantes y de los mecanismos a través de los cuáles éstos son descargados al ambiente, es posible clasificar las fuentes de emisión en *fuentes puntuales* y *fuentes difusas*. Estas últimas también llamadas *fuentes de área* cuando la emisión es al aire y *fuentes no-puntuales* cuando la emisión es al agua o al suelo. Aunque no existe una distinción absoluta para esta clasificación, es posible decir que la diferencia básica entre estos tipos de fuente es que, en el caso de las fuentes puntuales, las emisiones contaminantes pueden ser medidas directamente ya que se descargan por un ducto o punto claramente definido en el espacio. No ocurre así con las fuentes difusas, que corresponde al resultado de la acumulación de una actividad dada en una región delimitada. Ejemplos de fuentes puntuales son las industrias y las plantas de tratamiento de agua, mientras que como fuentes de área podemos citar a la agricultura, los bosques y la escorrentía superficial urbana.

Cuando se quiere conocer las emisiones al ambiente, existen fuentes puntuales que resulta más conveniente tratarlas de manera colectiva y considerarlas, en su conjunto, como una fuente difusa. La razón principal para no tratar estas fuentes como puntuales es que el esfuerzo requerido para coleccionar la información de cada una y estimar su emisión es muy grande y las emisiones individuales son, por lo general, muy pequeñas; un ejemplo de eso son las pequeñas industrias y las tintorerías.

Complementando la clasificación anterior de fuentes de emisión, desde el punto de la movilidad espacial de una fuente, éstas se clasifican en *fuentes fijas* y *fuentes móviles*. La diferencia entre ellas radica, claramente, en que las primeras permanecen siempre en un

lugar fijo (ej: industrias) y las segundas tienen la capacidad de trasladarse en el espacio (ej: cualquier tipo de transporte).

Aunque para conocer la cantidad de contaminantes emitida al ambiente por una fuente, siempre es preferible realizar su medición directa, en muchos casos esto no es factible técnica o económicamente, especialmente para fuentes difusas. Por este motivo, es preferible adoptar una metodología para estimar indirectamente estas emisiones. El mejor método será aquel que entregue los resultados de mayor calidad sin exceder la capacidad de recursos, tanto humanos como materiales, disponibles para realizar la estimación.

Normalmente, la información acerca de las emisiones contaminantes de las distintas fuentes son compiladas en los llamados *registros de emisión*. A partir de la Agenda XXI (ONU, 1992), varias organizaciones internacionales han promovido la implementación de estos sistemas de información ambiental en el mundo. México se ha sumado a estos esfuerzos y es así como desde hace algunos años está desarrollando el llamado *Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes* (RETC), en el que se pretende compilar todas las emisiones contaminantes del país.

Una de las fuentes difusas consideradas por las autoridades ambientales como prioritaria dentro del RETC, corresponde a las actividades del sector agrícola y ganadero. Aunque la importancia económica de la agricultura, en términos del PIB, ha disminuido desde la década del 40 hasta la fecha, México continúa siendo un país con una fuerte componente agrícola. Así como las actividades de este sector proveen los alimentos base de la población mexicana y son, además, fuente de exportaciones, a su vez son generadoras de emisiones contaminantes de difícil manejo y control. Dado lo anterior, se plantea el presente estudio que tiene por objetivos, alcances y limitaciones los que se describen a continuación.

## 1.2 Objetivo

Establecer una metodología para la estimación de emisiones de la agricultura en México, a través de métodos indirectos de estimación aplicables a fuentes difusas.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión detallada de los inventarios de emisiones y tendencias ambientales a nivel mundial.
- Análisis del desarrollo y estado actual del RETC.
- Análisis de la importancia económica del sector agrícola y ganadero en México y de sus potenciales emisiones contaminantes.
- Compilación y análisis de las metodologías para la evaluación de fuentes difusas, especialmente las aplicables a la agricultura.
- Establecimiento de la metodología adecuada para evaluar las emisiones de los sectores agrícola y ganadero.
- Propuesta de los lineamientos para aumentar la confiabilidad de las estimaciones, en particular de los factores de emisión empleados.

- Finalmente, y a manera de ejemplo, se realizó la estimación de las emisiones de vapores de paratión metílico debido a la aplicación de éste como plaguicida a nivel nacional, y la emisión de óxido nitroso y metano por ganado bovino en un estado de la República Mexicana.

El desarrollo de cada una de las actividades arriba listadas corresponde a una sección de este documento, agregando este capítulo introductorio y un capítulo final de conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

### **1.3 Alcances y limitaciones**

Finalmente, en este capítulo se mencionarán los alcances y limitaciones que existen en este trabajo:

#### ***Alcances***

- El presente estudio analiza la situación de los registros de emisiones tanto a nivel internacional como en el caso particular de México y dentro de este contexto se establece la importancia de incluir las emisiones de fuentes difusas, particularmente las emisiones de la agricultura (actividades agrícolas y ganaderas).
- Para la evaluación indirecta de las emisiones provenientes de fuentes difusas, se analizan los métodos generales existentes y la experiencia internacional relacionada; estableciendo criterios generales para la aplicación de los métodos más adecuados para la estimación de emisiones de la agricultura en países como México.
- Posteriormente se propone el procedimiento para evaluar los resultados obtenidos y se establece la aplicabilidad de los métodos seleccionados y los lineamientos de calibración para su uso en México.
- Como ejemplo de aplicación de las técnicas analizadas, se realiza la estimación de emisiones contaminantes de la agricultura a nivel nacional, como resultado del empleo de paratión como plaguicida y, a nivel estatal, de los gases invernadero generados por la actividad ganadera.

#### ***Limitaciones***

Así como se resaltan los alcances de este trabajo, es importante establecer las limitaciones del mismo, las cuales son producto principalmente del marco institucional dentro del que fue realizado y de la información y recursos disponibles.

- Dado el carácter académico del estudio, el objetivo principal del mismo fue el análisis exhaustivo de los métodos indirectos de estimación recomendados en la literatura, el establecimiento de las bases teóricas para los que pudieran ser usados en la agricultura y la justificación de su posible empleo para los casos de interés del RETC. Por lo tanto, no se consideraron otras fuentes difusas, ni tampoco aquellos métodos cuya aplicación resultase complicada para el carácter de este primer inventario.

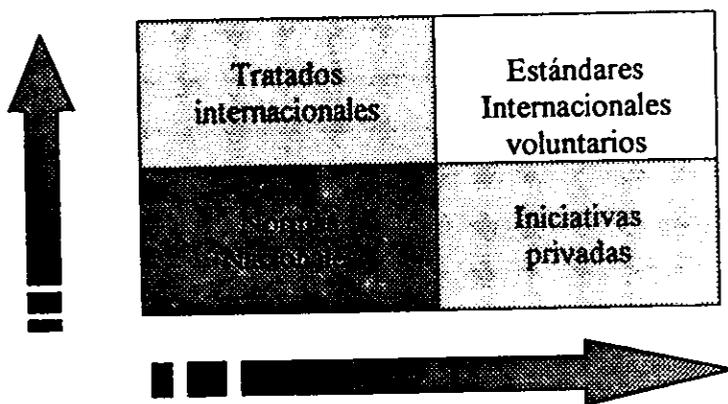
- Al mismo tiempo, y por las mismas razones, no se realizó la etapa de calibración de los factores de emisión seleccionados para la estimación de emisiones, indicándose solamente la manera estadísticamente correcta de realizar dicha calibración.
- Finalmente, se debe destacar que la metodología propuesta para el análisis de los factores de emisión empleados no incluye la determinación exhaustiva de todas las posibles variables que pueden afectar la emisión. La justificación de lo anterior se sustenta en consideraciones de tipo económico, ya que no se creyó conveniente asociar costos excesivos a la etapa de validación y reducir con esto las bondades económicas del empleo de métodos indirectos de estimación.

## 2. SISTEMAS DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL Y REGISTROS DE EMISIONES

La atención de los problemas ambientales requiere del uso de instrumentos legales y de la participación de las instituciones a cargo del diseño e implementación de dichos instrumentos, dentro de una estructura coherente que asegure alcanzar las metas ambientales propuestas. Frente a desafíos ambientales crecientes y a los rápidos cambios a nivel mundial, existe una constante necesidad por desarrollar instrumentos que permitan traducir los requerimientos de sustentabilidad en acciones concretas. En este contexto, las organizaciones internacionales encargadas de la problemática ambiental desarrollan lineamientos y promueven tendencias, iniciativas y conceptos ambientales con el fin de que los países los implementen y, de esta manera, se avance hacia el desarrollo sustentable de manera eficiente.

Es así como el cumplimiento de los tratados internacionales y de la reglamentación ambiental nacional, ha creado una tendencia hacia la organización de documentos que detalle cualitativa y cuantitativamente las emisiones de contaminantes que permita verificar la eficiencia de las medidas de control y evitar el incumplimiento de la reglamentación. Estas acciones benefician tanto al sector privado como a las autoridades competentes y a la población en general, ya que se posee un registro adecuado de datos ambientales.

La figura 2.1 muestra la importancia de los convenios internacionales, los cuales debilitan la normatividad nacional ambiental que pretende imponer el cumplimiento ambiental mediante sanciones económicas, favoreciendo en su lugar a los sistemas voluntarios de administración ambiental que *premiar*, mediante incentivos económicos, el continuo mejoramiento en el desempeño ambiental.



**Figura 2.1: Tendencia de la Administración Ambiental**

Es importante destacar la creación de modelos internacionales voluntarios de administración ambiental, los cuales manejan la conducta ambiental como puerta de entrada y crecimiento dentro de los mercados internacionales. Se pretende con esto, un incremento de empresas y actividades con regulación ambiental interna y consecutivamente un decremento en los niveles de contaminación.

En la práctica, las mayores aplicaciones de lo anteriormente expuesto se han llevado a cabo en empresas del sector industrial. En este ámbito, entre los modelos internacionales de administración ambiental más importantes se encuentra: ISO 14000 (del inglés International Standard Organization, serie 14000), el British Standard 7750 y el código ambiental de la Unión Europea, Eco Management and Audit Scheme (EMAS).

A continuación se presenta el enfoque de sistemas en la administración ambiental y se describe cómo se insertan los registros de emisiones dentro de dicho enfoque.

## **2.1 Registros de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (PRTR)**

En general, un sistema es una colección de elementos que funcionan juntos para alcanzar un objetivo. Aunque el enfoque de análisis de sistemas puede ser utilizado en muchas disciplinas, en cualquiera de sus aplicaciones es necesario definir claramente:

- a) Objetivo del sistema
- b) Elementos del sistema
- c) Interrelaciones entre los elementos del sistema
- d) Entradas y salidas
- e) Límites y restricciones del sistema

Para el correcto funcionamiento de un sistema, para su estudio y/o control, es indispensable su pleno conocimiento. Esto es, poseer la información suficiente para identificar cada uno de los elementos del sistema, su importancia y la relación entre dichos elementos. De aquí que, dentro de los sistemas de administración ambiental, se recurre a los inventarios de emisiones (registros de contaminantes emitidos) como herramientas fundamentales del sistema.

Un PRTR<sup>1</sup> es un inventario o registro de emisiones y transferencia de contaminantes, en forma de base de datos de acceso público, que contiene información acerca de un conjunto de sustancias contaminantes o potencialmente peligrosas, provenientes de diversas categorías de fuentes, emitidas al ambiente (aire, agua o suelo). Los PRTRs son una de las iniciativas ambientales derivadas de las recomendaciones de la Conferencia de Río y la Agenda XXI, y ya son varios los países que se han abocado con éxito a la tarea de desarrollar e implementar estos instrumentos de administración ambiental que ayudan a conocer el estado actual del medio en el que vive la población, satisfaciéndose el 'derecho a saber' (*right to know*) de la población, además de servir como un punto de partida para

---

<sup>1</sup> Del inglés: Pollutant Release and Transfer Register

prevenir y reducir la contaminación así como priorizar la restauración de áreas ambientalmente dañadas.

Un PRTR tiene el potencial de ayudar a alcanzar una variedad de metas ambientales y debe ser utilizado como un instrumento de política ambiental que colecta información para estimular a los emisores a disminuir sus emisiones y entregar al gobierno un amplio soporte público para el desarrollo y evaluación de sus políticas ambientales. Para que un PRTR actúe realmente como un instrumento útil para preservar y proteger el ambiente y promover el desarrollo sustentable, existen algunos principios generales a considerar en su diseño (OECD, 1996; CCA, 1996):

- La información contenida en el registro debería permitir la identificación, evaluación y consecuente reducción de posibles riesgos ambientales producto de emisiones y/o transferencia de contaminantes y mejorar la calidad del ambiente.
- Deberá ser usado para promover la prevención de la contaminación en la fuente, esto es, estimular el uso de tecnologías limpias, las prácticas de buen manejo, etc.
- La información del registro deberá ser usada para evaluar el progreso de las políticas ambientales y evaluar qué tan cerca se está, o se puede estar, de las metas ambientales establecidas y para ayudar en la identificación de prioridades gubernamentales.
- En todas las fases de implementación del registro deberá promoverse la participación y el interés de los diversos sectores sociales y económicos, públicos y privados, observando transparencia y objetividad en todo momento.
- El enfoque del registro deberá apuntar hacia la integración de los esfuerzos de prevención y control de la contaminación, a través de su armonización y racionalización con los requerimientos de reporte existentes.
- El registro deberá cubrir un número apropiado de sustancias potencialmente peligrosas para la salud de las personas y/o el ambiente.
- Además de fuentes puntuales, se deberá incluir fuentes difusas que emitan o transfieran alguna(s) de la(s) sustancias de interés.
- El resultado de un PRTR deberá estar disponible para todos los interesados dentro de un plazo razonable con el fin de incrementar el conocimiento del público y las industrias, con respecto a los tipos y cantidades de sustancias tóxicas o contaminantes emitidos al ambiente y transferidos como residuos.
- Un PRTR deberá ser susceptible de ser modificado de acuerdo a cambios en las necesidades de las partes interesadas.
- La información deberá permitir su verificación y hacer posible su representación geográfica.
- Los PRTR de distintos países deberán permitir, tanto como sea posible, la comparación de la información contenida en cada uno de ellos y fomentar la cooperación internacional.
- La información colectada deberá ayudar al control de sustancias reguladas por la normativa local, así como la información necesaria para el cumplimiento de acuerdos internacionales.

Como primeros pasos para el establecimiento de un PRTR, se debe realizar el diseño básico del registro, definiendo sus elementos los resultados esperados. Generalmente, la base de

datos se alimenta del reporte periódico de fuentes puntuales prioritarias y se incluyen estimaciones de emisiones de fuentes no puntuales o de área. En cualquier caso, los elementos a considerar en el diseño básico de un PRTR son:

- a) Metas, objetivo y alcances
- b) Glosario de términos
- c) Tipos de fuentes a incluir y sus prioridades
- d) Listado de sustancias a incluir
- e) Aspectos legales e interrelaciones con otros instrumentos de gestión ambiental.
- f) Recolección y manejo de la información
- g) Resultados esperados
- h) Programa de difusión de la información para su consulta
- i) Programas de entrenamiento

De acuerdo a las metas, objetivos y alcances del PRTR, se debe definir qué tipo de fuentes entrarán en el registro, en orden de prioridad, y cómo éstas serán agrupadas:

- **Fuentes puntuales:** grandes, medianas y pequeñas industrias u otro tipo de instalaciones; es necesario definir criterios que justifiquen qué fuentes puntuales reportarán sus emisiones y transferencias y cuáles pueden ser excluidas o manejadas como fuentes no puntuales o de área (ej.: número de empleados, producción, volumen mínimo de emisiones, etc.)
- **Fuentes difusas (no puntuales y de área):** ya que las emisiones de este tipo de fuentes corresponden al resultado de la acumulación de una actividad dada en una región delimitada pero no puntual, se realizan estimaciones de emisiones a través de la aplicación de metodologías indirectas que combinan información de monitoreo ambiental con información estadística de indicadores de la actividad (ej.: número de vehículos, población de animales, cantidades de fertilizantes y/o pesticidas aplicados, etc.).

La implementación de un PRTR deberá reportar beneficios tanto al gobierno, como a los responsables de las fuentes emisoras y a la población en general. En el caso del gobierno, es posible esperar los siguientes beneficios:

- Permite establecer prioridades para la reducción o, incluso, la eliminación de las emisiones de algún(os) contaminante(s), con el objetivo de disminuir los riesgos de la salud de la población y al ambiente.
- Como instrumento de prevención de la contaminación, ayuda a disminuir la intensidad en la aplicación de instrumentos de control, los que requieren mayores recursos para el monitoreo y fiscalización.
- Se cuenta con información ambiental a nivel local, regional, nacional e internacional, que podría ser utilizada para:
  - Alimentar modelos de contaminación ambiental
  - Evaluar riesgos ambientales
  - Ayudar en la planeación del uso del suelo y en la toma de decisiones para la entrega de licencias de operación

- Proveer información para el cumplimiento de convenios y acuerdos internacionales, etc.
- Favorecer los programas de reciclaje y reuso de desechos industriales y municipales.

Por otra parte, es posible que para los que deben reportar sus emisiones la información les muestre que están desperdiciando sustancias que podrían ser de utilidad. Si la industria toma las medidas adecuadas esto puede llevar a una disminución de costos, aumento de la eficiencia y reducción del riesgo ambiental. Por otra parte, también es posible obtener beneficios al presentar una imagen pública de 'industria con buen comportamiento ambiental'.

A continuación se describen algunas de las experiencias más avanzadas en cuanto a PRTRs en el mundo y el caso de México.

### **2.1.1 Experiencia Internacional**

La Conferencia de Río fue el punto de partida para el establecimiento de PRTRs. La creación de herramientas como estos registros se recomienda en otros acuerdos internacionales, como en el capítulo 19 de la Agenda XXI, que resalta la importancia de la recopilación de datos y la difusión de la información ambiental. Los países presentes en Río acordaron que estos registros deberán implementarse antes del año 2000.

Los PRTRs no son nuevos en el marco internacional, ejemplos de estos son el Toxic Release Inventory (TRI) de los Estados Unidos de Norteamérica, el National Pollutant Release Inventory (NPRI) de Canadá, así como los de otros países de Europa, cuyo funcionamiento sirve para comprobar los beneficios de estas herramientas. Sin embargo, al contener estas herramientas información local (nacional), no es posible realizar una estimación de las emisiones contaminantes a nivel mundial debido al vacío de la información de los países en vías de desarrollo.

Por esta razón, y convencidos de que el buen desempeño ambiental de todos los países trascenderá en beneficio de todos, el Instituto de las Naciones Unidas para la formación profesional (UNITAR<sup>2</sup>), en cooperación con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la Organización Mundial de la Salud, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) iniciaron un programa para establecer la posibilidad de desarrollo de PRTRs en países en vías de desarrollo, como una herramienta de administración ambiental efectiva.

Con este propósito, el UNITAR inició proyectos piloto en la República Checa, Egipto y México para adquirir experiencia en cuanto a las oportunidades y retos asociados al establecimiento de estos sistemas en países en vías de desarrollo (UNITAR, 1997). Para los nuevos PRTRs a desarrollar, entre los que se encontraba el PRTR mexicano (RETC) se tomaron como antecedentes el TRI, el NPRI y los inventarios europeos. Aún cuando existen otras experiencias internacionales en el desarrollo de inventarios de emisión, como

<sup>2</sup> Del inglés: United Nations Institute for Training and Research.

son los de Australia y el Reino Unido, a continuación se describen brevemente los casos del TRI, NPRI y el inventario de emisiones de Holanda (PER) ya que son éstos los que llevan más tiempo de operación.

### ***INVENTARIO DE EMISIONES TOXICAS DE ESTADOS UNIDOS (TRI)***

El PRTR más antiguo en América del Norte es el TRI<sup>3</sup> de Estados Unidos creado en 1987. Actualmente, es la fuente más importante de información de la United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) y es consultado por numerosos usuarios del sector industrial, académico y público en general.

Antes del TRI, las industrias estadounidenses tenían que presentar diversos formatos con información sobre las emisiones a la atmósfera, descargas de aguas residuales y generación y manejo de residuos, a diferentes identidades federales y/o estatales. Ahora, esta misma información se presenta en un solo formato, constituido por una página para cada sustancia contaminante incluida en la lista de reporte, y toda la información se captura en una base de datos única, lo cual ayuda a establecer las prioridades nacionales.

La lista de productos químicos tóxicos incluidos en el TRI se elaboró a partir de las listas estatales de productos químicos peligrosos utilizados en la industria manufacturera. La lista original contenía 309 productos químicos y 20 categorías<sup>4</sup>. La lista ha cambiado paulatinamente al ser evaluada por la U.S.EPA con base en los efectos agudos, el potencial carcinogénico y otros efectos sobre la salud humana y/o sus efectos adversos sobre el ambiente. En 1994, se modificó esta lista a 346 productos químicos y 22 categorías de sustancias químicas (CCA, 1996).

Desde su versión de 1996, el TRI ha incorporado una nueva sección sobre fuentes difusas que entrega información de tres tipos de químicos, estos son: fertilizantes, plaguicidas y COVs<sup>5</sup> (U.S.EPA, 1998).

Según datos de la U.S.EPA, el TRI ha llegado a disminuir indirectamente la emisión y transferencia de contaminantes, ya que ayudó a establecer criterios para la regulación ambiental. Además a los industriales se les pide información, como niveles de producción y número de empleados, que les permite ordenar su información para mejorar los procesos productivos y puede resultar en la creación de programas internos de administración ambiental.

El impacto del TRI sobre la comunidad también ha sido de gran importancia. Los datos publicados por la U.S.EPA se consultan constante y detalladamente y se emplean para artículos en diferentes periódicos, llegando así a todos los sectores del país. Durante los años de funcionamiento del TRI su información se ha empleado tanto para actos de denuncia, como para establecer programas de cooperación entre los afectados: industria, gobierno, organizaciones no gubernamentales y la comunidad en general.

---

<sup>3</sup> Del inglés: Toxic Release Inventory.

<sup>4</sup> Grupos de productos químicos estrechamente relacionados.

<sup>5</sup> Compuestos Orgánicos Volátiles

## ***INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES CONTAMINANTES DE CANADA (NPRI)***

El NPRI<sup>6</sup> es el registro de emisiones de contaminantes de Canadá. Abierto al público y operando desde 1993, sus principales usuarios son las industrias, el gobierno, las universidades y organismos no gubernamentales. Como resultado de la implementación del NPRI, Canadá y Estados Unidos han creado varios programas ambientales de beneficio mutuo.

El NPRI solicita información sobre 178 productos y 14 categorías de sustancias, las cuales fueron seleccionados a partir de una revisión de las listas utilizadas por el TRI y el Canadian Chemical Producers Association National Emissions Reduction Masterplan (NERM), además de revisarse diez listas adicionales de otros programas reglamentarios, identificándose 78 sustancias candidatas a ser incluidas en años próximos. En la lista actual no se incluyen las sustancias cuya prohibición y retiro ya han sido programados, ni aquellas que aparecen en cantidades menores a una tonelada (CCA, 1996).

Actualmente el NPRI, al igual que el TRI, se utiliza en una gran variedad de formas. Las firmas de bienes raíces, bancos y otras empresas revisan estos registros ambientales antes de adquirir alguna instalación industrial; las corporaciones legales y de ingeniería los utilizan como antecedente para las auditorías ambientales, mientras que las asociaciones industriales examinan los registros de sus miembros, al igual que los proveedores de tecnología anticontaminante, para identificar a sus posibles clientes.

Otra contribución del NPRI, en sus pocos años de implementación, ha sido la reclasificación de prioridades ambientales para algunos productos químicos, pues se demostró que sus concentraciones en el ambiente eran superiores a las esperadas, o se detectaron áreas críticas que requerían de la formulación de planes de control.

## ***REGISTRO DE EMISIONES CONTAMINANTES DE HOLANDA (PER)***

Holanda ha desarrollado el llamado *Registro de Emisiones Contaminantes* (PER<sup>7</sup>). Este comprende el registro, análisis, localización y presentación de datos de emisión al aire, agua y suelo, de fuentes industriales y no industriales en Holanda. El PER sirve como instrumento nacional de monitoreo de emisiones y se actualiza cada año. La información se almacena en una base de datos, que está a disposición para el desarrollo de políticas e investigación.

Este inventario se divide en dos partes principales:

- a) **Sistema individual o Inventario de Emisiones Individuales (IEI<sup>8</sup>)**: emisiones de grandes fuentes puntuales (de un total de 40000 industrias: 700 y 1300 fuentes con emisiones al aire y al agua, respectivamente, en 1995, y 500 y 1100 en 1996). El IEI se

---

<sup>6</sup> Del inglés: National Pollutant Release Inventory.

<sup>7</sup> Del inglés: Pollutant Emission Register.

<sup>8</sup> Del inglés: Individual Emission Inventory.

alimenta básicamente con la información que reportan las industrias, y la de algunas campañas de monitoreo de descargas de aguas residuales que realiza el gobierno. Toda esta información puntual es de carácter confidencial y puede ser consultada sólo de manera agregada.

- b) **Sistema colectivo o Inventario de Emisiones Colectivas (CEI<sup>9</sup>):** sistema de información geográfico, en el que se representan emisiones de fuentes industriales pequeñas y fuentes difusas. Las emisiones de fuentes difusas de tráfico y otras fuentes móviles, las de instalaciones residenciales y de la agricultura, son estimadas con datos estadísticos y usando factores de emisión.

El PER reúne información acerca de 170 contaminantes, los que incluyen aquellos que se encuentran en la normativa local, sustancias requeridas en convenios internacionales y algunos plaguicidas, agrupados en categorías y de acuerdo al medio al que son descargados. Esta información es agregada a nivel de temas ambientales, con el fin de realizar una evaluación anual de la efectividad de las políticas ambientales e identificar las prioridades gubernamentales (ej: cambio climático, capa de ozono, acidificación, eutroficación, etc) (Berdowski J.J.M et al, 1997 y 1998).

Con la información del PER, Holanda realiza estimaciones de emisiones totales nacionales (en el caso de aire) y por cuerpo receptor internacional (en el caso de agua), para verificar si está cumpliendo con los convenios internacionales en la materia y realizar comparaciones de emisiones per cápita con otros países involucrados en el problema.

A través del análisis de los resultados se realizan, por una parte, proyecciones del comportamiento futuro de las emisiones para la definición y evaluación de las políticas ambientales y, por otra parte, recomendaciones acerca de las nuevas medidas a adoptar en los problemas que se hayan detectado.

Una de las categorías de fuente prioritarias del PER corresponde al sector agricultura, cuyas emisiones están asociadas a todos los temas ambientales que Holanda está interesado en estudiar. Los resultados a través de los años han mostrado que las actividades de la agricultura en Holanda son generadoras de emisiones importantes de amoníaco, metano y óxido nitroso al aire, y emisiones al agua y suelo de compuestos nitrogenados y fosforados debidos al uso de fertilizantes (Berdowski J.J.M et al, 1998).

### **2.1.2 Experiencia en México**

Como ya se indicó, la justificación para desarrollar un PRTR en México se encuentra en el capítulo 19 de Agenda XXI, mientras que el punto de partida fue la iniciativa de UNITAR para establecer tres PRTRs en un número igual de países en vías de desarrollo (CCA, 1996; INE, 1997). Por otra parte, por la cercanía geográfica y los compromisos comerciales de México con Estados Unidos y Canadá, no es de sorprender que en nuestro país se hayan empleado el TRI y el NPRI como puntos de partida para el desarrollo del registro de emisiones que se presenta a continuación.

---

<sup>9</sup> Del inglés: Collective Emission Inventory.

Adicionalmente, en 1992 México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 1992 que luego la ratificó en 1993. En ella, adquirió compromisos tales como realizar y publicar inventarios de emisiones, tomar medidas de protección y promover la conservación de sumideros y depósitos de gases invernadero. En 1996 se realizaron estimaciones de gases invernadero basados en información de 1990.

El PRTR mexicano se conoce por sus siglas en español, RETC (Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes), y sus objetivos fundamentales son (INE, 1997):

- Proporcionar información sobre las emisiones de sustancias que representen riesgos para la salud y el ambiente, para apoyar los mecanismos que faciliten la evaluación de estos riesgos, difundiendo los resultados de estas evaluaciones.
- Proporcionar una base de información confiable y actualizada sobre la emisión y transferencia de contaminantes específicos a los diferentes medios (aire, agua y suelo), que ayude en la toma de decisiones y en la formulación de políticas ambientales en México.
- Permitir el seguimiento y evaluación de los avances en el abatimiento de emisiones contaminantes a los distintos medios.
- Simplificar y racionalizar la información que proporcionan las empresas, concerniente a la emisión y transferencia de algunos contaminantes previamente seleccionados.
- Construir un elemento adicional de administración ambiental para la toma de decisiones en las empresas.
- Generar un sistema de información sobre emisiones y transferencias de contaminantes que sirva para la elaboración de fuentes con información accesible y disponible al público en general.
- Generar un instrumento que sirva de base para que México cumpla con sus obligaciones internacionales de información ambiental.

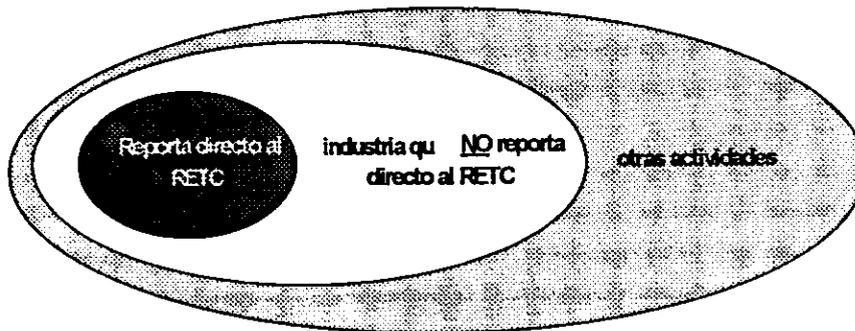
Las actividades para la implementación del RETC requirieron de la participación conjunta de los sectores involucrados. Por parte de la autoridad ambiental participaron, entre otros: el Instituto Nacional de Ecología (INE) como órgano central de coordinación, las delegaciones de la SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca), la CNA (Comisión Nacional del Agua) y la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección Ambiental); mientras que los sectores no gubernamentales estuvieron representados por la industria, las universidades, consultores ambientales y grupos ambientalistas.

El RETC incluye, además de las fuentes industriales de jurisdicción federal, las cuáles deben reportar anualmente sus emisiones y transferencias a través de la Cédula de Operación Anual (COA<sup>10</sup>), las emisiones derivadas de todos aquellos sectores, industriales y de servicios, que afectan el ambiente; y que no son sujetos de reporte directo ante la autoridad ambiental, por encontrarse fuera de la jurisdicción federal o por ser fuentes temporales o de emisión difusa.

---

<sup>10</sup> La COA constituye el formato de reporte anual de emisiones y transferencia de contaminantes ocurridas en el año calendario previo a su presentación.

Dado lo anterior, la lista de industrias que deben reportar al INE y/o a CNA, será complementada con otras posibles actividades y emisiones contaminantes como las emisiones domésticas de gas combustible y productos de combustión y aquellas producidas por vehículos automotores particulares (de gran importancia en centros urbanos). La contribución de estas descargas se ilustra en la figura 2.2, y se considera de gran importancia principalmente por el número de fuentes (puntos de emisión) que cada actividad representa.



**Figura 2.2:** Estructura del RETC

La evaluación de las emisiones que no se reportan al RETC a través de la COA ha sido iniciada por grupos especializados de investigación que producirán los datos necesarios para completar este registro. Dentro de este contexto, el presente trabajo corresponde a una propuesta metodológica para la estimación de las emisiones derivadas de la agricultura, que ha sido establecida como una fuente prioritaria a desarrollar dentro del RETC.

## 2.2 Métodos indirectos de estimación de emisiones

Para la elaboración de los inventarios de emisiones arriba mencionados, al no poder emplear muestreo directo, por razones técnicas y/o económicas, es necesario recurrir a métodos indirectos de estimación, por lo que antes de aplicar estos métodos y establecer los casos en los cuales se recomienda el uso de cada uno de ellos se describirán brevemente los métodos más empleados, los cuales se agrupan en: extrapolación, balance de materiales, modelos matemáticos y factores de emisión.

### 2.2.1 Extrapolación

Se trata de extrapolar desde una muestra de datos de emisiones, concentraciones, flujos, etc, para toda la población industria/actividad o categoría de fuente que se quiere estimar. A menudo se requiere realizar un muestreo estadísticamente válido, cuando no existan datos confiables previos.

La aplicación de este método es recomendable cuando los datos recopilados:

- corresponden a muestras representativas,
- se obtienen por procedimientos validados y estandarizados,
- las industrias/actividades sobre las cuales se extrapola pertenezcan a una misma población.

### 2.2.2 Balance de materiales

El balance de materiales corresponde a la comparación entre las cantidades de entrada y salida de un proceso o parte de éste y resulta ser un método útil tanto para estimar emisiones totales como para desarrollar factores de emisión y evaluar la eficiencia del proceso o actividad. Este método puede ser el más preciso, especialmente cuando el balance cubre un periodo largo, preferentemente un ciclo completo y las pérdidas de material a un medio distinto de aquel para el cual se está estimando la emisión, son pequeñas; en caso contrario, se pueden obtener resultados muy alejados de la realidad.

En un balance de materiales se contabilizan los flujos y transformaciones de una sustancia en el proceso global o en cualquier parte arbitraria de éste, basándose en el principio de conservación de la materia (figura 2.3).



**Figura 2.3:** Balance de materiales

El uso de este método requiere disponer de la información relacionada con los flujos de entrada y salida de materiales, así como de su composición química y del estudio del proceso para determinar si las emisiones pueden ser estimadas conociendo solamente la información mencionada o es necesaria información adicional.

### 2.2.3 Modelos matemáticos

Este método es usado cuando las emisiones están directamente relacionadas no sólo con un parámetro del proceso sino que con muchos más. Un modelo puede ser una simple

ecuación, pero generalmente se presenta en forma de programa de cómputo, el cual procesa un gran número de ecuaciones e interacciones, ya sean empíricas, estadísticas o analíticas.

Los modelos matemáticos usados para predecir emisiones de fuentes contaminantes intentan reproducir o simular el comportamiento de los procesos que generan emisiones. De esta manera, para formular un modelo se suelen utilizar ecuaciones de ingeniería (ecuaciones de equilibrio de fases, principios físico-químicos, especificaciones de diseño, etc), factores de emisión, información estadística y correlaciones empíricas. El uso de un modelo requiere alimentarlo con información de entrada tal como datos del proceso, condiciones climáticas, constantes cinéticas de reacción, propiedades físicas y químicas de las sustancias cuya emisión se quiere estimar.

Si un modelo ha sido extensamente probado y validado, es capaz de generar resultados precisos, dependiendo de la calidad de los datos de entrada y de la bondad del ajuste del modelo al caso particular sobre el cual se está aplicando.

#### 2.2.4 Factores de emisión

Esta es una de las herramientas más útiles para la estimación de emisiones. Un factor de emisión ( $f$ ) es una estimación de la cantidad de contaminantes emitidos al medio como resultado de un proceso definido, respecto del nivel de actividad de dicho proceso. En la mayoría de los casos los  $f$  son simplemente un número, donde queda supuesto que existe una relación lineal entre emisión y nivel de actividad, en el rango de aplicación más probable. Así, los  $f$  pueden ser vistos como modelos simples donde existe una relación directa y lineal entre la emisión de un contaminante y un parámetro único.

Como  $f$  relaciona la cantidad de un contaminante con un parámetro del proceso, en el caso de las fuentes difusas muchas veces será necesario contar con un  $f$  basado en un parámetro indirecto tal como: la población, el nivel de empleo en una industria, número de cabezas de ganado, etc.

Parte del atractivo del uso de  $f$  es la simplicidad del método. La ecuación 2.1 corresponde a la forma general para el cálculo de las emisiones usando un factor de emisión ( $f$ ), en donde  $N$  es el nivel de actividad y se incluye un factor de corrección ( $r$ ) que se aplica en los casos en que exista algún tipo de control de emisiones.

$$E = N * f (1 - r/100) \quad (2.1)$$

Dado que los  $f$  corresponden típicamente a promedios obtenidos de datos dentro de amplios rangos y grados de precisión variable, las emisiones calculadas de esta manera para una fuente dada, probablemente diferirán de las emisiones reales de dicha fuente. En el caso de las fuentes difusas, los  $f$  son apropiados para la estimación colectiva de emisiones de un número grande de fuentes puntuales pequeñas o una fuente difusa que sería difícil, si no imposible, estimar usando otros métodos. Si los factores son usados para predecir emisiones de un nuevo tipo de fuentes, se deberá revisar la literatura y tecnología disponibles para determinar si las emisiones de tales fuentes tendrán o no características semejantes a las de las fuentes existentes.

En caso de que la información usada para el desarrollo de un  $f$  esté basada en datos de otros países o de nivel nacional, debería ponerse especial cuidado con potenciales variaciones locales. Los  $f$  extranjeros o los de nivel nacional deberán ser usados sólo cuando no se cuente con  $f$  locales, lo cual es el caso para muchas de las aplicaciones que se les quiere dar en México. Algunas referencias para la búsqueda de  $f$  dentro de la literatura especializada son:

- **Factor Information Retrieval System (FIRE):** consolidación de  $f$  para contaminantes criterio y atmosféricos peligrosos. Cada  $f$  incluye información acerca del contaminante y la fuente, comentarios acerca de su desarrollo, métodos de cálculo y características de las fuentes (EPA 454C95002, 1995; <http://www.epa.gov/ttn/chief/index.htm>).
- **CHIEF BBS:** contiene el volumen de fuentes estacionarias del AP-42 y los borradores en revisión, la base de datos SPECIAPE y la serie de documentos L&E, también contiene modelos (<http://www.epa.gov/ttn>).
- **AP-42:** compila descripciones de fuentes, procesos,  $f$  e información para el control de procesos (U.S.EPA, 1995; <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42html#chapter>).
- **Handbook of Emission Factors,** Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Government Publishing Office, The Hague (1983).

Para representar las variaciones respecto a las condiciones para las cuales el  $f$  fue desarrollado o cuando la tasa de emisión de la fuente ha cambiado respecto de la actividad, dicho factor se corrige con un factor de corrección (ecuación 2.2), el que debe ser estimado considerando:

- la naturaleza del cambio en el proceso
- la magnitud del cambio en las emisiones
- el efecto sobre la emisión de las condiciones locales particulares

$$f_c = \gamma * f \quad (2.2)$$

donde,

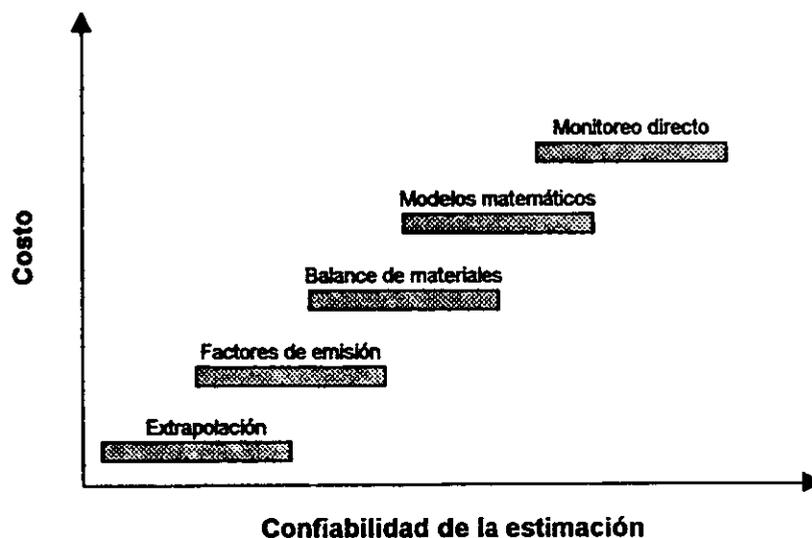
- $f$  = factor de emisión original
- $f_c$  = factor de emisión corregido
- $\gamma$  = factor de corrección

La confiabilidad de un  $f$  es mayor mientras más variables hayan sido consideradas para la determinación de éste y la estimación de emisiones usando este  $f$  será más confiable cuando las condiciones reales de la aplicación sean lo más parecidas a las condiciones para las cuales éste fue desarrollado. También es importante recordar que el uso de  $f$  entregará estimaciones más precisas cuando se aplique sobre una región grande (cuenca, estado, etc) y por un período de tiempo largo (año).

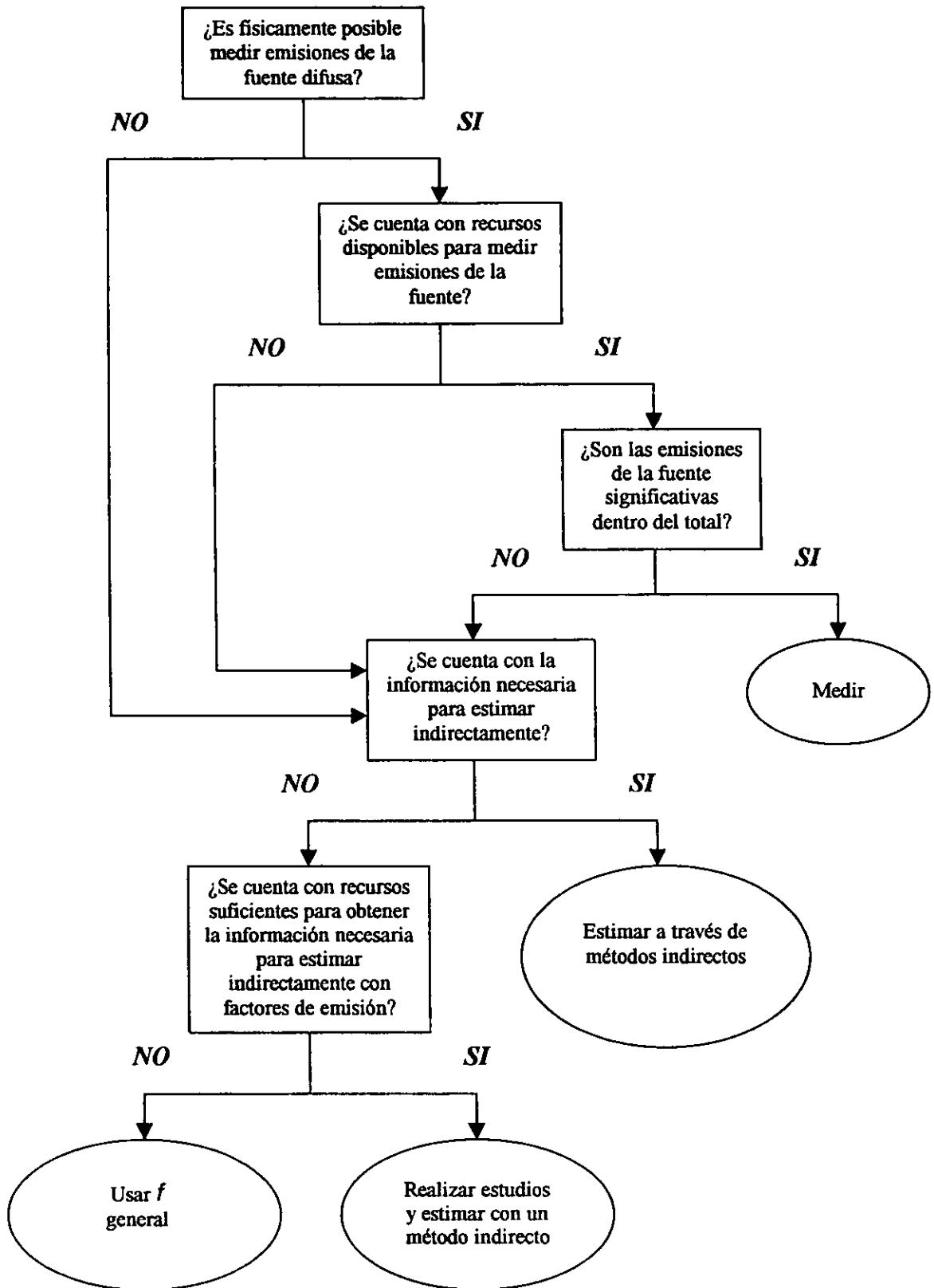
La figura 2.4 muestra una relación entre el costo de la estimación y la confiabilidad de los distintos métodos de estimación descritos, mientras que la figura 2.5 muestra el proceso de toma de decisiones para determinar cuál es el método de estimación más apropiado en una situación dada. En cualquier caso, la estimación de emisiones requiere un desarrollo y

refinamiento continuos con el fin de llegar a tener la confiabilidad que se requiere para el desarrollo de políticas ambientales y la evaluación de sus metas.

En la práctica, usualmente es necesario aplicar los métodos descritos combinados para obtener la estimación requerida.



**Figura 2.4:** Jerarquía de los métodos de estimación de emisiones de fuentes de área



**Figura 2.5:** Selección del método para estimar emisiones

### 3. FUENTES DE CONTAMINACION EN MEXICO

Las fuentes de contaminación de importancia en México se identifican y analizan a continuación, de acuerdo con el medio afectado. La información que se presenta está basada en *Estadísticas del Medio Ambiente* (INEGI, 1998a) a menos que se indique otra referencia.

#### 3.1 Contaminación del aire

La calidad del aire de una región está asociada a una serie de factores indicadores tanto de las actividades humanas que allí se desarrollan (cantidad, calidad y tipo de combustibles consumidos, tecnología de producción de las industrias y servicios existentes, nivel de concentración de las actividades productivas y de la población y tecnología de control de emisiones), como de las condiciones meteorológicas imperantes y de la interacción de los contaminantes y componentes naturales del aire que modifican la química atmosférica.

La evaluación de la calidad del aire en México se ha centrado en la instalación y operación de 75 estaciones de monitoreo atmosférico (EMA), distribuidas en varias redes ubicadas en las ciudades más grandes del país y algunos otros puntos de interés. En dichas estaciones usualmente se miden concentraciones de contaminantes tales como: partículas suspendidas totales (PST), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), hidrocarburos (HC), plomo (Pb), monóxido de carbono (CO) y fracción respirable del material particulado (PM-10).

De las 75 EMA que se encuentran actualmente operando, 39 operan en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), 8 en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y 5 en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), las 3 ciudades de mayor población, mayor cantidad de industrias y mayor concentración vehicular. En la tabla 3.1 se presenta la contribución de los distintos sectores a la cantidad de emisiones totales en cada una de las tres zonas metropolitanas:

**Tabla 3.1** Contribución de los distintos sectores al total de emisiones al aire

<b>Zona Metropolitana</b>	<b>Industria y servicios (%)</b>	<b>Transporte (%)</b>	<b>Suelos y vegetación (%)</b>
ZMCM (1)	12.9	75.5	11.6
ZMG (2)	5.0	74.0	21.0
ZMM (3)	7.2	53.3	39.5

FUENTE: *Estadísticas del medio ambiente* (INEGI, 1998a).

La problemática principal de estas metrópolis son el material particulado y contaminantes fotoquímicos, pudiendo mencionar los siguientes datos.

En términos generales, la calidad del aire en la ZMCM durante 1996 fue satisfactoria respecto del CO, SO<sub>2</sub> y Pb, que se mantuvieron la mayor parte del año por abajo de las normas de calidad respectivas y mostraron una clara tendencia descendente. Sin embargo, los niveles de O<sub>3</sub> son críticos, ya que se excede la norma de calidad la mayor parte del año, mientras que la tendencia del NO<sub>2</sub> mostró un aumento significativo en 1995 y 1996, después de que la tendencia en años anteriores había sido descendente. Gran parte de la contaminación de la Ciudad de México se debe al consumo de combustibles, asociándose los principales logros de mejoramiento de la calidad del aire al mejoramiento de la calidad de los combustibles. La mayor parte de las excedencias se presentan entre los meses de noviembre y febrero, coincidiendo con días en que no existe mezclado vertical en la parte baja de la atmósfera (De Nevers, 1998).

En la ZMG aún no se cuenta con suficiente información ya que la red de monitoreo comenzó a operar formalmente durante 1995. Tal como en el caso de la ZMCM, es el sector transporte el de mayor contribución a la contaminación global del aire, sin embargo, en este caso, los contaminantes con una participación más significativa son el CO (casi el 100% es producido por el transporte) y las PST (casi todas provenientes de suelos y vegetación). En cualquier caso, todos los contaminantes críticos exceden las normas de calidad en un número significativo de días por año.

En la ZMM, los contaminantes que se emiten en mayor cantidad son el CO del transporte y las PST, de las cuales el 93% proviene de suelos y vegetación. Sin embargo, se considera que los mayores problemas de contaminación de la ZMM lo constituyen las PM10 y el O<sub>3</sub>, especialmente durante los tres primeros y cuatro últimos meses del año.

De acuerdo con las estimaciones realizadas dentro del convenio firmado por México en la Convención sobre Cambio Climático, las emisiones de gases invernadero más significativas provienen del consumo de combustibles para la generación de energía (66.7%) y del cambio de uso de suelos (30%), mientras que el gas más emitido es el CO<sub>2</sub> (96.4%).

En este mismo contexto, la agricultura contribuye con el 7.1% sobre las emisiones totales de gases de efecto invernadero, con los siguientes porcentaje de emisión de los distintos gases sobre los totales nacionales: 49.3% del CH<sub>4</sub>, 49.4% del N<sub>2</sub>O, 1.1% de los NO<sub>x</sub> y 1.8% del CO. Estas contribuciones provienen principalmente de la producción y manejo de las excretas, de la fermentación entérica del ganado, del uso de fertilizantes y de la quema prescrita de residuos vegetales. La estimación de COVNM, a los que contribuye el uso de plaguicidas, no fue reportada.

### **3.2 Contaminación de cuerpos de agua**

Para evaluar la calidad del agua, en México se utiliza el Índice de Calidad del Agua (ICA) que agrupa varios parámetros indicadores del nivel de deterioro de ésta. El índice depende tanto del valor de los parámetros empleados como indicadores (alcalinidad, cloruros,

coliformes fecales y totales, color, conductividad, sustancias activas al azul de metileno, dureza, fósforo total, grasas y aceites, nitrógeno total, DBO<sub>5</sub>, oxígeno disuelto, pH, sólidos flotantes, suspendidos y disueltos y turbiedad), como de los usos específicos a las que un determinado cuerpo de agua está destinado. La escala ICA clasifica la calidad del agua en: excelente, aceptable, levemente contaminada, contaminada, fuertemente contaminada y excesivamente contaminada.

La CNA realiza una evaluación permanente de la calidad de las aguas a través de la operación de la Red Nacional de Monitoreo, formada por 793 puntos de muestreo que cubren todos los estados y 29 de las 37 regiones hidrológicas del país. La información generada ha permitido conocer cuáles son los cuerpos de agua más contaminados y afirmar que prácticamente todos los cuerpos de agua de México tienen problemas de contaminación. En 1994, alrededor del 68% de las muestras de aguas superficiales analizadas mostraban problemas de contaminación (59.1% clasificaban como contaminadas, 8.7% como fuertemente contaminadas y 18% excesivamente contaminadas). Los mayores problemas se concentran, principalmente, en la región de la Ciudad de México, mientras que la mejor calidad de aguas se concentra en la región noreste. Respecto del agua subterránea, el 92.3% de las muestras analizadas mostraban problemas de contaminación (39.6% clasificaban como contaminadas, 27.8% como fuertemente contaminada y 24.9 como excesivamente contaminada).

La evaluación realizada con toda la información de la Red, con datos desde 1975 hasta 1995, indica que los problemas de contaminación más importantes están estrechamente ligados a las zonas donde se concentra la mayor parte de la población del país y las actividades industriales y agrícolas. Durante el año 1996, estos sectores utilizaron, en forma consuntiva, alrededor de 186.7 km<sup>3</sup> de agua, de los cuáles cerca de 30.5 km<sup>3</sup> retornaron a los cuerpos de agua los que, con frecuencia, no tienen la capacidad para asimilar y diluir las cargas contaminantes. En la tabla 3.2 se describen las características generales de estos retornos.

**Tabla 3.2 Características de los retornos a los cuerpos de aguas**

<b>Sectores que descargan</b>	<b>Retornos (%) <sup>1</sup></b>	<b>Principales contaminantes</b>
Agrícola	69.4	Residuos agroquímicos, sedimentos
Industrias <sup>2</sup>	6.7	Amplia gama de contaminantes
Descargas municipales	23.9	Materia orgánica, microorganismos, compuestos tóxicos <sup>3</sup>

(1) Porcentaje en volumen.

(2) Que descargan directamente a cuerpos de agua y no al alcantarillado.

(3) Estos tóxicos provienen principalmente de descargas industriales conectadas al alcantarillado.

FUENTE: *Estadísticas del medio ambiente* (INEGI, 1998a).

De acuerdo a la evaluación de los resultados de la Red, CNA plantea que las regiones hidrológicas con mayores problemas de contaminación de sus aguas son:

- Lerma-Santiago: poblaciones de Querétaro, Toluca, León, Morelia, Guanajuato, Salamanca, Irapuato y otras ciudades; actividades industriales del corredor Toluca-Lerma, Querétaro, Morelia y Celaya-Salamanca-Irapuato; granjas porcícolas de Abasolo-La Piedad y retornos agrícolas.
- Balsas: poblaciones de Puebla y Tlaxcala; actividades industriales, principalmente automotriz, química, alimentaria y textil; actividad agrícola beneficiada por el distrito de riego Valsequillo.
- Bravo: poblaciones de Monterrey, Saltillo, Monclova, Chihuahua, Cd. Juárez, Matamoros, Reynosa y Nuevo Laredo; actividades industriales, principalmente petroquímica, química, metal básica, minera no metálica, celulosa y papel, automotriz, alimentaria, textil y cemento; retornos agrícolas.
- Pánuco: en esta zona se encuentra asentada la Ciudad de México, con su alta concentración de población y actividad industrial.

En relación con los contaminantes que principalmente afectan las aguas superficiales, podría decirse que estos son: microorganismos patógenos, grasas y aceites, ortofosfatos, sólidos disueltos y sustancias activas al azul de metileno.

A partir de 1988 se ha incrementado significativamente el caudal tratado de aguas residuales municipales (de 14 m<sup>3</sup>/s en 1988 a 52.8 m<sup>3</sup>/s en 1996) y se espera que para el año 2000 se contará con una capacidad de tratamiento instalada de 148 m<sup>3</sup>/s, lo que representará el saneamiento de 69% del total generado. De las descargas industriales, basado en información de 177 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, la CNA estima que se trata sólo un 7% del caudal generado.

No obstante su mala calidad, continúan usándose descargas de aguas residuales municipales para el riego de suelos agrícolas, especialmente para cultivos de forraje y maíz. De toda el agua usada para riego, 35% se pierde por evaporación o fallas de conducción; del total aprovechado, 30% retorna al ciclo hidrológico por infiltración arrastrando plaguicidas, fertilizantes y otras sustancias solubles en agua que deterioran la calidad de los cuerpos receptores.

### **3.3 Contaminación del suelo**

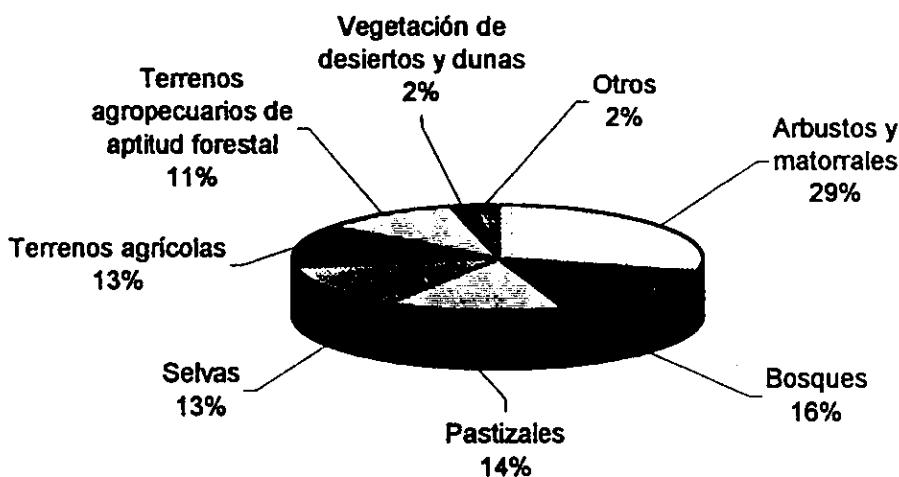
El uso de los suelos del país en 1994 se distribuyó según se indica en la figura 3.1. En 1995, la Semarnap dio a conocer que el 60% del suelo del país se encuentra en un grado de erosión severa y que el 10% de las tierras de riego presentan problemas de salinización, tala clandestina, plagas o incendios frecuentes.

Entre los factores que influyen de manera más importante en la degradación de suelos y tierras se encuentran: el crecimiento de la población, la deforestación, uso de la tierra de poca aptitud agrícola y el mal manejo de los recursos naturales. Dicha degradación puede

ocurrir por varios procesos, que se señalan en la tabla 3.3. Sin embargo, existe incertidumbre en la evaluación de la superficie afectada por estos procesos. Así, por ejemplo, en el caso de la erosión hídrica y eólica, otros estudios señalan superficies menores afectadas por estos tipos de degradación de suelos.

Actualmente no se cuenta con una evaluación global y precisa del estado de la contaminación de los suelos del país. Sin embargo, se puede destacar la contaminación derivada del uso de fertilizantes y plaguicidas de la agricultura, los derrames y fugas de combustible y los problemas asociados a las actividades mineras.

Tanto los procesos de degradación de suelos señalados en la tabla 3.3 como los problemas de contaminación, en la práctica estos se ven agravados por malas prácticas de manejo de suelos tales como la agricultura en laderas, malas prácticas de surcado, uso inadecuado de agroquímicos, riego excesivo, reducción de ciclos de barbecho, etc.



**Figura 3.1:** Usos del suelo en México

### 3.4 La agricultura en México

De lo anterior se concluye que la agricultura contribuye a la contaminación de aire, agua y suelo, por lo que resulta importante analizar este sector productivo.

#### 3.4.1 Importancia económica

En las últimas décadas México ha pasado de ser un país eminentemente agrícola a uno más sustentado económicamente en la industria y los servicios. Sin embargo, la agricultura

sigue siendo la forma de vida y sustento de una parte significativa de la población. En la tabla 3.4 se puede observar la evolución del aporte al PIB y el empleo del sector agropecuario, silvícola y pesquero en los últimos años. Hacia 1970, el PIB de este sector era de 11.2% y el empleo 35.6%, y en 1980 eran de 8.2 y 29%, respectivamente; como puede verse, ambos indicadores han disminuido de manera importante, pero dentro del sector éstos se han mantenido relativamente estables dentro de la presente década.

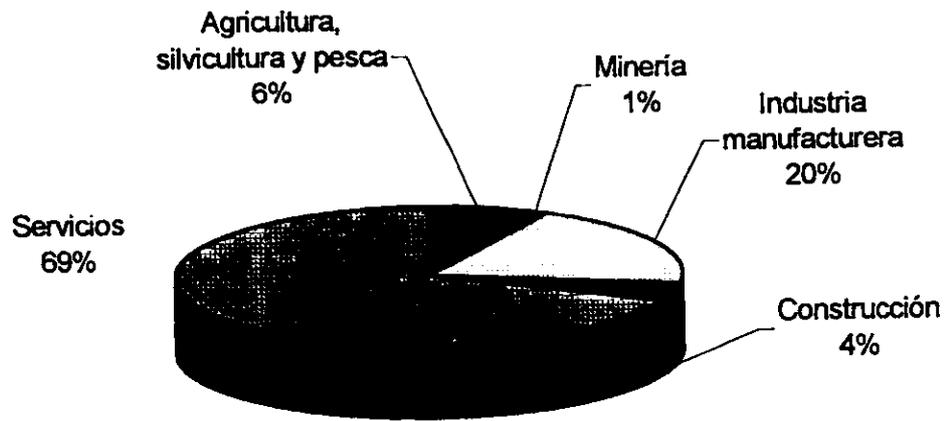
Respecto al comercio exterior, la proporción exportaciones/importaciones del sector agropecuario se redujo entre 1986 y 1996, llegando a representar solo el 5% de las exportaciones e importaciones totales de 1996. Los productos que destacan dentro de las exportaciones son el café crudo en grano, hortalizas (especialmente el jitomate y legumbres) y el ganado vacuno.

**Tabla 3.3 Procesos más importantes en la degradación de suelos**

Proceso	Superficie afectada (%)	Estados más afectados
Erosión hídrica		
• Ligera	36	Campeche, Chiapas, Guerrero, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Quintana Roo, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (1)
• Moderada	34	
Erosión eólica		
• Severa	43	16 estados afectados, entre los cuales destacan: Baja California, Hidalgo, Nuevo León y San Luis Potosí
• Moderada	33	
Salinización (2)		
• Areas agrícolas de temporal	0.5	Baja California, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Tamaulipas, Michoacán, Hidalgo, Guanajuato, Oaxaca (3)
• Areas agrícolas con riego	0.3	
• Zonas áridas y semiáridas	1.8	
• Areas costeras	0.4	
• Otras zonas no agrícolas	0.5	
<i>Degradación física</i>		
Compactación (4)	30	ND
Encostramiento	ND	Llanuras costeras del norte, porción Centro Norte, especialmente en distritos de riego
<i>Degradación química</i>		
Acidificación	15	Tabasco, Campeche, Veracruz, Nayarit y Oaxaca
<i>Prácticas de manejo</i>		
Sobrepastoreo (5)	85	Zonas áridas
Explotación excesiva y contaminación de mantos freáticos	NA	80 acuíferos en el borde norte del país, 19 acuíferos de la región Lerma-Balsas, zona centro norte y Valle de México

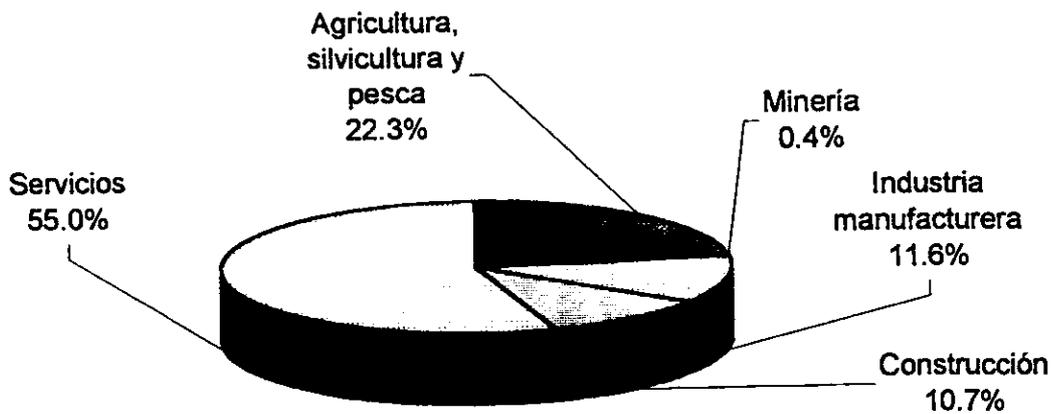
ND: no disponible; NA no aplica

- (1) Estados con más del 50% de su superficie afectada.
  - (2) Estimaciones realizadas por Semarnap indican que la salinización afecta a 3.1% de la superficie (0.9% debido a factores naturales y 2.2% a actividades humanas).
  - (3) Estados afectados con problemas de salinidad en los distritos de riego.
  - (4) Por sobreutilización de maquinaria agrícola.
  - (5) Comisión Nacional de Zonas Áridas, 1985.
- FUENTE: *Estadísticas del medio ambiente* (INEGI, 1998a).



**Figura 3.2: Distribución del PIB por actividad económica (1996)**

FUENTE: Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI, 1998)



**Figura 3.3: Distribución del empleo por actividad económica (1996)**

FUENTE: Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI, 1996)

**Tabla 3.4 Evolución del PIB y del empleo en el sector agropecuario, silvícola y pesquero**

	1970	1980	1985	1990	1992	1994	1996
<b>PIB (% respecto al total nacional)</b>							
Sector agropecuario, silvícola y pesquero	11.2	8.2	7.0	6.6	6.2	6.0	6.5
Agricultura	-	-	-	4.6	4.2	4.2	4.6
Ganadería	-	-	-	1.5	1.5	1.4	1.4
<b>Empleo (% respecto al total nacional)</b>							
Sector agropecuario, silvícola y pesquero	35.6	29.0	27.0	24.0	22.7	22.4	22.3
Agricultura	-	-	-	20.6	19.1	19.0	18.9
Ganadería	-	-	-	2.7	2.9	2.8	2.8

FUENTE: *Estadísticas del medio ambiente* (INEGI / SEMARNAP, 1998).

### 3.4.2 Actividades agrícolas

En las últimas dos décadas, las actividades agrícolas en México han ocupado una extensión territorial aproximada de 20 millones de hectáreas (alrededor del 10% del área total del país), encontrándose en el límite del uso de tierras con potencial agrícola. De esta superficie, sólo el 18% cuenta con riego y el resto es de temporal.

La diversidad climática y geográfica de México permiten que la producción sea muy variada, dependiendo de la región y de las condiciones tecnológicas disponibles en cada Estado, y explica las grandes diferencias de la producción entre éstos.

En México existen, básicamente dos modelos de explotación agrícola. Primero, el modelo campesino tradicional (que ocupa alrededor del 60% de la población activa del sector) se basa en la regeneración natural de la cubierta vegetal, lo que no es viable a largo plazo. El segundo modelo corresponde a la agricultura más tecnificada, basada en monocultivos, que también es fuente de deterioro ambiental debido al uso de grandes cantidades de fertilizantes, plaguicidas y combustibles, generando contaminación de aire, aguas y suelos. También es en este sector que se produce una sobreexplotación del manto freático con fines de riego y la salinización de los suelos.

En 1995, la superficie total cosechada fue de más de 18.7 millones de hectáreas, destacando los estados de Chiapas, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Sinaloa, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas, los cuáles representan el 51% de esta superficie.

De toda la superficie sembrada en 1995, el 70% correspondió a cultivos de granos (cereales, leguminosas y oleaginosas), destacando el maíz y el frijol, alimentos básicos, con 55% del área total sembrada. Los diez cultivos más importantes de este país: maíz, frijol, sorgo grano, trigo, semilla de algodón, cebada grano, cártamo, arroz palay, ajonjolí y soya, representaron 13 millones de hectáreas cosechadas entre 1985 y 1996, período en el cual los cultivos de maíz, frijol y sorgo ocuparon en promedio el 57, 15 y 16%, respectivamente, del total de esa área.

Entre los cultivos perennes, los principales son la alfalfa, el café, la caña de azúcar, el mango, la naranja, los pastos y el plátano (SAGAR, 1997). En la tabla 3.5 se presentan algunos indicadores de la producción agrícola en 1996.

Con el fin de mejorar el rendimiento de las tierras, en el país se utilizan fertilizantes y plaguicidas. El consumo de fertilizantes en el país ha aumentado de 2.8 millones de toneladas en 1980 a 3.8 en 1990, y sigue aumentando en la presente década. El consumo de fertilizantes en México se centra notablemente en los fertilizantes nitrogenados (más del 70% del consumo total), especialmente la urea y el sulfato de amonio.

Respecto de los plaguicidas, durante 1995 el sector agropecuario utilizó un total de 54,679 toneladas de plaguicidas, del cual un 46.7% correspondió a insecticidas, 28.7% a herbicidas, 16.7% a fungicidas y 7.9% a otros tipos. De este total, el 24.1% fue aplicado sobre cultivos de maíz.

### **3.4.3 Actividades pecuarias**

Las actividades pecuarias han experimentado grandes y rápidos cambios en las últimas décadas con la incorporación de tecnología y expansión territorial hacia zonas tropicales, templadas y áridas, con el fin de elevar los niveles de producción. La superficie ganadera pasó de cerca de 50 millones de hectáreas en 1950 a alrededor de 108 en la actualidad (55% del territorio nacional), desarrollándose en tres zonas ecológicas principales: norte (zonas áridas y semiáridas), centro (zonas templadas, húmedas y subhúmedas) y sur (zonas tropicales, cálido-húmedas y subhúmedas).

En México se pueden diferenciar tecnológicamente dos tipos de producción pecuaria:

- Ganadería intensiva o especializada: en este tipo, el ganado es confinado en establos.
- Ganadería extensiva o no especializada: en este caso la alimentación de los animales es, en su mayor parte, por pastoreo y la producción es de doble propósito (producción de carne y leche).

Cerca del 65% de la superficie de uso ganadero está dedicado a la producción de ganado bovino. La tabla 3.5 muestra la producción ganadera durante 1995 y la tabla 3.6 la evolución de las existencias ganaderas en los últimos años.

Finalmente, es importante destacar algunos casos particulares: en el norte del país existe una sobrepoblación de ganado, lo que ha producido una reducción de la permeabilidad de los suelos, aumentando la escorrentía y la erosión; en el sur, la ganadería se ha abierto paso a través de la deforestación y la ganadería intensiva dedicada a la producción de leche, huevos, ganado porcino y avícola, presenta problemas en el manejo de sus desechos orgánicos, fuente de contaminación de aire, aguas y suelos.

Tabla 3.5 Producción agrícola y ganadera en México

	Cultivos										Animales					
	Maíz	Frijol	Sorgo	Trigo	Avena	Café	Caña de azúcar	Mango	Naranja	Plátano	Papas	Bovinos	Caprinos	Ovinos	Porcinos	Aves
Superf. sembrada (mill. hds)	8.6	2.2	2.2	0.9	0.2	0.8	0.7	0.1	0.3	0.1	1.1	-	-	-	-	-
Prod. total (mill. ton) <sup>2</sup>	18.0	1.3	6.8	3.4	16.2	2.0	44.3	1.2	3.1	2.2	13.7	2.6	77 <sup>3</sup>	61 <sup>3</sup>	1.2	1.6
Prod. por Estado (%) <sup>4</sup>																
Coahuila										(6)			10.1			
Chiapas	8.6					30.7						4-6				
Chihuahua		11.2										4-6				
Durango		14.6														
Guanajuato			18.5	23.5	16.8										11.2	6.5
Guerrero							(5)						8.1			
Hidalgo					21.8									12.8		
Jalisco	12.9						11.3				23.3	14.0			19.7	13.4
México	12.5				13.1									15.5		
Michoacán	6.3															6.3
Navarra								(5)								
Nuevo León									8.4							
Oaxaca						13.7	6.8	(5)			26.7		9.4			
Puebla	6.6					17.0							8.7	7.5	7.0	7.6
Querétaro																11.4
San Luis Potosí							9.7		9.4				14.5	14.5		
Sinaloa	9.4	10.3														
Sonora				29.3											18.3	
Tabasco										(6)						
Tamaulipas			37.5				6.8		24.0							
Veracruz	6.6					26.9	33.6	(5)	32.9	(6)		14.0				15.9
Yucatán											18.8				7.5	
Zacatecas		28.9														

(1) Superficie sembrada en 1996.

(2) Producción de cultivos en 1996 y de animales en 1995.

(3) En miles de toneladas

(4) Se indica sólo los Estados con mayor producción de cada especie.

(5) En conjunto producen 57.9% del total nacional.

(6) En conjunto producen 77.0% del total nacional.

FUENTE: Estadísticas demográficas y socioeconómicas de México (INEGI, 1998).

**Tabla 3.6 Evolución de las existencias ganaderas  
(miles de cabezas)**

Especie	Año			
	1988	1990	1992	1994
Bovinos	23118	23170	22785	23234
Porcinos	12014	11282	10122	10053
Caprinos	7261	7213	6590	5993
Ovinos	3729	3800	3986	3887
Aves (1)	194	190	190	194

(1) Millones de cabezas, incluye aves productoras de huevos, carne y guajolotes.  
FUENTE: *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos* (INEGI, 1998b).

### 3.5 Mecanismos de contaminación de la agricultura

Las actividades que se llevan a cabo en la agricultura comprenden desde las operaciones de labranza de la tierra en preparación para la siembra, la aplicación de fertilizantes y plaguicidas, hasta la cosecha y almacenamiento de los productos de la tierra. Por otra parte, la crianza de animales conlleva la alimentación de éstos y el manejo de sus residuos.

Desde el punto de vista de sus emisiones, las actividades de la agricultura serán clasificadas como *fuentes difusas*, llamadas fuentes de área si las emisiones son al aire y fuentes no-puntuales cuando las emisiones son al agua o al suelo. La contaminación de este tipo de fuente se caracteriza por la emisión de grandes volúmenes (aire, agua, sólidos) que contienen bajas concentraciones de contaminantes, al compararlas con fuentes puntuales industriales o municipales.

En el caso del agua y el suelo, la contaminación generalmente es una resultante de la escorrentía superficial (debida al riego y a la ocurrencia de lluvias), la volatilización y subsecuente depositación atmosférica de algunos elementos, la infiltración del agua en el subsuelo y problemas específicos que pueden producirse como consecuencia de una modificación hidrológica en el sistema (construcción de una presa, desvío de cauces, sistemas de drenaje, canalizaciones, etc). En particular, en México a menudo se utilizan aguas residuales de origen municipal y/o industrial para riego, lo que origina problemas de contaminación microbiológica y aumenta el riesgo de enfermedades gastrointestinales de la población, especialmente cuando se trata de riego de verduras y legumbres frescas.

En el caso de las emisiones al aire, los principales mecanismos de transporte de contaminantes son la volatilización, el proceso combinado volatilización / depositación, la suspensión de material particulado por acción de maquinaria o por el viento y emisión de gases de combustión.

Las múltiples actividades agrícolas y pecuarias, en presencia de alguno de los mecanismos antes mencionados o de una combinación de ellos, pueden presentar los siguientes problemas de contaminación:

- a) **Arrastre de sólidos o sedimentos:** estos sólidos son resultado de la erosión. Corresponden a material particulado, orgánico e inorgánico, que se encuentra en suspensión y que puede ser transportado desde su lugar de origen por aire, escorrentía superficial o gravitacionalmente, hasta cuerpos de agua superficiales. Por adsorción pueden transportar plaguicidas, fósforo, amonio y otros elementos.
- b) **Salinidad:** la escorrentía superficial, particularmente cuando existe riego, puede movilizar las sales naturales de los suelos o bien concentrarlas debido a los aportes de sales contenidas en el agua de riego. A medida que el agua es consumida por las plantas o perdida en la atmósfera por evaporación, las sales permanecen en el suelo, concentrándose.

El agua con sales puede percolar hasta alcanzar el agua subterránea. El movimiento y la depositación de las sales depende de la cantidad y distribución de las lluvias y el riego, la estratificación del suelo, la tasa de evapotranspiración, el tipo de suelo y su contenido natural de sales y otros factores ambientales.

- c) **Microorganismos:** este es un tipo de contaminación potencial cuando el agua usada para riego ha recibido previamente descargas municipales o excretas animales. El riego y las lluvias pueden movilizar los microorganismos de estas descargas hasta alcanzar los cuerpos de agua superficiales o subterráneos.
- d) **Exceso de nutrientes:** los nutrientes son incorporados a los suelos agrícolas de varias formas, cada una de ellas introduce los contaminantes característicos que se describen en la tabla 3.7.

Todas las formas de introducción de nutrientes a los suelos agrícolas tienen la función de proveer a las plantas los nutrientes esenciales para mejorar la producción de los cultivos. Existen 16 nutrientes que las plantas necesitan para su crecimiento; de éstos, tres (carbono, hidrógeno y oxígeno) las plantas los obtienen de la atmósfera y el agua, mientras que los otros trece (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, cobre, zinc, boro, manganeso, hierro, cloro y molibdeno) son obtenidos principalmente del suelo. Las concentraciones de estos elementos son limitadas en la mayoría de los suelos y es por esto que es necesario completar con métodos artificiales las cantidades de nutrientes adecuadas para el desarrollo de las plantas.

Sin embargo, los nutrientes no aprovechados, son transportados hacia las aguas subterráneas por infiltración, mientras que la escorrentía superficial los arrastra hasta alcanzar los cuerpos de agua superficiales, contribuyendo a aumentar los riesgos de eutroficación de éstos. Los dos mayores nutrientes que degradan la calidad del agua son el **nitrógeno** y el **fósforo**. El fósforo puede encontrarse en el suelo en forma disuelta o adsorbido en partículas. En ambas formas puede ser transportado por la escorrentía superficial. El nitrógeno en forma de nitratos es altamente móvil y puede alcanzar rápidamente una profundidad mayor a la de la zona de raíces de los cultivos. También puede ser transportado con la escorrentía superficial pero no en grandes cantidades. El amonio, por otra parte, es adsorbido por el suelo y puede ser arrastrado por procesos erosivos en los sedimentos. En la figura 3.4 se puede apreciar el flujo del

nitrógeno cuando es incorporado a los suelos. La presencia de nitrógeno en el suelo depende de varios factores:

- humedad, que regula la disponibilidad de oxígeno
- temperatura, que controla la actividad microbiológica
- concentraciones de nitrato y amoníaco, que regulan la velocidad de las reacciones
- disponibilidad de carbono orgánico, necesario para la actividad microbiológica
- pH del suelo, que controla la velocidad de las reacciones de nitrificación-denitrificación y la relación  $N_2O/N_2$  de la denitrificación.

**Tabla 3.7** Contaminantes característicos introducidos por la incorporación de nutrientes al suelo

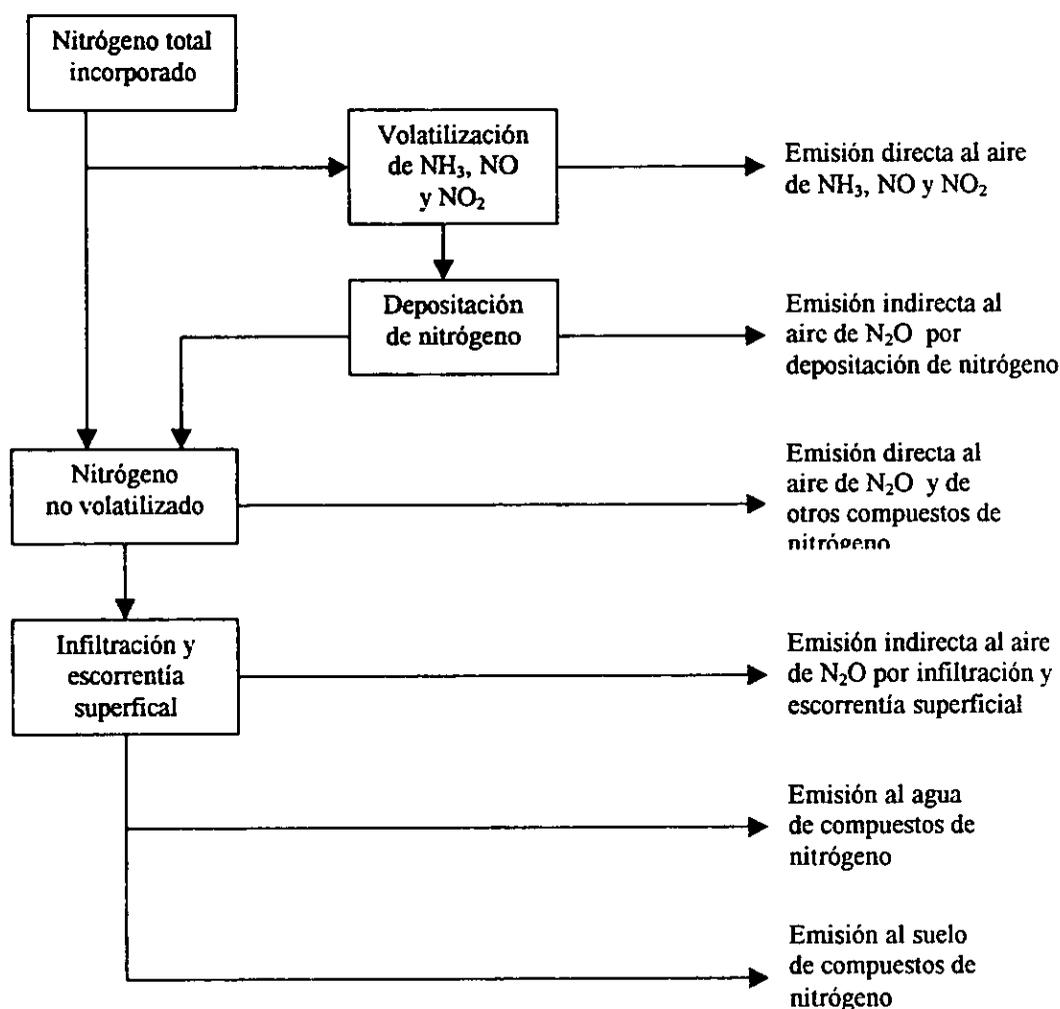
Forma de aplicación	Medio receptor	Contaminantes
Fertilizantes comerciales	agua y suelo	N, P, K, nutrientes secundarios, micronutrientes
	aire	NO, N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> y PST
Excretas de la crianza de animales	agua y suelo	N, P, K, nutrientes secundarios, micronutrientes, sales, algunos metales, sedimentos y materia orgánica
	aire	NO, N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub>
Lodos de plantas de tratamiento	agua y suelo	N, P, K, nutrientes secundarios, micronutrientes, sales, metales y materia orgánica sólida
Efluentes de plantas de tratamiento	agua y suelo	N, P, K, nutrientes secundarios, micronutrientes, sales, metales y materia orgánica
Residuos vegetales de cosechas	agua y suelo	N, P, K, nutrientes secundarios, micronutrientes
	aire	NO, N <sub>2</sub> O y NH <sub>3</sub>
Agua de riego	agua y suelo	depende de su calidad
Depositación atmosférica	agua y suelo	N, S

FUENTE: *Report of the Technical Advisory Committee for Plant Nutrient Management* (CSWCB, 1994d).

De las formas de incorporación de nutrientes al suelo descritas en la tabla 3.7, las más relevantes son:

- *Aplicación de fertilizantes comerciales:* existen distintas formas de aplicarlos, dependiendo de su estado físico, es decir, si éstos se encuentran en forma gaseosa, líquida o sólida. La aplicación de fertilizantes puede producir emisiones al aire de material particulado y gases. Estas emisiones pueden ser inmediatas, durante la aplicación del fertilizante, o pueden ocurrir durante los días y/o semanas siguientes. Se han observado que las fuentes de emisión por la aplicación de fertilizantes son tres (figura 3.4):
  - reacciones entre el suelo y el fertilizante aplicado, generando emisiones de gases tales como NO, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub>,

- volatilización inmediata del fertilizante tras el paso del vehículo que lo aplica e inmediatamente debajo de él, generando emisiones de gases tales como  $\text{NH}_3$  y el fertilizante en sí,
- perturbación del suelo, posterior a la aplicación del fertilizante, creando emisiones de material particulado.
- *Excretas de los animales*: su aplicación se puede llevar a cabo de dos maneras: por defecación directa de los animales sobre el suelo y mediante el esparcimiento sobre el terreno. Mayor detalle acerca del manejo de excretas y sus mecanismos de emisión se presenta más adelante en esta sección.



**Figura 3.4** Flujo del nitrógeno incorporado a los suelos agrícolas

- e) **Plaguicidas:** los plaguicidas son sustancias o mezclas de sustancias destinadas a controlar plagas o especies no deseadas que interfieren con la producción agropecuaria, forestal o con el bienestar de la población humana y de los animales.

En la agricultura, los plaguicidas son utilizados como un medio de control costo-efectividad de malezas, insectos, hongos, nemátodos y otras amenazas contra el rendimiento, nivel y calidad de la producción agrícola. Según el objetivo a controlar, los plaguicidas usados en la agricultura se clasifican básicamente en insecticidas, herbicidas y fungicidas.

La formulación de un plaguicida consta de un *ingrediente o agente activo* y de *solventes o ingrediente inerte*. Ambos tipos de ingredientes contienen, en la mayoría de los casos, compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Los métodos de aplicación de plaguicidas varían de acuerdo con lo que se quiere controlar, al tipo de cultivo que se desea proteger y el estado físico del plaguicida; existiendo en el mercado plaguicidas de formulación seca (polvos y gránulos solubles), de formulación líquida (suspensiones, emulsiones, aerosoles y fumigantes) y aerosoles.

Al ser aplicado, un plaguicida se distribuirá en el ambiente de acuerdo a sus características físicas y químicas, y a las del medio que lo recibe. Las características del plaguicida que determinarán de manera más importante cómo se distribuirá en el medio (aire, agua, suelo) son:

- Solubilidad en el agua: los que tienen una solubilidad en agua mayor a 500 mg/l son muy móviles en el suelo; si ésta es menor que 25 mg/ tenderán a inmovilizarse en suelos y a bioacumularse.
- Presión de vapor: los plaguicidas que tienen una presión de vapor mayor a  $10^{-3}$  mm de Hg a 25°C son muy volátiles y móviles, con alta tendencia a evaporarse y a moverse en el suelo y agua; pero si su presión es menor de  $10^{-7}$  el plaguicida es no volátil y tiende a persistir en el suelo y agua.
- Disociación e ionización: los plaguicidas aniónicos y los no iónicos son móviles en el suelo y los catiónicos tienden a ser inmovilizados en el suelo al ser adsorbidos por éste.

Los plaguicidas pueden alcanzar las aguas superficiales en solución, en emulsión o ser adsorbidos en sedimentos a través de su aplicación directa, la escorrentía superficial, la infiltración y de la volatilización y subsecuente depositación de sus componentes. Si son solubles, pueden también infiltrarse hacia el subsuelo y alcanzar las aguas subterráneas. La cantidad de plaguicida que es transportado con la escorrentía superficial y la que infiltra depende de los siguientes factores:

- intensidad y duración de las lluvias
- sistema y esquema de riego
- tiempo transcurrido entre la aplicación del plaguicida y la ocurrencia de lluvias
- cantidad de plaguicida aplicado y su coeficiente de partición de adsorción suelo/agua ( $K_d$ )

- pendiente y dimensiones del terreno donde son aplicados
- composición del suelo
- cobertura vegetal
- proximidad de los cuerpos de agua
- sistemas de control de la erosión

Las principales emisiones al aire producto de la aplicación de plaguicidas corresponden a COVs y material particulado. La cantidad de COVs emitidos depende de la formulación del plaguicida y del método de aplicación (equipo y estrategia). Los factores de mayor influencia en la velocidad de volatilización de un ingrediente activo son su reactividad, presión de vapor, constante de Henry, solubilidad en agua y degradabilidad, además de las condiciones climáticas (temperatura del aire y del suelo y viento) y la capacidad de adsorción del suelo (el contenido de materia orgánica, arcilla y humedad, entre otros).

Muchos de los materiales usados como ingredientes inertes en las formulaciones de plaguicidas, aunque no todos, también son COVs, la mayoría de ellos con presiones de vapor mayor a la de los ingredientes activos. Estos COVs se volatilizan durante la aplicación de los plaguicidas y durante el período inmediatamente posterior a su aplicación. En un afán de reducir el contenido de COVs en los plaguicidas, algunas formulaciones líquidas utilizan agua y las formulaciones sólidas contienen, típicamente, ingredientes inertes sólidos no-volátiles y pequeñas cantidades de compuestos orgánicos líquidos.

Adicionalmente, existen dos mecanismos de transporte que aumentan las emisiones de COVs a la atmósfera, éstos son: (1) la difusión a través del suelo (que depende de la temperatura, la concentración del plaguicida y la composición del suelo), y (2) la volatilización desde la superficie de las plantas, que depende de la forma en que el plaguicida cubre la estructura de las plantas.

- f) **Residuos sólidos y vegetales:** éstos se pueden producir en diferentes actividades o etapas del proceso agrícola:
- durante la etapa de preparación de la tierra, previa a la siembra, se generan residuos sólidos (vegetales, piedras, etc.) producto de la limpieza de los suelos. Los residuos vegetales se incorporan a aquellos que son producto de la etapa de la cosecha, contribuyendo a aumentar el contenido de nitrógeno de los suelos.
  - durante la cosecha muchos de los residuos vegetales son dejados sobre el suelo; estos residuos aumentan la emisión natural de  $N_2O$  del suelo que se produce por procesos de nitrificación-denitrificación ya que adicionan nitrógeno a éste.
  - habitualmente los productos cosechados son apilados o almacenados antes de ser transportados a los distintos centros de consumo. Muchas veces se lleva a cabo actividades de acondicionamiento que pueden generar residuos sólidos tales como cartón, madera, residuos vegetales, etc. Los residuos vegetales se suman a los de la etapa de cosecha y contribuyen a aumentar el nitrógeno en los suelos.
- g) **Material particulado:** éste es emitido durante varias actividades y en diversas formas, ya sea por acción del viento o por la operación de maquinaria agrícola. Las emisiones

de material particulado ocurre principalmente en las ocasiones que se describe a continuación:

- preparación de suelos, como producto del arado de las tierras.
- siembra, por remoción de la tierra.
- durante la aplicación de fertilizantes
- durante la aplicación de plaguicidas
- durante la quema de residuos vegetales

**h) Gases de combustión por quema agrícola:** las actividades agrícolas producen una gran cantidad de residuos vegetales. A menudo, gran parte de estos residuos son quemados en el campo para limpiar maleza y residuos sobrantes después de la cosecha.

Cuando los residuos vegetales son quemados, se emite una variedad de gases de combustión y/o invernadero tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{NO}_x$ .

**i) Fermentación entérica y manejo de excretas de los animales:** uno de los productos naturales del proceso de digestión de los alimentos de los animales es el metano ( $\text{CH}_4$ ). Este es producido durante la fermentación entérica realizada por algunas especies de bacterias que se desarrollan en su sistema digestivo. La mayor parte del metano es eructado por el animal y el resto es excretado.

Los rumiantes (que incluyen bovinos, ovinos y caprinos) tienen emisiones de metano más altas que otros tipos de animales debido al funcionamiento particular de su sistema digestivo, que les permite procesar materiales vegetales que otros animales no pueden digerir. La cantidad de metano producido depende principalmente del tipo de animal, edad y peso de éste y cantidad y calidad del alimento consumido. Otros factores que también influyen son el esquema de alimentación, nivel de actividad, salud del animal y factores genéticos.

Las excretas son el otro producto natural de la digestión animal. Estas pueden ser tratadas, usadas como fertilizante en los terrenos agrícolas o depositadas directamente sobre el suelo. Las excretas están compuestas, principalmente, por materia orgánica y agua, degradándose en condiciones anaerobias, generando como productos finales metano ( $\text{CH}_4$ ), bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y materia orgánica estabilizada. Las excretas son altamente generadoras de  $\text{CH}_4$ , dado su alto contenido orgánico y gran población bacteriana. La capacidad específica de producción de  $\text{CH}_4$  depende de la composición de las excretas, la que a su vez depende de la composición y digestibilidad de la dieta del animal (a mayor contenido energético y digestibilidad del alimento, mayor producción de  $\text{CH}_4$ ). Los factores que más influyen en la producción de  $\text{CH}_4$  son:

- Condiciones de manejo:
  - presencia de oxígeno (en condiciones aerobias no se produce  $\text{CH}_4$ ),
  - contenido de agua (a mayor humedad, mayor potencial de producción de  $\text{CH}_4$ ),
  - pH (el metano se produce a pH entre 6.6 y 8.0)
  - disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo y azufre).

- Factores del clima:
  - temperatura (generalmente la producción de  $\text{CH}_4$  aumenta con la temperatura),
  - humedad (la humedad favorece la producción de  $\text{CH}_4$ ).

Por otra parte, la producción de  $\text{N}_2\text{O}$  durante el almacenamiento y tratamiento de los residuos animales ocurre cuando el nitrógeno contenido en el amonio, presente en estos residuos, pasa por el proceso combinado de nitrificación-denitrificación que se inicia con la aireación de los residuos.

La cantidad de  $\text{N}_2\text{O}$  generado depende del sistema y duración del manejo de los residuos, así como de la composición del estiércol y orina, el tipo de bacterias involucradas en el proceso de digestión y de las cantidades de oxígeno y líquidos presentes en el sistema.

Existen otras fuentes que pueden aumentar las emisiones de óxido nitroso ya descritas y que corresponden a cuando una parte del nitrógeno excretado por los animales:

- se volatiliza, en forma de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$  y, subsecuentemente, regresa al suelo por depositación atmosférica, aumentando la emisión potencial de  $\text{N}_2\text{O}$ , y/o
- migra a través del flujo de agua subterránea o por la escorrentía superficial hacia corrientes y cuerpos de agua.

Cuando los residuos animales son manejados de una manera inapropiada, o no son manejados, pueden producir impactos adversos sobre los cuerpos de agua y los suelos. En estos casos, la escorrentía superficial producto del riego y las lluvias puede arrastrar nutrientes, sales, organismos patógenos, sedimentos y otros contaminantes, hasta los cuerpos de agua superficiales. Los contaminantes que se encuentran disueltos pueden ser transportados por infiltración y alcanzar las aguas subterráneas o bien quedar retenidos por adsorción en las partículas de suelo.

#### j) Otros:

- Acidificación de suelos: a menudo los suelos agrícolas al ser sobreexplotados con ciertos tipos de cultivos se acidifican y deben ser tratados para reducir su acidez con cal ( $\text{CaCO}_3$ ) y/o con dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Cuando estos compuestos son aplicados, generalmente se disuelven y producen emisiones de  $\text{CO}_2$ ; pero, si se descomponen en condiciones anaerobias, se produce metano.
- Cultivos en histosols: se realizan en suelos de alto contenido orgánico, presentando un aumento en las emisiones de óxido nitroso como consecuencia de reacciones combinadas de nitrificación-denitrificación (IPCC, 1996; U.S.EPA, 1998a).
- Emisiones durante la etapa de crecimiento de algunos cultivos como:
  - Arroz en campos inundados. La descomposición aeróbica de la materia orgánica gradualmente va disminuyendo el oxígeno presente en el suelo y agua, hasta desarrollarse condiciones anaerobias. En este punto, el metano se produce por la descomposición de la materia orgánica del suelo a través de la acción de bacterias

- metanogénicas. Del total de metano producido, entre el 60 y 80 % es oxidado aeróbicamente por bacterias metanotróficas en el suelo; otra parte se va como metano disuelto en el agua subterránea y el restante metano no oxidado es emitido al aire (Holzapfel-Pschorn et al., 1985; Sass et al., 1990).
- Cultivos fijadores de nitrógeno, tales como los frijoles, alfalfa y legumbres en general, que tienen la capacidad de aumentar las emisiones de óxido nitroso a la atmósfera por procesos de nitrificación-denitrificación.

Finalmente, en la tabla 3.8 se resumen los contaminantes que pueden ser emitidos a la atmósfera por las actividades de la agricultura y en la tabla 3.9 los contaminantes que alcanzan los cuerpos de agua superficiales y subterráneos transportados por la escorrentía superficial y la infiltración. Cualquiera de estos contaminantes es susceptible de permanecer en el suelo, dependiendo del tipo de suelo y de la intensidad de los mecanismos de transporte.

**Tabla 3.8** Contaminantes que pueden ser emitidos a la atmósfera

Actividad / Fuente	Contaminantes
Aplicación de fertilizantes (1)	gases (NO, N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> ) material particulado
Aplicación de plaguicidas	COVs material particulado
Preparación de suelos para la siembra	material particulado
Siembra	material particulado
Quema de residuos vegetales	gases (NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO) material particulado
Crianza de animales	gases (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> )

(1) Incluye: fertilizantes comerciales, excretas y residuos vegetales

**Tabla 3.9** Contaminantes que pueden alcanzar las aguas superficiales y las subterráneas

Mecanismo de transporte	Contaminantes
Escorrentía superficial	Sedimentos (orgánicos e inorgánicos)
	Nutrientes (nitratos, amonio, fósforo)
	Químicos solubles
	Sales
Infiltración	Microorganismos
	Nutrientes (nitratos)
	Químicos solubles
	Sales

#### **4. METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE EMISIONES DE LA AGRICULTURA**

La medición directa de las fuentes no puntuales o de área como la agricultura es prácticamente imposible, por lo cual se deberán realizar estimaciones a través de métodos alternativos.

La elección del método a emplear depende de diversos factores, especialmente de los recursos disponibles para la generación de la información requerida para realizar la estimación indirecta.

Para definir el método de estimación más adecuado, es necesario:

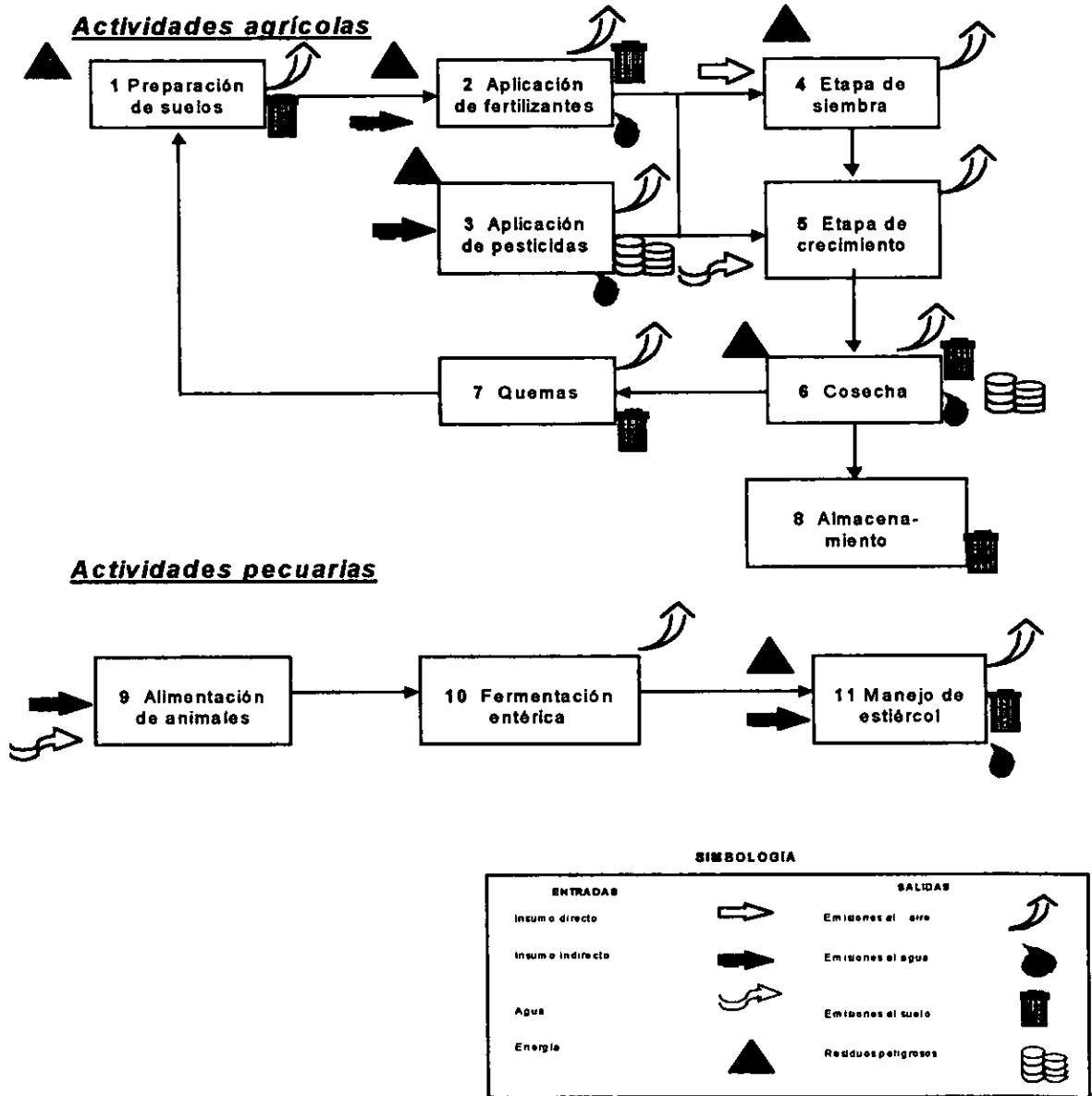
- a) basado en el conocimiento que se tenga de la fuente, describir la categoría de fuente de manera sistémica,
- b) establecer los elementos (actividades y equipos), entradas (insumos directos e indirectos, energía y agua) y salidas (emisiones y transferencias al agua, aire y suelo) que deben ser considerados para la estimación de emisiones,
- c) establecer las relaciones entre los elementos del sistema, arriba definidos; esto servirá para definir cuáles pueden ser estimados a partir del conocimiento de otros,
- d) definir claramente cuáles son los puntos de emisión y hacia qué medio los contaminantes están siendo emitidos,
- e) identificar las sustancias contaminantes asociadas a cada punto de emisión y el medio contaminado; con esto quedará establecido específicamente qué emisiones deberán ser estimadas.

En este capítulo se abordarán los pasos a seguir para seleccionar y aplicar los métodos indirectos más adecuados para estimar las emisiones de la agricultura. Parte importante de la información que se presenta en este capítulo fue tomada de *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 1997) y de *Area Sources Documents, Vol. III y Vol. VIII* (USEPA, 1998a).

##### **4.1 Definición del sistema**

De acuerdo a la descripción de los mecanismos de contaminación de la agricultura, hecha en la sección 3.5, se elaboró el diagrama de la figura 4.1, en el que se presentan las actividades (componentes del sistema) que usualmente se realizan dentro de los procesos agrícolas y pecuarios y que, según los mecanismos de contaminación ya descritos, corresponden a las fuentes de contaminación del aire, agua y suelo. En el diagrama también se muestran las entradas (insumos directos e indirectos, energía y agua) y las salidas (emisiones) del sistema, y las relaciones entre los diferentes elementos.

Este diagrama es de tipo general, por lo que puede aplicarse a cualquier tipo de cultivo o a la crianza de cualquier tipo de ganado. En la tabla 4.1 se describen brevemente cada bloque del diagrama, sus entradas y salidas.



**Figura 4.1** Diagrama de actividades de la agricultura y ganadería

**Tabla 4.1** Tabla resumen de las actividades de la agricultura

Actividad	Entradas				Salidas			
	Insumo directo	Insumo indir.	Agua	Energía	Emisión al aire	Emisión al agua	Res. Sólidos	Res. peligrosos
<b>Actividades agrícolas</b>								
1	Preparación de suelos			X <sup>a</sup>	X <sup>a</sup>		X <sup>b</sup>	
2	Aplicación de fertilizantes <sup>c</sup>		X		X	X	X	
3	Aplicación de plaguicidas		X		X	X		X
4	Etapas de siembra	X			X	X		
5	Etapas de crecimiento <sup>d,e</sup>			X		X		
6	Etapas de cosecha <sup>f</sup>				X	X	X <sup>g</sup>	X <sup>b</sup>
7	Quemas					X	X	
8	Almacenamiento						X	
<b>Actividades pecuarias</b>								
9	Alimentación de animales		X	X				
10	Fermentación entérica					X		
11	Manejo de excretas <sup>h</sup>		X <sup>j</sup>		X <sup>k</sup>	X	X	X

(a) Por arado, limpieza y tratamiento de suelos ácidos.

(b) Por arado y limpieza.

(c) Incluye el uso de: fertilizantes comerciales, residuos orgánicos de los animales, lodos de plantas de tratamiento, residuos vegetales, composta, etc.

(d) Aunque depende del tipo de cultivo, se consideran los siguientes dos casos relevantes: cultivo de arroz en campos inundados y cultivos fijadores de nitrógeno (frijol, alfalfa y otras legumbres).

(e) Cuando exista riego o se produzcan lluvias, el agua podrá arrastrar plaguicidas, nutrientes y otros elementos hacia los cuerpos de agua superficiales o al subsuelo. Estas emisiones están consideradas en las actividades que dan origen a la presencia de estos compuestos en el suelo (i.e., aplicación de fertilizantes, aplicación de plaguicidas, etc).

(f) Incluye los residuos vegetales dejados sobre el suelo por la cosecha y otras actividades menores dependientes del tipo de cultivo, tal como la aplicación de químicos para exfoliación y desecación del algodón, operaciones mecánicas de la cosecha de granos, etc.

(g) Solo por residuos vegetales.

(h) Solo por otras actividades de la cosecha, dependientes del tipo de cultivo (ver f).

(i) Los residuos orgánicos animales pueden ser manejados o no, esta actividad incluye ambas opciones. Si son manejados, pueden ser tratados para estabilizarlos o pueden ser esparcidos sobre los campos para su aprovechamiento como fertilizante. Si no son manejados, las excretas son depositadas sobre el terreno directamente por los animales.

(j) Aplica solo cuando existen sistemas de tratamiento.

(k) Aplica cuando existen sistemas de tratamiento o las excretas son esparcidas sobre el suelo, es decir, cuando son manejadas.

#### 4.1.1 Identificación de contaminantes emitidos

Como se vio en las secciones anteriores, las actividades de la agricultura son generadoras de emisiones al aire, agua y suelo; en la tabla 4.2 se listan, en forma genérica para cada medio, los contaminantes emitidos por cada una de las actividades ya definidas.

Sin embargo, no todas las sustancias mencionadas en la tabla 4.2 deben ser actualmente reportadas en México para la elaboración del inventario de emisiones RETC, por lo que se establecerán los métodos para estimar sólo las sustancias de interés.

Las llamadas sustancias RETC son aquellas que están incluidas en la lista de sustancias de la tabla 12 del formato oficial de la Cédula de Operación Anual (COA), ver anexo 1.

**Tabla 4.2. Contaminantes emitidos**

Actividad	Medio receptor			
	Aire	Agua	Suelo	
<b>Actividades agrícolas</b>				
1	<b>Preparación de suelos</b>			
	• Arado y limpieza	partículas	-	residuos sólidos (vegetales, piedras, etc)
	• Tratamiento de suelos ácidos	bióxido de carbono y metano	-	-
2	<b>Aplicación de fertilizantes</b>			
	• Fertilizantes comerciales	óxido nitroso, óxido nítrico, amonio, dióxido de azufre y partículas	compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio y otros macro y micronutrientes	compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio y otros macro y micronutrientes
	• Residuos orgánicos de los animales (excretas)	óxido nitroso, óxido nítrico, amonio, metano, dióxido de azufre y bióxido de carbono	compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio, otros macro y micronutrientes, sales, metales, materia orgánica y microorganismos	compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio, otros macro y micronutrientes, sales, metales, materia orgánica y microorganismos
	• Otros orgánicos	óxido nitroso, óxido nítrico y amonio	compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio, otros macro y micronutrientes, sales, metales y materia orgánica	compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio, otros macro y micronutrientes, sales, metales y materia orgánica
3	<b>Aplicación de plaguicidas</b>	COVs de ingredientes activo e inerte y partículas	ingredientes activos e inertes	ingredientes activos e inertes
4	<b>Etapas de siembra</b>	partículas	-	-
5	<b>Etapas de crecimiento <sup>a</sup></b>			
	• Arroz en campos inundados	metano	-	-
	• Cultivos fijadores de nitrógeno (frijol, alfalfa, otras legumbres)	óxido nitroso	-	-
6	<b>Etapas de cosecha</b>			
	• Residuos vegetales	óxido nitroso y partículas	nutrientes <sup>b</sup>	residuos vegetales
	• Otros <sup>c</sup>	-	-	-
7	<b>Quemas</b>	bióxido de carbono, metano, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno	nutrientes <sup>b</sup>	residuos vegetales
8	<b>Almacenamiento</b>	-	-	residuos sólidos

(a) Cuando exista riego o se produzcan lluvias, el agua podrá arrastrar plaguicidas, nutrientes y otros elementos hacia los cuerpos de agua superficiales o al subsuelo. Estas emisiones están consideradas en las actividades que dan origen a la presencia de estos compuestos en el suelo (i.e., aplicación de fertilizantes, aplicación de plaguicidas, etc).

(b) Especialmente nitratos y amonio.

(c) Depende del cultivo; por ejemplo: aplicación de químicos para exfoliación y desecación del algodón, operaciones mecánicas de la cosecha de granos, etc.

**Tabla 4.2. Contaminantes emitidos (continuación)**

Actividad	Medio receptor			
	Aire	Agua	Suelo	
<i>Actividades pecuarias</i>				
9	Alimentación de animales	-	-	-
10	Fermentación entérica	metano	-	-
11	<b>Manejo de los residuos orgánicos de los animales</b>			
	• Sistemas de tratamiento	metano y óxido nitroso	nutrientes, materia orgánica y metales	nutrientes, materia orgánica y metales
	• Esparcimiento sobre el campo	metano y óxido nitroso	nutrientes, materia orgánica, microorganismos y metales	nutrientes, materia orgánica, microorganismos y metales
	• Deposición directa de las excretas sobre el campo por los animales	metano y óxido nitroso	nutrientes, materia orgánica, microorganismos y metales	nutrientes, materia orgánica, microorganismos y metales

Las tablas 4.3 y 4.4 presentan las sustancias RETC de la agricultura emitidas al aire (tabla 4.3) y al agua y suelo (tabla 4.4). Estas sustancias se identifican por su número CAS (Chemical Abstract Services), el cual es una clave única para cada sustancia, asignado por la Sociedad Química Americana y aceptado internacionalmente. Cuando no se trata de una sustancia, sino de un grupo, se emplea para su identificación la clave asignada por el Instituto Nacional de Ecología a través la tabla 12 antes mencionada.

Una vez identificados los contaminantes que pueden ser emitidos durante los procesos agrícolas y pecuarios, deberá identificarse la información mínima requerida para su cuantificación. Esto es, las variables que determinan el nivel de actividad (ver sección 2.3) y de las cuales dependerá la emisión de contaminantes.

En la tabla 4.5 se señala las variables que deberán determinarse para la evaluación de cada emisión y en la tabla 4.6 las posibles fuentes para obtener información de esas variables. A continuación se listan las emisiones esperadas y las claves con las que se identifican dentro de la tabla 4.5.

## ***Emisiones al aire***

Las principales emisiones son:

- Reducción de acidez de suelos con cal y dolomita, durante la preparación de suelos
  - Bióxido de carbono (*a1*)
  - Metano<sup>11</sup>
- Aplicación de fertilizantes
  - Emisiones de óxido nitroso
    - Directas (*a2.1*)
    - Indirectas por volatilización/depositación (*a2.2*)
    - Indirectas por fugas en el agua subterránea y escorrentía superficial (*a2.3*)
  - Óxido nítrico
  - Dióxido de azufre<sup>11</sup>
- COVs por aplicación de plaguicidas (*a3*)
- Etapa de crecimiento
  - Metano en cultivos de arroz en campos inundados (*a4.1*)
  - Óxido nitroso en cultivos fijadores de nitrógeno (*a4.2*)
- Óxido nitroso por residuos vegetales sobrantes en la etapa de cosecha (*a5*)
- Quemadas de residuos vegetales en los campos
  - Monóxido de carbono<sup>11</sup>
  - Metano (*a6.1*)
  - Óxido nitroso (*a6.2*)
  - Óxido nítrico<sup>11</sup>
  - Dióxido de azufre<sup>11</sup>
- Metano por fermentación entérica (*a7*)
- Manejo de residuos orgánicos de los animales
  - Metano (*a8.1*)
  - Emisiones de óxido nitroso(*a8.2*)
    - Directas por excretas no manejadas (sin tratar), o por excretas manejadas (tratadas, con excepción de las usadas como fertilizante)
    - Indirectas por volatilización/depositación
    - Indirectas por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y en la escorrentía superficial)

## ***Emisiones al agua y suelo***

Las emisiones de contaminantes al agua y suelo son:

- Emisión de ingredientes activos e inertes al agua por aplicación de plaguicidas (*b1*)
- Emisión de ingredientes activos e inertes al suelo por aplicación de plaguicidas (*c1*)

---

<sup>11</sup> Esta emisión no se estimara ya que, según la experiencia internacional, el volumen de la emisión es muy pequeño respecto al de otras fuentes y, por este motivo, no se ha desarrollado un método de estimación para este caso.

**Tabla 4.3** Identificación de sustancias RETC emitidas al aire

	Fuente	Tipo de emisión	Sustancia RETC	Clave
<i>Actividades agrícolas</i>				
1	Preparación de suelos (reducción de acidez)	gases	Bióxido de carbono Metano	124-38-9 74-82-8
2	Aplicación de fertilizantes	gases	Oxido nitroso Oxido nítrico Dióxido de azufre	10024-97-2 10102-43-9 7446-09-05
3	Aplicación de plaguicidas	vapores (COVs)	Endosulfan <sup>a</sup> Paration metílico <sup>a</sup> Clorpirifos <sup>a</sup> 1,1,1-tricloroetano <sup>b</sup>	959-98-8 298-00-0 2921-88-2 79-00-5
5	Etapa de crecimiento <sup>c</sup>			
	• Arroz en campos inundados	gases	Metano	74-82-8
	• Cultivos fijadores de nitrógeno		Oxido nitroso	10024-97-2
6	Etapa de cosecha	gases	Oxido nitroso	10024-97-2
7	Quemas	gases de combustión	Bióxido de carbono <sup>d</sup> Monóxido de carbono Metano Oxido nitroso Oxido nítrico Dióxido de azufre	124-38-9 630-08-0 74-82-8 10024-97-2 10102-43-9 7446-09-05
<i>Actividades pecuarias</i>				
10	Fermentación entérica	gases	Metano	74-82-8
11	Manejo de residuos orgánicos de los animales	gases	Metano Oxido nitroso	74-82-8 10024-97-2

- (a) Ingredientes activos de mayor consumo en México y que se encuentran en la lista de sustancias RETC (INEGI, 1998a).  
 (b) Ingrediente inerte de mayor consumo en México (junto con el xileno) y que se encuentra en la lista de sustancias RETC (INEGI, 1998a).  
 (c) Depende de cada cultivo en particular. Aquí se han incluido las emisiones de metano por cultivos de arroz en campos inundados y la emisión de óxido nitroso por cultivos fijadores de nitrógeno.  
 (d) No se estimará ya que corresponde a la misma cantidad de bióxido de carbono que las plantas tomaron de la atmósfera durante su etapa de crecimiento.

**Tabla 4.4** Identificación de sustancias RETC emitidas al agua y al suelo

	Actividad	Tipo de emisión	Sustancia RETC	Clave
<i>Actividades agrícolas</i>				
2	Aplicación de fertilizantes	metales	compuestos metálicos <sup>a</sup>	-
3	Aplicación de plaguicidas	ingredientes activos	Endosulfan <sup>b</sup> Paration metílico <sup>b</sup> Clorpirifos <sup>b</sup> Comp. de cobre <sup>b, c</sup>	959-98-8 298-00-0 2921-88-2 CCM06
		ingredientes inertes	1,1,1-tricloroetano	79-00-5
<i>Actividades pecuarias</i>				
11	Manejo de residuos orgánicos de los animales	metales	compuestos metálicos <sup>a</sup>	-

- (a) Compuestos de: cadmio, cobalto, cobre, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio y zinc.  
 (b) Ingredientes activos de mayor consumo en México y que se encuentran en la Lista de Sustancias RETC.  
 (c) Oxiclورو de cobre e hidróxido cúprico.

**Tabla 4.5 Información necesaria para la aplicación de los métodos específicos de estimación de emisiones**

Información necesaria	Variable	Unidades	a1	a2		a3	a4		a5	a6		a7	a8		b1	c1
				a2.1	a2.2		a2.3	a4.1		a4.2	a6.1		a6.2	a8.1		
Cantidad de plaguicida aplicado por unidad de área	P	ton/ há/año				x										
Cantidad total de plaguicida aplicado	P'	ton/año				x										
Área sembrada	A	há				x										
Formulación del plaguicida																
• Fracción del ingrediente inerte	i	-				x										
• Fracción del ingrediente activo	a	-				x										
• Fracción de COV del ingrediente inerte	i <sub>cov</sub>	-				x										
Método de aplicación del plaguicida <sup>1</sup>	-	-				x										
Presión de vapor del ingrediente activo	-	mm de Hg (entre 20 y 25 °C)				x										
Población animal promedio	P <sub>i</sub>	cabezas			x <sup>2</sup>							x				
Masa típica animal	M <sub>i</sub>	kg			x <sup>2</sup>											
Fracción de las excretas totales producidas por cada tipo de animal y manejadas por cada sistema <sup>4</sup>	n <sub>a,i</sub> W <sub>W</sub>	-														
Cantidad de fertilizantes comerciales aplicados al suelo	F <sub>ci</sub>	kg/año			x											
Fracción de las excretas totales de cada tipo de animal, usadas como fertilizante	e <sub>i</sub>	-			x <sup>2</sup>											
Cantidad de otros fertilizantes orgánicos aplicados al suelo	F <sub>o</sub>	kg/año			x											
Producción de cultivos fijadores y no fijadores de nitrógeno <sup>5</sup>	C <sub>i</sub>	kg/año														
Cantidad de cal para tratar acidez de suelo	C	ton/año														
Cantidad de dolomita para tratar acidez de suelo	D	ton/año														

**Tabla 4.5 Información necesaria para la aplicación de los métodos específicos de estimación de emisiones (continuación)**

Información necesaria	Variable	Unidades	a1		a2		a3		a4		a5		a6		a7		a8		a9	a10		
			a2.1	a2.2	a2.3	a4.1	a4.2	a5.1	a5.2	a6.1	a6.2	a7.1	a7.2	a8.1	a8.2							
Solubilidad en el agua del ingrediente activo del plaguicida	S <sub>w</sub>	mg/l																				
Capacidad de ionización del ingrediente activo del plaguicida	-	-																				
Area cosechada de arroz por inundación (máxima y mínima)	A <sub>c</sub>	há								x												
Producción de leche	L	kg/cabeza/año																				
Temperatura promedio	T°	°C																				

(1) Aplicación superficial o incorporación al suelo.

(2) Información desglosada según siguientes tipos de animales:

- bovinos:
- de estable para producción de carne
- otros bovinos para producción de carne (0-12 meses, 12-24 meses, vacas maduras y toros).
- para producción de leche (0-24 meses y vacas maduras).

• cerdos: para mercado y reproducción

• aves: gallinas, gallos y pavos

• otros animales: ovejas, cabras, burros, caballos

(3) La población debe estar desglosada en:

- bovinos para producción de leche (0-12 meses, 12-24 meses, vacas maduras)

- bovinos para producción de carne (0-12 meses, 12-24 meses, vacas maduras, toros)

- otros animales: ovinos, caprinos, porcinos, caballos, mulas, asnos

(4) Los sistemas de manejo de residuos orgánicos de los animales más comúnmente empleados son: lechos de secado, almacenamiento sólido, líquidos y semi-líquido, almacenamiento en pozos, lagunas anaerobias, deposición directa de los animales en establos corrales y campos y esparcimiento diario sobre el campo.

(5) Ejemplo de cultivos fijadores de nitrógeno: legumbres y alfalfa; ejemplo de cultivos no fijadores de nitrógeno: maíz y trigo.

(6) Sólo de cultivos fijadores de nitrógeno.

**Tabla 4.6 Fuentes de información**

Información necesaria	Variable	Unidades	FUENTE
Cantidad de plaguicida aplicado	$P, P'$	ton/há/año, ton/año	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AMIFPAC (Asociación mexicana de la industria de plaguicidas y fertilizantes)</li> <li>• ANIQ (<i>Anuario estadístico de la industria química mexicana, 1996</i>)</li> </ul>
Area sembrada	$A$	há	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos (CEA/SAGAR)</i><sup>1</sup></li> </ul>
Formulación del plaguicida			
• Fracción del ingrediente inerte	$l$	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Catálogo oficial de plaguicidas (CICOPLAFEST)</i><sup>1</sup></li> </ul>
• Fracción del ingrediente activo	$s$	-	
• Fracción de COV del ingrediente inerte	$l_{cov}$	-	
Método de aplicación del plaguicida	-	-	ND
Presión de vapor del ingrediente activo	-	mm de Hg, (entre 20 y 25 °C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>The pesticide manual (British Crop Protection Council &amp; The Royal Society of Chemistry, 1994)</i></li> </ul>
Población animal promedio	$P_j$	cabezas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI)</i><sup>1</sup></li> <li>• <i>Resultados definitivos, VII Censo Agrícola y Ganadero (INEGI/SAGAR, 1994)</i></li> </ul>
Masa típica animal	$M_j$	kg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI)</i><sup>1</sup></li> </ul>
Fracción de las excretas totales producidas por cada tipo de animal y manejadas por cada sistema (3)	$n_{ij}, W_{ij}$	-	ND
Cantidad de fertilizantes comerciales aplicados al suelo	$F_{ci}$	kg/año	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AMIFPAC (Asociación mexicana de la industria de plaguicidas y fertilizantes)</li> <li>• ANIQ (<i>Anuario estadístico de la industria química mexicana, 1996</i>)</li> </ul>
Fracción de las excretas totales de cada tipo de animal, usadas como fertilizante	$e_j$	-	ND
Cantidad de otros fertilizantes orgánicos aplicados al suelo	$F_o$	kg/año	ND
Producción de cultivos fijadores y no fijadores de nitrógeno	$C_j$	kg/año	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos (CEA/SAGAR)</i><sup>1</sup></li> </ul>
Cantidad de cal para tratar acidez de suelo	$C$	ton/año	ND
Cantidad de dolomita para tratar acidez de suelo	$D$	ton/año	ND
Solubilidad en el agua del ingrediente activo del plaguicida	$S_w$	mg/l	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>The pesticide manual (British Crop Protection Council &amp; The Royal Society of Chemistry, 1994)</i></li> </ul>
Capacidad de ionización del ingrediente activo del plaguicida	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>The pesticide manual (British Crop Protection Council &amp; The Royal Society of Chemistry, 1994)</i></li> </ul>
Ocurrencia de lluvias	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuarios hidrológicos (Comisión Nacional del Agua)</i><sup>1</sup></li> </ul>
Existencia de sistema de riego	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comisión Nacional del Agua</li> </ul>
Area cultivada de arroz por inundación	$A_a$	há	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos (CEA/SAGAR)</i><sup>1</sup></li> </ul>
Producción de leche	$L$	kg/cabeza/año	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI)</i><sup>1</sup></li> </ul>
Temperatura promedio	$T^\circ$	°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Estadísticas del Medio Ambiente (INEGI/INE)</i></li> </ul>

ND: no disponible

(1) Publicación anual.

## 4.2 Métodos para la estimación de emisiones de la agricultura

De acuerdo al sistema planteado y a las emisiones de sustancias RETC identificadas, resultantes de las actividades de la agricultura, a continuación se describen los métodos recomendados para la estimación de cada una de estas emisiones al aire, agua y suelo.

Los métodos recomendados son aquellos definidos en la sección 2.2 de este trabajo, los cuales se nombran con la clave correspondiente definida en la COA (INE, 1999). Esto es:

DH = Extrapolación desde una muestra

BM = Balance de materiales

OM = Modelos matemáticos

FE = Factores de emisión

### 4.2.1 Emisiones al aire

La información necesaria para la aplicación de cada método se presentó en la tabla 4.5, mientras que en la tabla 4.7 se resumen los métodos de estimación recomendados para cada una de las emisiones al aire esperadas. En esta tabla se observa que para todas las emisiones se recomienda emplear factores de emisión, lo cual se debe a la existencia en la literatura de los respectivos factores de emisión y a la falta de información más detallada para la aplicación de métodos más precisos.

**Tabla 4.7 Métodos recomendados de estimación de emisiones al aire**

Fuente	Sustancia RETC	Clave	Método recomendado	
<b>Actividades agrícolas</b>				
1	Preparación de suelos (reducción de acidez con cal y/o dolomita)	Bióxido de carbono	124-38-9	FE
2	Aplicación de fertilizantes	Oxido nitroso	10024-97-2	FE
3	Aplicación de pesticidas	Endosulfan	959-98-8	FE
		Paration metílico	298-00-0	FE
		Clorpirifos	2921-88-2	FE
		1,1,1-tricloroetano	79-00-5	FE
5	Etapa de crecimiento			
	• Arroz en campos inundados	Metano	74-82-8	FE
	• Cultivos fijadores de nitrógeno	Oxido nitroso	10024-97-2	FE
6	Etapa de cosecha (4)	Oxido nitroso	10024-97-2	FE
7	Quemas	Metano	74-82-8	FE
		Oxido nitroso	10024-97-2	FE
<b>Actividades pecuarias</b>				
10	Fermentación entérica	Metano	74-82-8	FE
11	Manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	Metano	74-82-8	FE
		Oxido nitroso	10024-97-2	FE

#### 4.2.1.1 Preparación de suelos

La emisión al aire de bióxido de carbono por uso de cal y dolomita,  $Ea_c$ , se estima aplicando los factores de emisión  $f = 0.12$  (ton C/ton cal) para uso de cal y  $f = 0.13$  (ton C/ton dolomita) para uso de dolomita (USEPA, 1998a). Esto es:

$$Ea_c = (0.12 * C + 0.13 * D) * (PM_{CO_2} / PM_C) \quad (4.1)$$

donde,

$PM_{CO_2}$  = peso molecular del bióxido de carbono = 44 (g/mol)

$PM_C$  = peso molecular del carbono = 12 (g/mol)

#### 4.2.1.2 Aplicación de fertilizantes

Los tipos de fertilizantes que se aplican en los campos son: fertilizantes comerciales, excretas y otros fertilizantes orgánicos<sup>12</sup>. El uso de fertilizantes es una fuente de emisiones al aire de óxido nitroso, las que pueden ser directas o indirectas, debidas estas últimas a procesos de volatilización/depositación de nitrógeno y a transporte en el agua superficial y subterránea. En primer lugar, se estimará la emisión directa de óxido nitroso por la aplicación de cada uno de los tipos de fertilizantes por separado y luego se estimaran las emisiones indirectas.

**Emisiones directas de óxido nitroso.** Para calcular las emisiones directas de óxido nitroso se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Calcular la cantidad total de nitrógeno en los fertilizantes comerciales,  $N_c$ . En la tabla 4.8 se presenta el contenido de nitrógeno en los fertilizantes comerciales nitrogenados más usados en México (INEGI, 1998a).

**Tabla 4.8** Contenido de nitrógeno de fertilizantes comerciales

Fertilizante	Fórmula química	Contenido de nitrógeno, $N_{cl}$ (% peso)
Urea	CO (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	46.7
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21.2
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	35.0
Amoniaco anhidro	NH <sub>3</sub>	82.3
Complejos N-P-K	-	-

<sup>12</sup> Ejemplos de otros fertilizantes orgánicos: lodos estabilizados de plantas de tratamiento de aguas, composta, residuos vegetales, etc.

$$N_c = \sum_j F_{ci} * N_{ci} \quad (4.2)$$

- 2) Calcular la cantidad de nitrógeno no volatilizado de la aplicación de fertilizantes comerciales,  $N_c^*$ . Para estimar estas emisiones se debe descontar la fracción de nitrógeno que se volatiliza en forma de  $NH_3$  y  $NO_x$ . De acuerdo a IPCC (1997), esta fracción es aproximadamente 0.1 kg ( $NH_3-N + NO_x-N$ )/kg N y, por lo tanto:

$$N_c^* = 0.9 * N_c \quad (4.3)$$

- 3) Calcular la cantidad de nitrógeno de las excretas aplicadas como fertilizante,  $KN_e$ , utilizando los valores de masa de cada tipo de animal,  $M_j$ , y el nitrógeno Kjeldahl por cada 1000 kg de masa del animal,  $K_j$ , de la tabla 4.9 y la fracción de excretas usadas como fertilizantes,  $w_{jk}$ , para k = esparcimiento diario, de la tabla 4.10:

$$KN_e = \sum_j w_{jk} * P_j * (M_j/1000) * K_j * 365 \quad (4.4a)$$

Si no se cuenta con valores confiables de  $M_j$ , IPCC recomienda calcular el nitrógeno Kjeldahl total en las excretas usadas como fertilizante,  $KN_e$ , usando el nitrógeno Kjeldahl total excretado por cada animal durante un año,  $K_{Tj}$ , de la tabla 4.10, como:

$$KN_e = \sum_j w_{jk} * P_j * K_{Tj} * 365 \quad (4.4b)$$

- 4) Calcular la cantidad de nitrógeno de las excretas aplicadas como fertilizante que no volatiliza,  $N_e^*$ . Considerando que 20% de este nitrógeno se volatiliza como  $NH_3$  y  $NO_x$  (IPCC, 1997), la cantidad de nitrógeno que no se volatiliza es:

$$N_e^* = 0.8 * KN_e \quad (4.5)$$

- 5) Calcular la cantidad de nitrógeno de otros fertilizantes orgánicos aplicados,  $N_o$ . Considerando que el porcentaje promedio de nitrógeno en los fertilizantes orgánicos, con excepción de las excretas, es de 4.1% en peso (USEPA, 1998a):

$$N_o = 0.041 * F_o \quad (4.6)$$

- 6) Calcular la cantidad de nitrógeno de la aplicación de otros fertilizantes orgánicos, no volatilizado,  $N_o^*$ . Considerando que el porcentaje de nitrógeno que volatiliza como  $NH_3$  y  $NO_x$  en los fertilizantes orgánicos, con excepción de las excretas, es de 20% (IPCC, 1997):

$$N_o^* = 0.8 * N_o \quad (4.7)$$

- 7) Calcular la emisión de óxido nitroso por uso de fertilizantes,  $Ea_{Nf}$ . Usando el factor de emisión  $f = 0.0125$  (kg  $N_2O-N$ /kg N), publicado por IPCC (1997), se obtiene la emisión de óxido nitroso por uso de fertilizantes:

$$Ea_{N1} = 0.0125 (N_c^* + N_o^* + N_o^*) \quad (4.8)$$

**Tabla 4.9** Masa típica animal ( $M_j$ ), producción de sólidos volátiles ( $sv_j$ ), producción potencial máxima de metano ( $Bo_j$ ) y producción unitaria de nitrógeno Kjeldahl, por masa de animales ( $K_j$ ) en USA

Tipo de animal		$M_j$ (kg)	$sv_j$ (kg SV / kg animal/año)	$Bo_j$ ( $m^3$ CH <sub>4</sub> / kg sólidos volátiles)	$K_j$ (kg de nitrógeno Kjeldahl/día/1000 kg animal)
Vacunos de establo para carne		415	2.6	0.33	0.34
Otros vacunos para carne	0-12 meses	180	2.6	0.17	0.34
	12-24 meses	360	2.6	0.17	0.34
	vacas maduras	500	2.6	0.17	0.34
	toros	720	2.6	0.17	0.34
Vacas para leche	0-24 meses	410	3.65	0.24	0.45
	vacas maduras	640	3.65	0.24	0.45
Cerdos	para mercado	46	3.1	0.47	0.52
	de reproducción	181	3.1	0.36	0.52
Aves	gallinas para huevos	1.6	4.4	0.34	0.84
	pollos	0.7	6.2	0.30	1.10
	pavos	3.4	3.32	0.30	0.62
Otros	ovejas de corral	70	3.36	0.36	0.42
	otras ovejas	70	3.36	0.20	0.42
	cabras	64	3.48	0.17	0.42
	caballos	450	3.65	0.33	0.30

FUENTE: USEPA/EIIP (1998a)

**Tabla 4.10** Nitrógeno excretado por tipo de animal ( $K_{j1}$ ) y porcentaje de excretas manejado por distintos sistemas ( $w_{jk}$ )

Tipo de animal	$K_{j1}$ (kg N / cabeza /año)	$w_{jk}$ (%) por sistema de manejo de excretas						
		Lagunas anaerobias	Sistemas líquidos	Almac. sólido y lotes de secado	Combustible	Esparcimiento diario	Defecación dir. sobre suelos	Otros sistemas
<b>Ganado Bovino</b>								
Para producción de leche	70	0	1	1	0	62	36	0
Para otros fines	40	0	0	0	0	0	99	1
<b>Otros animales</b>								
Ovejas	12	0	0	0	0	0	100	0
Cerdos	16	0	8	51	0	2	0	40
Aves	0.6	0	9	0	0	0	42	49
Otros	40	0	0	0	0	0	99	1

(1) Valores recomendados por IPCC para América Latina (1997).

**Emisiones indirectas de óxido nitroso por la volatilización/depositación.** Los pasos a seguir para este cálculo son:

- 1) Calcular la cantidad de nitrógeno aplicada sobre el terreno como fertilizante y que se volatiliza,  $N_V$ . El IPCC sugiere valores de 10 y 20% para la fracción de nitrógeno que se volatiliza en fertilizantes comerciales y orgánicos, respectivamente:

$$N_V = 0.1 * N_c + 0.2 * (KN_o + N_o) \quad (4.9)$$

- 2) Calcular la emisión de óxido nitroso debida a la volatilización/depositación de  $NH_3$  y  $NO_x$ , por uso de fertilizantes,  $Ea_{N2}$ . Suponiendo un  $f = 0.01$  (kg  $N_2O$ -N/kg  $NH_3$ -N y  $NO_x$ -N volatilizados) la emisión de  $N_2O$  debida a la depositación atmosférica de nitrógeno es (IPCC 1997):

$$Ea_{N2} = 0.01 * N_V \quad (4.10)$$

**Emisiones indirectas de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y escorrentía superficial.**

- 1) Estimar la cantidad nitrógeno transportada proveniente de la aplicación de fertilizantes,  $N_{W}$ . Según IPCC (1997), la fracción de nitrógeno que se transporte en el agua subterránea y superficial es de 0.3 (kg N/kg N) en el fertilizante, comercial y orgánico):

$$N_{W} = 0.3 * (N_c + N_o + N_o) \quad (4.11)$$

- 2) Estimar la emisión indirecta de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua,  $Ea_{N3}$ . Suponiendo un  $f = 0.025$  kg de ( $N_2O$ -N)/kg N que se transporte en el agua (IPCC, 1997), la emisión indirecta de óxido nitroso es:

$$Ea_{N3} = 0.025 * N_{W} \quad (4.12)$$

Por lo tanto, la emisión total de óxido nitroso por uso de fertilizantes es:

$$Ea_N = Ea_{N1} + Ea_{N2} + Ea_{N3} \quad (4.13)$$

#### 4.2.1.3 Aplicación de pesticidas

Los factores de emisión usados para este método dependen de la presión de vapor del ingrediente activo y del método de aplicación del pesticida. Además, el método supone que la volatilización del ingrediente inerte es prácticamente completa al cabo de 30 días después de la aplicación (USEPA, 1998a) y requiere conocer la cantidad de plaguicida aplicada por unidad de área,  $P$ , ó la cantidad total de éste,  $P'$ . Este método no puede ocuparse cuando el pesticida se aplica de forma aérea.

- 1) Calcular la emisión al aire del ingrediente activo (ver tabla 4.7),  $Ea_{ia}$ , usando el  $f$  correspondiente de la tabla 4.11:

$$\begin{aligned} & Ea_{ia} = P * A * a * f \\ \text{ó} & Ea_{ia} = P' * a * f \end{aligned} \quad (4.14)$$

- 2) Calcular la emisión al aire del ingrediente inerte,  $Ea_{i}$ :

$$\begin{aligned} & Ea_{i} = P * A * i * i_{cov} \\ \text{ó} & Ea_{i} = P' * i * i_{cov} \end{aligned} \quad (4.15)$$

- 3) Calcular la emisión total de COV en el plaguicida:

$$Ea_{COV} = Ea_{ia} + Ea_{i} \quad (4.16)$$

**Tabla 4.11** Factor de emisión para ingredientes activos

Método de aplicación	Rango de presión de vapor (mm Hg entre 20 y 25°C)	$f^1$ kg/ton
Aplicación superficial	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$	350
	$> 1 \times 10^{-4}$	580
Incorporación en el suelo	$< 1 \times 10^{-6}$	2.7
	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$	21
	$> 1 \times 10^{-4}$	52

(1) Expresado como peso de ingrediente activo que se volatiliza por peso de ingrediente activo aplicado.

#### 4.2.1.4 Etapa de crecimiento

A continuación se presentan los métodos de estimación de dos casos relevantes de emisiones al aire durante la etapa de crecimiento: metano por cultivo de arroz en campos inundados y óxido nítrico por cultivos fijadores de nitrógeno.

**Emisión de metano por cultivo de arroz en campos inundados.** Ya que la emisión de metano en plantaciones de arroz depende de una gran variedad de factores que varían de manera importante tanto espacial como temporalmente, resulta más realista la estimación de un rango de emisiones probables. El IPCC (1997) propone la siguiente forma de estimar las emisiones de metano con base en un balance estacional integrado de flujos de metano, aplicando un factor de emisión en el rango  $12 \leq f \text{ (g/m}^2\text{)} \leq 28$ , entonces:

$$\begin{aligned} & Ea_{M \text{ min}} = A * f_{\text{min}} * 10 \\ \text{y} & Ea_{M \text{ max}} = A * f_{\text{max}} * 10 \end{aligned} \quad (4.17)$$

donde 10 es el factor de conversión de unidades del factor de emisión, de  $\text{g/m}^2$  a  $\text{kg/há}$ .

De acuerdo con IPCC, alrededor del 41% del área cosechada total de arroz en México por corresponde a campos inundados y con sistemas de riego controlado. El resto corresponde a áreas no inundadas, cuya emisión de metano es prácticamente cero.

**Emisión de óxido nitroso por cultivos fijadores de nitrógeno.** Los principales cultivos fijadores de nitrógeno son las legumbres y la alfalfa. La emisión de óxido nitroso se calcula de la siguiente forma:

- 1) Calcular la cantidad de nitrógeno total incorporada al suelo por fijación biológica,  $N_f$ . Suponiendo que la fracción de nitrógeno en los cultivos es de 0.03 (kg N/kg de biomasa) y que la biomasa total del cultivo es aproximadamente 2 veces la masa comestible de éste o producción,  $C_j$  (IPCC, 1997), entonces:

$$N_f = \sum_j 2 * 0.03 * C_j \quad (4.18)$$

- 2) Calcular la emisión de óxido nitroso por fijación biológica,  $Ea_N$ . Usando el factor de emisión  $f = 0.0125$  (kg  $N_2O$ -N/kg N), se obtiene esta emisión (IPCC, 1997):

$$Ea_N = 0.0125 N_f \quad (4.19)$$

#### 4.2.1.5 Etapa de cosecha

La estimación de la emisión al aire de óxido nitroso por residuos vegetales de la etapa de cosecha se realiza de la siguiente manera:

- 1) Calcular la cantidad de nitrógeno que se incorpora al suelo por los residuos vegetales,  $N_r$ . Debido a que existe escasa información respecto a los residuos vegetales que se dejan en los campos, se asume (U.S. EPA, 1998a) que todos los residuos de los cultivos, excepto la fracción quemada en campo después de la cosecha ( $q_j$ ), es dejada sobre el suelo. IPCC (1997) estima que hasta 25% de los residuos vegetales de la cosecha son quemados en los campos en los países en vías de desarrollo, mientras que en países desarrollados este porcentaje es menor al 10%.

Así, se estima el nitrógeno total proveniente de los residuos vegetales que se regresan al suelo, utilizando los valores de las variables correspondientes que se presentan en la tabla 4.12, como:

$$N_r = \sum_j C_j * p_j * d_j * (1 - q_j) * N_{rj} \quad (4.20)$$

**Tabla 4.12 Características de los residuos vegetales sobrantes de la cosecha de algunos tipos de cultivo**

Cultivo	$p_j$	$d_j$	$q_j$	$N_{rj}$ (kg de N/kg de biomasa seca)
Maíz	1.0	0.40	0.03	0.0094
Trigo	1.3	0.83	0.03	0.0058
Frijol	2.1	0.86	0.03	0.0300
Cacahuate	1.0	0.90	0.03	0.0300
Chicharo	1.5	0.87	0.03	0.0300
Lenteja	2.1	0.86	0.03	0.0300

FUENTE: USEPA (1998a).

- 2) Calcular la emisión de óxido nitroso por residuos vegetales de la cosecha,  $Ea_N$ . Usando el factor de emisión  $f = 0.0125$  (kg  $N_2O$ -N/kg N), se obtiene esta emisión como (IPCC, 1997):

$$Ea_N = 0.0125 N_r \quad (4.21)$$

#### 4.2.1.6 Quema de residuos vegetales en los campos

La metodología de estimación de emisiones al aire de metano y óxido nitroso producto de esta actividad (IPCC, 1997), se basa en las cantidades de carbono y nitrógeno en los residuos vegetales, la relación entre metano y carbono emitido por combustión y la relación entre nitrógeno y carbono emitido por combustión.

Tanto la relación (metano/carbono emitido) como la relación (nitrógeno/carbono) varían según el tipo de quema, fases de combustión y región geográfica, lo cual produce gran incertidumbre sobre las emisiones estimadas, aún cuando estos valores derivan de mediciones para una amplia variedad de quemados pero no para tipos de biomasa específicos.

#### *Emisiones de metano.*

- 1) Calcular la cantidad de materia seca quemada para cada tipo de cultivo,  $M_{qj}$ . Como ya se mencionó en la sección anterior, IPCC señala que en los países en vías de desarrollo hasta un 25% de los residuos son quemados en los campos ( $q_j \leq 0.25$ ) y que la eficiencia de combustión, representada por el producto  $\eta_q * \eta_c = 0.9$ , mientras que USEPA (1998a) recomienda utilizar  $\eta_q = 0.93$  y  $\eta_c = 0.88$ . Los valores de  $p_j$  y  $d_j$  necesarios para el cálculo de  $M_{qj}$ , para algunos cultivos relevantes en México, se proporcionan en la tabla 4.12:

$$M_{qj} = C_j * p_j * q_j * d_j * \eta_q * \eta_c \quad (4.22)$$

- 2) Calcular el carbono total emitido,  $Ea_{Cq}$ , usando el contenido de carbono  $C_j$  para cada tipo de cultivo según la tabla 4.13:

$$Ea_{Cqj} = M_{qj} * C_j \quad (4.23a)$$

$$Ea_{Cq} = \sum_j Ea_{Cqj} \quad (4.23b)$$

- 3) Estimar las emisiones de metano,  $Ea_M$ . IPCC recomienda calcular esta emisión utilizando una tasa de emisión  $t_m$  en el rango de  $0.003 \leq t_m \leq 0.007$ , aplicando la siguiente ecuación:

$$Ea_M = t_m * Ea_{Cq} * (PM_{CH_4} / PM_C) \quad (4.24a)$$

donde,

$$\begin{aligned} PM_{CH_4} &= \text{peso molecular del metano} = 16 \text{ (g/mol)} \\ PM_C &= \text{peso molecular del carbono} = 12 \text{ (g/mol)} \end{aligned}$$

Por otra parte, USEPA (1998a) recomienda aplicar un factor de emisión  $f = 0.005$  (kg  $CH_4$ /kg C) emitido de tal manera que la emisión de metano se calcula como:

$$Ea_M = 0.005 * Ea_{Cq} \quad (4.24b)$$

**Emisiones de óxido nítrico.** Se pueden utilizar dos métodos, el primero propuesto por IPCC y el segundo por USEPA. La diferencia entre ellos es que el IPCC basa la estimación en la emisión de carbono ya calculada, dependiendo de la proporción (nitrógeno/carbono) de cada cultivo, mientras que USEPA utiliza un factor de emisión de óxido nítrico con base en el contenido de nitrógeno en la biomasa seca de los cultivos.

#### a) Método IPCC

Estimar la emisión de óxido nítrico,  $Ea_N$ , usando la proporción  $(N/C)_j$  de la tabla 4.13, una tasa de emisión de óxido nítrico  $t_N$  en el rango  $0.005 \leq t_N \leq 0.009$  y los  $Ea_{Cqj}$  calculados con la ecuación (4.23a), para cada cultivo:

$$Ea_N = t_N (\sum_j Ea_{Cqj} * (N/C)_j) (PM_{N_2O} / PM_{N_2}) \quad (4.25)$$

donde,

$$\begin{aligned} PM_{N_2O} &= \text{peso molecular del metano} = 44 \text{ (g/mol)} \\ PM_{N_2} &= \text{peso molecular del carbono} = 28 \text{ (g/mol)} \end{aligned}$$

## b) Método USEPA

- 1) Estimar la cantidad de nitrógeno de la materia seca,  $N_q$ , usando el valor de  $M_{qj}$  calculado en la ecuación (4.22) y el contenido de nitrógeno  $N_{rj}$  de cada cultivo de acuerdo con la tabla 4.13:

$$N_q = \sum_j M_{qj} * N_{rj} \quad (4.26)$$

- 2) Estimar las emisiones de óxido nitroso,  $Ea_N$ , utilizando  $f = 0.007 \text{ kg (N}_2\text{O-N)/kg N}$  de la materia seca quemada (USEPA 1998a):

$$Ea_N = 0.007 * N_q \quad (4.27)$$

**Tabla 4.13 Características de los residuos vegetales a quemar de algunos tipos de cultivo**

Cultivo	$\rho_j$	$d_j$	$c_j^1$ (kg de C/kg de biomasa seca)	$N_{rj}$ (kg de N/kg de biomasa seca)	$(N/C)_j^2$ (kg de N/kg de C)
Maíz	1.0	0.30-0.50	0.4709	0.0094	0.020
Trigo	1.3	0.78-0.88	0.4853	0.0058	0.012
Frijol	2.1	0.86	ND	0.0300	ND
Sorgo	1.4	ND	ND	ND	0.020
Arroz	1.4	0.78-0.88	0.4144	0.0067	0.014
Soya	2.1	ND	ND	ND	0.050
Papa	0.4	0.30-0.60	0.4226	ND	ND
Caña de azúcar	0.2	0.10-0.20	0.4072	0.0040	ND
Cacahuete	1.0	0.90	ND	0.0300	ND
Chicharo	1.5	0.87	ND	0.0300	ND
Lenteja	2.1	0.86	ND	0.0300	ND

(1) En los casos que no se cuente con  $c_j$ , IPCC recomienda usar 0.45.

(2) En los casos que no se cuente con  $(N/C)_j$ , IPCC recomienda usar un valor en el rango 0.01 - 0.02.

ND: información no disponible, IPCC recomienda usar un valor correspondiente a algún cultivo similar.

FUENTES: IPCC (1997) y USEPA(1998a)

### 4.2.1.7 Fermentación entérica

Dado que la emisión al aire de metano por fermentación entérica se relaciona directamente con el consumo de energía por alimento y éste, a la vez, se relaciona con el nivel de producción, este consumo de energía puede ser estimado basándose en estadísticas de producción, esto es, se estiman las emisiones para cada tipo de animal multiplicando la población por el factor de emisión correspondiente. La estimación se realiza separadamente para bovinos y otros animales, ya que las características de los bovinos varían significativamente de región en región y son los animales que más aportan al total de emisiones de metano por esta fuente.

Existen dos alternativas de factores de emisión a aplicar: los recomendados por IPCC (1997) y los desarrollados por USEPA (1998a).

IPCC publica factores de emisión para ganado bovino en América Latina, basados en mediciones realizadas en Brasil, considerando que la mayor parte se alimenta de pastizales y una parte menor con dietas de granos en establos y que, además, los bovinos para carne generalmente están en etapa de crecimiento.

También se publican factores de emisión para otro tipo de animales, los cuales corresponden a los recomendados para países en vías de desarrollo. IPCC señala que todos estos factores de emisión tienen una incertidumbre de  $\pm 20\%$  que se deben, principalmente, a variaciones en las prácticas de manejo, clima y alimentación del ganado.

IPCC también propone un método alternativo más preciso pero que requiere de información más detallada que no se encuentra disponible en México. El método incluye la estimación de factores de emisión a nivel local con base en un balance energético. Se recomienda aplicar este método para estimar las emisiones del ganado bovino en países con alta población de este tipo de ganado.

Los factores desarrollados por USEPA fueron obtenidos a través de la aplicación de un modelo que considera distintas categorías de bovino, de acuerdo a su edad y producción a la que están destinados, y distintos tipos de sistemas de alimentación. Este modelo fue validado para un amplio rango de condiciones de alimentación (32 dietas para 8 categorías de ganado, en 5 regiones de USA) y estima la cantidad de metano que se forma y es emitido como resultado de la fermentación microbológica en el rumen. El modelo de digestión fue vinculado a un modelo de producción animal que predice crecimiento, preñez, producción de leche y otras variables de producción, como una función de los productos de digestión. De esta manera, el modelo evalúa la relaciones entre características de alimentación y sus efectos en el animal, incluyendo la emisión de metano. Para otros tipos de animales, cuyas emisiones no varían significativamente según la región, los  $f$  se desarrollaron usando una fórmula simple basada en la cantidad de alimento ingerido y el porcentaje de éste que se convierte en metano.

Así, la emisión de metano por fermentación entérica de los animales,  $E_{aM}$ , se estima, usando los  $f$  correspondientes de la tabla 4.14, como:

$$E_{aM} = \sum P_j * f_j \quad (4.28)$$

Se debe hacer notar que se han obtenido resultados semejantes al realizar estimaciones aplicando tanto los factores de emisión recomendados por IPCC como los de USEPA,

**Tabla 4.14 Factores de emisión de metano por fermentación entérica del ganado**

Tipo de animal	$f_j$ (kg CH <sub>4</sub> /cabeza/año)	
	IPCC 1997	USEPA 1998
<b>Vacas para producción de leche</b>		
0-12 meses	57.0	19.6
12-24 meses		58.7
Vacas maduras		122.2
<b>Ganado bovino para otros fines</b>		
0-12 meses	49.0	22.3
12-24 meses		64.9
Vacas maduras		66.5
Toros		99.8
<b>Otros animales</b>		
Ovejas	5.0	8.0
Cabras	5.0	5.0
Cerdos	1.0	1.5
Caballos	18.0	18.0
Mulas y asnos	10.0	22.0

#### 4.2.1.8 Manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)

Estas emisiones ocurren preferentemente en la ganadería intensiva, es decir, cuando se maneja un gran número de animales en un área reducida, como son los casos de las productoras de leche, establos de bovinos para producción de carne y criaderos de pollos y gallinas para huevos.

Las excretas pueden ser manejadas (tratadas) o no. Existen varias maneras de tratar las excretas con el fin de estabilizarlas; las más usadas son: lechos de secado, almacenamiento sólido, almacenamiento líquido, almacenamiento en pozos y lagunas anaerobias. Otra alternativa muy utilizada de manejo de excretas es su esparcimiento diario sobre los campos.

Con o sin tratamiento, las excretas producirán emisiones al aire de metano y óxido nítrico, cuyos métodos de estimación se describen a continuación.

**Emisiones de metano.** Se presentan dos métodos para la estimación de emisiones de metano por manejo de excretas. El primero es un método propuesto por USEPA basado en Safley *et al* (1992) y que considera la cantidad de sólidos volátiles presentes en las excretas de los animales y la tasa de producción de metano para cada sistema de manejo de excretas.

El segundo método corresponde al recomendado por el IPCC (1997) y considera la población animal y factores de emisión de metano diferenciados por tipo de animal y clima.

**a) Método USEPA**

- 1) Calcular la cantidad total de sólidos volátiles  $SV_j$  en las excretas. Las emisiones de metano están directamente relacionadas con la cantidad de sólidos volátiles en las excretas. Para cada tipo de animal,  $j$ , se calculan los sólidos volátiles, usando  $M_j$  y  $sv_j$  de la tabla 4.9, según:

$$SV_j = P_j * M_j * sv_j \quad (4.29)$$

- 2) Estimar la emisión de metano para todos los sistemas de manejo de excretas,  $Ea_M$ , considerando una densidad del metano de 0.662 (kg/m<sup>3</sup>) y utilizando los valores de las variables que se presentan en las tablas 4.9, 4.10 y 4.15:

$$Ea_M = 0.662 \left[ \sum_k m_k \sum_j (SV_j * Bo_j * w_{jk}) \right] \quad (4.30)$$

**Tabla 4.15 Factores de conversión de metano ( $m_k$ ) para los sistemas de manejo de excretas más comunes**

Sistema de manejo	$m_k$ (%) <sup>1</sup>
Defecación directa de los animales en establos, corrales o campo	1.1
Lechos de secado	1.3
Almacenamiento sólido	1.1
Esparcimiento diario sobre el campo	0.3
Almacenamiento líquido	21.8
Almacenamiento en pozos (menos de 30 días)	10.9 <sup>2</sup>
Almacenamiento en pozos (más de 30 días)	21.8 <sup>3</sup>
Lagunas anaerobias	90
Fosas sépticas y almacenamiento en pozos profundos	10

(1) Valores promedio de Estados Unidos

(2) Se asume que el factor corresponde a un 50% del almacenamiento líquido y semilíquido

(3) Se asume que el factor corresponde al mismo que el de almacenamiento líquido y semilíquido

**b) Método IPCC**

Calcular la emisión de metano por manejo de excretas, usando los factores de emisión de la tabla 4.16 y la ecuación (4.28).

Al igual que para la estimación de emisión de metano por fermentación entérica, IPCC también propone un método alternativo más preciso que requiere de información más detallada. Se recomienda aplicar este método en países con una alta población de ganado bovino y porcino que viven en condiciones de confinamiento.

**Tabla 4.16 Factores de emisión de metano por manejo de excretas**

Tipo de animal	$f_j$ según clima <sup>1</sup> (kg de metano/cabeza/año)		
	Frío	Templado	Cálido
<i>Ganado bovino</i> <sup>2</sup>			
• Para producción de leche	0.0	1.0	2.0
• Para otros fines	1.0	1.0	1.0
Cerdos	0.0	1.0	2.0
<i>Otros animales</i> <sup>3</sup>			
• Ovejas	0.10	0.16	0.21
• Cabras	0.11	0.17	0.22
• Caballos	1.09	1.64	2.18
• Mulas y asnos	0.60	0.90	1.19
• Aves (pollos, patos y pavos)	0.012	0.018	0.023

- (1) El tipo de clima, en este caso, se define por la temperatura media de la región: frío = menor que 15°C, templado = entre 15 y 25 °C y cálido = mayor a 25 °C. Las tasas de conversión de metano utilizadas para la estimación de los factores de emisión son de 1, 1.5 y 2 % para clima frío, templado y cálido, respectivamente.
- (2) Los factores de emisión corresponden a los recomendados por IPCC para América Latina. IPCC supone que casi todas las excretas son manejadas en forma sólida sobre los campos y establos.
- (3) Los factores de emisión corresponden a los recomendados por IPCC para países en vías de desarrollo.

**Emisiones de óxido nítrico.** Aunque aún no ha sido posible desarrollar factores de emisión validados estadísticamente para todas las posibles combinaciones de suelo, clima y condiciones de manejo de excretas, es posible trabajar con factores de emisión que han sido estimados en mediciones descritas en la literatura.

Los métodos recomendados que a continuación se describen, corresponden a los del IPCC (1997) y el de USEPA (1998a). Primero se presentan los métodos para las emisiones directas de óxido nítrico y luego para las indirectas (por volatilización/depositación y transporte en el agua superficial y subterránea).

#### a) Emisiones directas

- **Excretas no manejadas**

Estas emisiones corresponden a las que se producen por depositación directa de las excretas de los animales sobre los campos, establos y corrales.

- 1) Calcular la cantidad de nitrógeno depositada de esta forma sobre el suelo,  $KN_a$ , usando los valores de  $M_j$  y  $K_j$  de la tabla 4.9 y  $w_{jk}$  de la tabla 4.10 correspondiente a  $k$  = defecación directa sobre los suelos:

$$KN_a = \sum_j P_j * w_{jk} * (M_j / 1000) * K_j * 365 \quad (4.31a)$$

Si no se cuenta con un valor confiable de  $M_j$ , IPCC propone calcular  $KN_a$ , usando los valores recomendados de  $K_{Tj}$  para América Latina de la tabla 4.10, como:

$$KN_a = \sum_j P_j * w_{jk} * K_{Tj} \quad (4.31b)$$

- 2) Calcular la cantidad de nitrógeno que no se volatiliza,  $N_a^*$ . Considerando que 20% de este nitrógeno se volatiliza como  $NH_3$  y  $NO_x$  (IPCC, 1997), la cantidad de nitrógeno que no se volatiliza es:

$$N_a^* = 0.8 * KN_a \quad (4.32)$$

- 3) Calcular la emisión directa de óxido nitroso por esta fuente,  $Ea_{Na}$ . El factor de emisión recomendado por IPCC (1997) es  $f = 0.02$  (kg  $N_2O$ -N/kg N excretado). Por lo tanto:

$$Ea_{Na} = 0.02 * N_a^* \quad (4.33)$$

- **Excretas manejadas (con la excepción de las usadas como fertilizante)**

El método de estimación de emisiones recomendado corresponde al del IPCC (1997).

- 1) Calcular la cantidad de nitrógeno Kjeldahl excretado por los tipos de animales,  $j$ , manejado por cada sistema,  $KN_k$ , usando los valores recomendados para  $M_j$  y  $K_j$  de la tabla 4.9 y  $w_{jk}$  de la tabla 4.10:

$$KN_k = \sum_j P_j * (M_j / 1000) * K_j * w_{jk} * 365 \quad (4.34a)$$

Si no se cuenta con valores confiables de  $M_j$ , IPCC recomienda calcular  $KN_k$  usando los valores de  $K_{Tj}$  de la tabla 4.10, como:

$$KN_k = \sum_j P_j * w_{jk} * K_{Tj} \quad (4.34b)$$

- 2) Estimar la cantidad de nitrógeno que no se volatiliza para cada sistema de manejo,  $N_{mk}^*$ . Se supone que, para todos los sistemas de manejo, el 20% del nitrógeno se volatiliza en forma de  $NH_3$  y  $NO_x$ , por lo tanto:

$$N_{mk}^* = 0.80 * KN_k \quad (4.35)$$

- 3) Calcular la emisión de óxido nitroso de las excretas manejadas,  $Ea_{Nm}$ . Para esto se utilizan los  $f_k$  recomendados por IPCC que se presentan en la tabla 4.17, de acuerdo a:

$$Ea_{Nm} = \sum_k N_{mk} \cdot f_k \quad (4.36)$$

**Tabla 4.17 Factores de emisión de N<sub>2</sub>O para los sistemas de manejo de excretas**

Sistemas de manejo de excretas	$f_k$ (kg N <sub>2</sub> O-N/kg N)
Lagunas anaerobias y sistemas líquidos	0.001
Almacenamiento sólido, secado u otro <sup>3</sup>	0.020
Otros sistemas	0.005

Finalmente, la emisión total de óxido nitroso por manejo de excretas (con excepción de cuando son usadas como fertilizante) es:

$$Ea_N = Ea_{Na} + Ea_{Nm} \quad (4.37)$$

**b) Emisiones indirectas por volatilización/depositación de nitrógeno**

- 1) Calcular el nitrógeno total excretado por los animales  $KN$ , descontando las excretas usadas como fertilizante  $KN_e$ , calculado en la ecuación (4.4a) o (4.4b) :

$$KN = \sum_j (P_j \cdot (M_i / 1000) \cdot K_j \cdot 365) - KN_e$$

ó

$$KN = \sum_j P_j \cdot K_{Tj} \quad (4.38)$$

- 2) Calcular el nitrógeno excretado por los animales y que volatiliza,  $N_{ev}$ , considerando que 20% de este nitrógeno se volatiliza como NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>, la cantidad de N que se volatiliza es:

$$N_{ev} = 0.2 \cdot KN \quad (4.39)$$

- 3) Calcular la emisión de óxido nitroso debida a la volatilización/depositación de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>, por manejo de excretas,  $Ea_N$ , suponiendo un  $f = 0.01$  (kg N<sub>2</sub>O-N/kg NH<sub>3</sub>-N y NO<sub>x</sub>-N volatilizados):

$$Ea_N = 0.01 \cdot N_{ev} \quad (4.40)$$

**c) Emisiones indirectas por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y por la escorrentía superficial**

- 1) Estimar la cantidad de nitrógeno transportada proveniente del manejo de excretas, con excepción de las usadas como fertilizante. La fracción de nitrógeno que se

transporte en el agua subterránea y superficial es de 0.3 kg N/kg N en las excretas (IPCC, 1997), entonces:

$$N_{ew} = 0.3 * KN \quad (4.41)$$

- 2) Estimar la emisión indirecta de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua,  $Ea_N$ , suponiendo un  $f = 0.025$  kg de (N<sub>2</sub>O-N)/kg N que se transporte en el agua:

$$Ea_N = 0.025 * N_{ew} \quad (4.42)$$

#### 4.2.2 Emisiones al agua y suelo

Al igual que para las emisiones al aire (tabla 4.7), la tabla 4.18 resume los métodos de estimación recomendados para cada una de las emisiones esperadas al agua y al suelo. El método de estimación corresponde a una combinación entre balance de materiales y factores de emisión, y se requiere de la estimación previa de la emisión al aire del ingrediente activo o inerte, calculada en las ecuaciones (4.14), (4.15) y (4.16), cuya emisión al agua y suelo se quiere estimar.

**Tabla 4.18** Métodos recomendados de estimación de emisiones al agua y suelo

	Actividad	Sustancia RETC	Clave	Método recomendado
<i>Actividades agrícolas</i>				
3	Aplicación de plaguicidas	Endosulfan	959-98-8	BM / FE
		Paration metílico	298-00-0	BM / FE
		Clorpirifos	2921-88-2	BM / FE
		Comp. de cobre	CCM06	BM / FE
		1,1,1-tricloroetano	79-00-5	BM / FE

En el caso de las emisiones al agua y al suelo, las sustancias contaminantes emitidas (ingredientes activos e inertes de plaguicidas) son las mismas para ambos medios y, por esta razón, la estimación de las emisiones se hace en conjunto. Aunque existen modelos que permiten obtener una estimación más precisa de este tipo de emisión, éstos requieren de información más detallada acerca de las reacciones físico-químicas entre el plaguicida aplicado y el suelo.

Por conservación de masa se establece que la cantidad total de un cierto ingrediente aplicado es emitido a los tres medios (aire, agua y suelo), es decir,

$$P_i' = P_i * A$$

$$P_i' = Ea_i + Ew_i + Es_i \quad (4.43)$$

por lo tanto,

$$E_{w_i} + E_{s_i'} = P_i - E_{a_i} \quad (4.44)$$

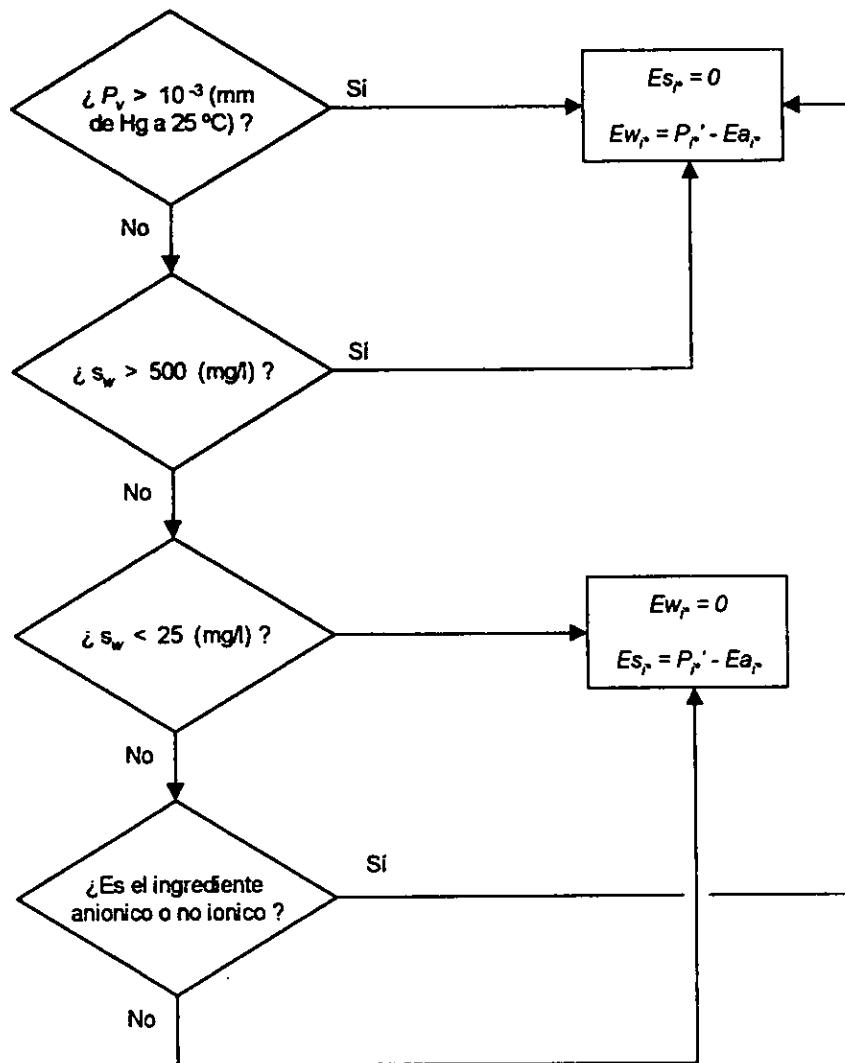
No es posible predecir exactamente qué parte del ingrediente migrará en el agua y qué parte quedará adsorbida por las partículas de suelo, ya que esto dependerá de la fisico-química entre el plaguicida y el suelo en cada caso particular. Sin, embargo, conociendo algunas características del ingrediente (presión de vapor, solubilidad en agua y capacidad de ionización), es posible predecir su tendencia a permanecer en uno de los dos medios. Así, se propone la secuencia lógica de la figura 4.2 que supone que la totalidad del ingrediente que no ha sido emitido al aire es emitido a uno, y solo uno, de los restantes dos medios (agua o suelo). El cálculo de las emisiones esta basado en la ecuación de balance de materiales (4.44).

### 4.3 Análisis y adaptación de factores de emisión

Antes de emplear un factor de emisión es necesario analizar las condiciones particulares para las cuales el factor fue desarrollado y comparar esas condiciones con las del caso para las que éste se desee aplicar.

Existen casos en que no es posible desarrollar un factor de emisión único, para cualquier condición de un mismo proceso sin incurrir en errores inaceptables. En estos casos, es preferible definir dos o más rangos o estados de las variables del proceso y desarrollar los correspondientes factores de emisión. Por ejemplo, en el caso de la emisión de COVs por uso de plaguicidas, el método de aplicación de éstos influye de manera tal que no es posible establecer un sólo factor para cualquier método, por lo que existe un factor de emisión cuando se trata de aplicación superficial del plaguicida y otro para el caso de incorporación al suelo mediante procedimientos de labranza.

La precisión de la estimación de la emisión dependerá de la similitud entre las condiciones de desarrollo y las de aplicación del factor de emisión que se decida emplear, así como de la precisión con la que haya sido evaluado el nivel de actividad. En la tabla 4.20 se presentan las variables utilizadas para calcular los niveles de actividad, señalándose cuáles de ellas deben ser medidas o estimadas para cada sitio (valor local = L), y aquellas para las cuales se emplean los valores recomendados en la literatura (valor recomendado = R). En la misma tabla se señalan las unidades de los factores de emisión a emplear, de las cuales se desprende la variable de proceso tomada como nivel de actividad.



**Figura 4.2** Determinación de la emisión de un ingrediente activo o inerte al agua y suelo

**Tabla 4.20 Variables utilizadas para calcular los niveles de actividad**

Emisión	Variables para calcular nivel de actividad		Unidades del factor de emisión $f$
	Variable	L / R <sup>1</sup>	
<b>Emisiones al aire</b>			
Bióxido de carbono por tratamiento de los suelos con cal y/o dolomita durante la preparación de suelos	C	L	ton C / ton cal
	D	L	ton C / ton dolomita
Emisiones directas de óxido nítrico por uso de fertilizantes	$F_{cl} N_{cl}, P_f, F_o$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg N
	$w_{p_i}, M_i, K_i$ ó $w_{p_i}, M_i, K_{Tj}$	R	
Emisiones indirectas de óxido nítrico por volatilización/depositación por uso de fertilizantes	$F_{cl} N_{cl}, P_f, F_o$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg (NH <sub>3</sub> -N y NO <sub>x</sub> -N) volatilizados
	$w_{p_i}, M_i, K_i$ ó $w_{p_i}, M_i, K_{Tj}$	R	
Emisiones indirectas de óxido nítrico por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y escorrentía superficial, por uso de fertilizantes	$F_{cl} N_{cl}, P_f, F_o$	L	kg de (N <sub>2</sub> O-N) / kg N que se fuga en el agua
	$w_{p_i}, M_i, K_i$ ó $w_{p_i}, M_i, K_{Tj}$	R	
COVs por la aplicación de plaguicidas	$P, A$ ó $P', a, i, i_{cov}$ ó $P', a$	L	kg de COV del ingrediente activo / ton de ingrediente activo aplicado
	v	R	
Metano por cultivo de arroz en campos inundados	A	L	$f_{min}$ (g CH <sub>4</sub> / m <sup>2</sup> cosechado)
			$f_{max}$ (g CH <sub>4</sub> / m <sup>2</sup> cosechado)
Óxido nítrico por cultivos fijadores de nitrógeno	$C_j$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg N en la biomasa seca de los cultivos
	$d_j$	R	
Óxido nítrico por residuos vegetales sobrantes de la cosecha	$C_j$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg N en los residuos secos
	$p_j, d_j, q_j, N_r$	R	
Metano por la quema de residuos en los campos	$C_j$	L	kg CH <sub>4</sub> / kg C emitido
	$p_j, q_j, d_j, \eta_a, \eta_o, C_j$	R	
Óxido nítrico por la quema de residuos en los campos (Método U.S.EPA)	$C_j$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg N de la materia seca quemada
	$p_b, q_b, d_b, \eta_o, \eta_o, N_r, C_j$	R	
Óxido nítrico por la quema de residuos en los campos (Método IPCC)	$C_j$	L	-
	$p_b, q_b, d_b, \eta_o, \eta_o, C_j, (N/C)_j$	R	
Metano por fermentación entérica	$P_j$	L	kg CH <sub>4</sub> / cabeza / año
Metano por manejo de residuos orgánicos (excretas) de los animales (Método USEPA)	$P_j$	L	-
	$M_j, sv_j, Bo_p, w_{p_i}, m_k$	R	
Metano por manejo de residuos orgánicos (excretas) de los animales (Método IPCC)	$P_j$	L	kg de CH <sub>4</sub> / cabeza / año
Emisión directa de óxido nítrico por manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	$P_j$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg N manejado por cada sistema
	$w_{p_i}, M_i, K_i$ ó $w_{p_i}, M_i, K_{Tj}$	R	
Emisión indirecta de óxido nítrico por volatilización / depositación por manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	$P_j$	L	kg (N <sub>2</sub> O-N) / kg (NH <sub>3</sub> -N y NO <sub>x</sub> -N) volatilizados
	$M_i, K_i$ ó $M_i, K_{Tj}$	R	
Emisión indirecta de óxido nítrico por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y escorrentía superficial, por manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	$P_j$	L	kg de (N <sub>2</sub> O-N) / kg N que se fuga en el agua
	$M_i, K_i$ ó $M_i, K_{Tj}$	R	

**Tabla 4.20 Variables utilizadas para calcular los niveles de actividad (continuación)**

Emisión	Variables para calcular nivel de actividad		Unidades del factor de emisión <i>f</i>
	Variable	L / R <sup>1</sup>	
<b>Emisiones al agua y suelo</b>			
Ingredientes activos e inertes de plaguicidas <sup>2</sup>	$P_v, S_w$ capac. de ioniz.	L	-

(1) L = información local; R = recomendación de la literatura.

(2) El método utiliza, además, la estimación de emisión al aire de COVs de la aplicación de plaguicidas.

Como ya se mencionó, un factor de emisión depende de una serie de variables que influyen en mayor o menor proporción sobre el valor del factor. Ya que la idea de desarrollar un factor de emisión es contar con un *número* que permita estimar la emisión de una fuente dada, con un nivel de confianza aceptable y de una manera sencilla, en un rango tan amplio como sea posible, es necesario definir cuáles de las variables que influyen sobre éste, lo hacen de manera más significativa.

En la presente sección se analizan los factores de emisión recomendados, en cuanto a las variables de las que dependen, las condiciones para las que fueron estimados y el grado de ajuste de éstas, a la situación en México. Debe tenerse presente que un factor de emisión es útil para la estimación a largo plazo y representa las emisiones características bajo las condiciones promedio en dicho plazo.

Idealmente, un factor de emisión debería ser aplicado solamente bajo las condiciones y rangos de las variables para las cuáles fue determinado, sin embargo, en la práctica es posible ampliar su uso a situaciones similares, no sin antes analizar:

- a) ¿qué variables pueden introducir errores importantes al ser diferentes de las condiciones para las cuáles el factor fue desarrollado?
- b) ¿es significativa o no, la magnitud de dicha diferencia?

Dado lo anterior, resulta necesaria la revisión de los factores propuestos, con el fin de determinar si son o no aplicables a las condiciones locales/nacionales, o es necesario ajustar estos factores para México o, inclusive, desarrollar factores de emisión propios.

En el anexo 2 se presentan las fichas técnicas de los factores de emisión que se utilizan en los métodos de estimación propuestos, señalándose, entre otras, las:

- condiciones para las cuáles fueron estimados y
- variables que influyen sobre cada factor de emisión.

Cabe destacar que, aunque es posible que un factor de emisión dependa de un número elevado de variables, es recomendable seleccionar la menor cantidad de ellas para la realización del análisis y adaptación del factor, debido básicamente a que de esta manera se simplifica el diseño, realización y análisis del experimento a través del cual se medirá la significancia de las diferencias y, como consecuencia, se realiza un uso adecuado de los recursos materiales destinados a este fin.

Con base en la información de las fichas técnicas de cada factor, a continuación se enuncian las variables que podrían ser fuentes de error en la aplicación de los factores para la estimación de emisiones de la agricultura en México.

#### ***Emisión de bióxido de carbono durante la preparación de suelos***

- **Composición química de la cal y la dolomita:** es posible suponer que en México se utilizan cal y dolomita de características semejantes a las empleadas en Estados Unidos, donde fue obtenido el factor. Por lo tanto, se estima que esta variable no es una fuente significativa de error.
- **Tipo de suelo (humedad, temperatura, pH, contenido de materia orgánica):** ya que los factores de emisión corresponden a un promedio de los resultados encontrados para distintos tipos de suelo, es posible suponer que ese promedio también es representativo de los suelos de México. Por lo tanto, se supone que esta variable no es una fuente significativa de error.

#### ***Emisiones directas de óxido nitroso por: (a) uso de fertilizantes, (b) cultivos fijadores de nitrógeno y/o (c) residuos vegetales sobrantes de la cosecha***

- **Tipo de suelo (humedad, temperatura, concentración de nitratos y amonio, disponibilidad de carbono orgánico, pH):** se estima que esta variable no es una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para la emisión de bióxido de carbono por tratamiento de suelos.
- **Clima:** la variable clima puede ser descrita por varios factores climáticos tales como la temperatura y humedad del aire, la velocidad del viento, las precipitaciones y la presión atmosférica, por este motivo, es posible suponer que México presenta climas particulares que no fueron necesariamente similares a aquellos donde se estimó este factor de emisión, por lo tanto, la variable clima puede ser fuente significativa de error.
- **Método de incorporación del nitrógeno al suelo:** esta variable corresponde a una práctica agrícola que está estrechamente ligada a las características locales del nivel de tecnología empleado en la agricultura. Dado lo anterior, no es posible suponer que en México se emplean, en promedio, las mismas prácticas de incorporación de nitrógeno al suelo que las consideradas en la determinación del factor. Por lo tanto, esta variable puede ser fuente significativa de error.
- **Tipo de cultivo:** los cultivos más importantes de México no son necesariamente los considerados para la determinación del factor, por lo tanto, la variable tipo de cultivo puede ser fuente significativa de error.

#### ***Emisiones indirectas de óxido nitroso por volatilización/depositación por uso de fertilizantes y manejo de excretas***

- **Tipo de suelo (presencia de oxígeno, temperatura, concentración de nitratos, disponibilidad de carbono orgánico y pH):** se estima que esta variable no es una fuente

significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones de bióxido de carbono por tratamiento de suelos.

- **Clima:** se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones directas de óxido nitroso.

#### ***Emisiones indirectas de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y escorrentía superficial, por uso de fertilizantes y manejo de excretas***

- **Características del agua** (presencia de oxígeno, temperatura, concentración de nitratos, disponibilidad de carbono orgánico, presencia de microorganismos y pH): la volatilización de óxido nitroso desde el agua depende de las reacciones bioquímicas que se produzcan entre los compuestos nitrogenados arrastrados y el agua, y estas reacciones son reguladas por las características de calidad del agua. Sin embargo, es posible suponer que el factor de emisión corresponde a un promedio de los resultados encontrados para distintas calidades de agua superficial y subterránea y que este promedio también es representativo de la calidad de las aguas de México. Por lo tanto, se estima que esta variable no es una fuente significativa de error.
- **Clima:** se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones directas de óxido nitroso.

#### ***Emisión de COVs por la aplicación de plaguicidas***

- **Tipo de suelo** (presencia de oxígeno, temperatura, concentración de nitratos, disponibilidad de carbono orgánico y pH): se estima que esta variable no es una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones de bióxido de carbono por tratamiento de suelos.
- **Clima:** se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones directas de óxido nitroso.

#### ***Emisión de metano por cultivo de arroz en campos inundados***

- **Tipo de suelo** (presencia de oxígeno, temperatura, concentración de nitratos, disponibilidad de carbono orgánico y pH): se estima que esta variable no es una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones de bióxido de carbono por tratamiento de suelos.
- **Clima:** se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error por la misma razón que se describió para las emisiones directas de óxido nitroso.
- **Tipo de arroz:** estos factores de emisión fueron estimados por el IPCC considerando una amplia variedad de tipos de arroz, por lo cual es posible suponer que las variedades de arroz que se cultivan en México están bien representadas. Por lo tanto, se estima que esta variable no es una fuente significativa de error.
- **Manejo del agua de inundación** (ciclos de inundación, profundidad, etc): al igual que para la variable anterior, el IPCC estimó estos factores de emisión considerando un amplio conjunto de prácticas de manejo del agua, entre las cuales puede suponerse que están representadas las de México. Por lo tanto, se estima que esta variable no es una fuente significativa de error.

- **Uso de fertilizantes:** los factores de emisión fueron desarrollados sólo para los casos en que no se usan fertilizantes orgánicos, lo que no necesariamente ocurre de manera general en México. Por lo tanto, se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error.

#### *Emisión de óxido nitroso y metano por la quema de residuos en los campos*

- **Tipo de cultivo:** los cultivos más importantes de México no son necesariamente los considerados para la determinación del factor, por lo tanto, la variable tipo de cultivo puede ser fuente significativa de error.

#### *Emisión de metano por fermentación entérica*

- **Sistema de alimentación de los animales** (calidad y cantidad de los alimentos, esquema de alimentación): los sistemas de alimentación del ganado, al igual que las prácticas de manejo de la agricultura, están estrechamente ligadas al nivel tecnológico disponible y aplicado en una región. Se puede suponer que las prácticas comunes en México difieren de aquellas para las cuales los factores de emisión fueron desarrollados, por lo tanto, esta variable puede ser fuente significativa de error.
- **Nivel de actividad física:** el nivel de actividad física de los animales es una variable importante dentro del balance energético utilizado en el modelo con que se estimaron estos factores de emisión. Por otra parte, esta variable depende de las prácticas ganaderas imperantes (ganadería intensiva o extensiva). Ya que los factores de emisión recomendados representan condiciones promedio de las regiones para las cuales fueron desarrollados, no es posible asegurar que estas condiciones sean similares a las condiciones promedio de México. Por lo tanto, esta variable puede ser fuente significativa de error.
- **Clima:** esta es una variable que también influye en los resultados del balance energético del modelo utilizado para obtener los factores de emisión recomendados. Ya que no se puede asegurar que los climas de México sean similares a los empleados en el modelo, se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error.

#### *Emisión de metano por manejo de excretas*

Las variables que influyen sobre estos factores son las mismas descritas para la emisión de metano por manejo de excretas. Todas ellas pueden ser fuentes significativas de error,

#### *Emisión directa de óxido nitroso por manejo de excretas y defecación directa de los animales sobre el campo*

- **Composición de las excretas:** ya que las características del ganado en México y de su dieta pueden diferir de aquellas para las que los factores de emisión fueron desarrollados, la calidad o composición de sus excrementos puede también diferir de esas condiciones. Como no es posible asegurar que la composición promedio de las excretas del ganado en México sea similar al del considerado en la estimación de estos

factores de emisión, se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error.

- **Características del sistema de manejo de excretas** (cantidad de oxígeno, humedad, tipo de microorganismos presentes): ya que el manejo de excretas se realiza en condiciones estándares y los factores de emisión desarrollados corresponden a un promedio de los resultados encontrados para distintas características estos sistemas, es posible suponer que ese promedio también es representativo de la situación en México. Por lo tanto, se supone que esta variable no es fuente significativa de error.
- **Temperatura del aire**: esta es una variable que influye en las reacciones por las cuáles el óxido nitroso se volatiliza desde los sistemas de manejo de excretas. No es posible asegurar que los rangos de temperatura promedio de México estén representados en la estimación de los factores de emisión recomendados. Por lo tanto, se estima que esta variable puede ser una fuente significativa de error.

En la tabla 4.21 se resumen las variables que pueden ser fuentes significativas de error en el uso de los factores de emisión recomendados. Se puede notar que estas variables son de dos tipos:

- a) variables climáticas, y
- b) variables de prácticas de manejo

En la figura 4.3 se muestran los pasos para el análisis, aceptación o rechazo de un factor de emisión.

En la siguiente sección se establece la metodología a seguir para responder las preguntas 3 y 4 del diagrama. Es decir, establecer si la diferencia entre las condiciones de México y aquellas para las cuáles fue desarrollado el factor de emisión son significativas y de no serlo qué acciones tomar.

#### **4.4 Programa de calibración de factores de emisión**

Ya establecidos los casos en los cuales es posible que existan diferencias importantes entre las características de México y aquellas para las que los factores de emisión fueron estimados, es necesario analizar mediante un programa de calibración, si dichas diferencias son tales. El programa de calibración propuesto requiere que se establezcan:

- a) la prioridad para la calibración de cada factor
- b) el procedimiento estadístico que valide la existencia de diferencias significativas entre las condiciones nacionales/locales y las del factor recomendado en la literatura.

El procedimiento que se establece a continuación deberá ser empleado para todas las estimaciones de emisiones realizadas en México, en orden de prioridades, se hayan o no detectado diferencias entre las variables que influyen sobre cada factor de emisión.

#### 4.4.1 Priorización para la calibración

Dentro del programa de calibración se incluye el establecimiento de la prioridad de la estimación de cada emisión. de acuerdo a los siguientes criterios:

##### a) Importancia de la emisión

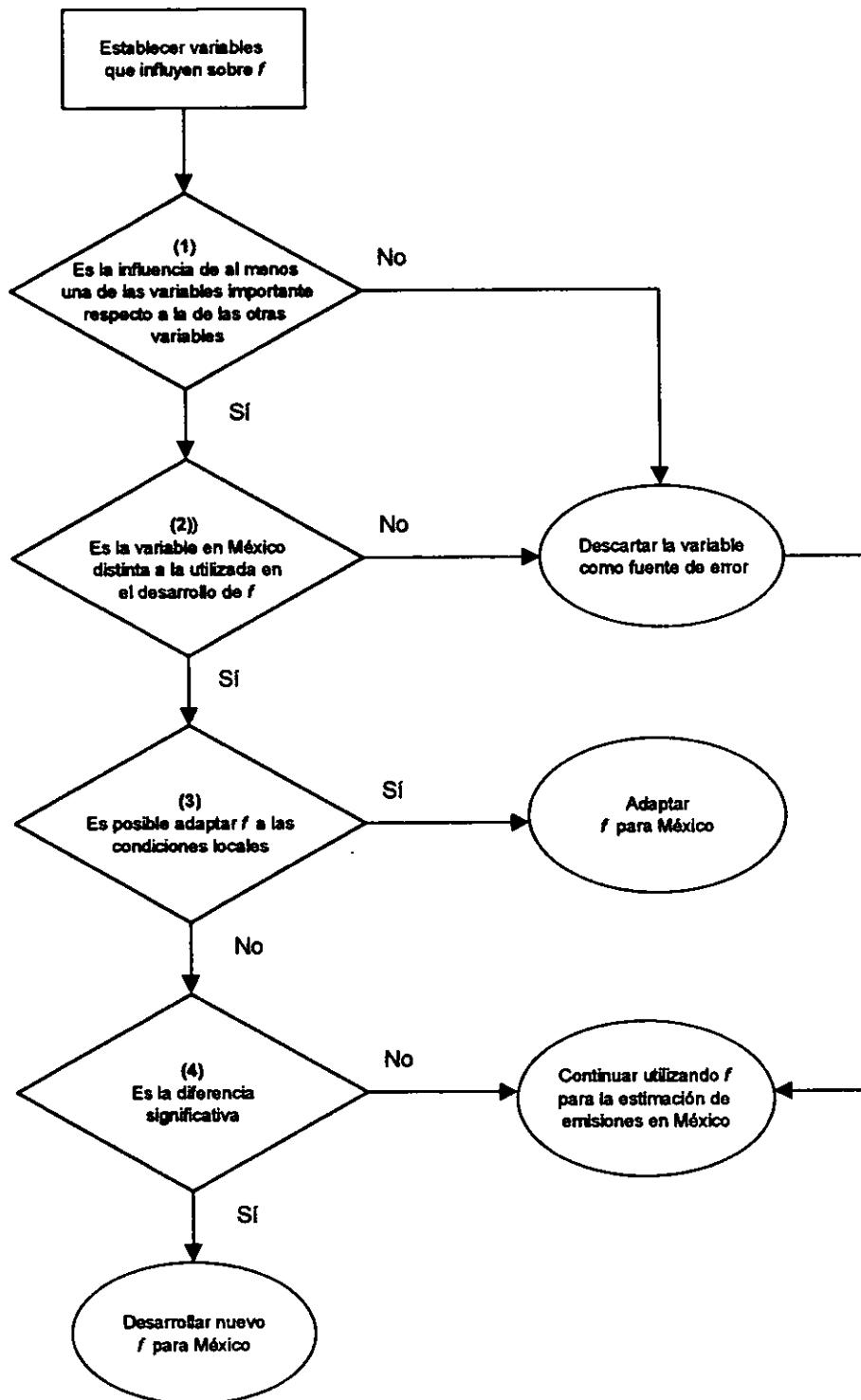
- Volumen de la emisión (con base en la estimación de emisiones resultado de la aplicación de los métodos propuestos o de acuerdo a la experiencia internacional)
- Toxicidad de la emisión
- Convenios internacionales (ya que para México es obligatorio reportar las emisiones que se incluyen en los distintos convenios internacionales y, además, existe el compromiso de mejorar la calidad de las estimaciones)

##### b) Variables que pueden introducir error

- Cantidad de estas variables
- Influencia relativa de estas variables, según sección anterior

**Tabla 4.21** Variables que pueden ser fuentes de error

Emisión	Variables que influyen
<i>Emisiones directas de óxido nitroso por:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uso de fertilizantes</li> <li>• cultivos fijadores de nitrógeno</li> <li>• residuos vegetales sobrantes de la cosecha.</li> </ul>	Clima
	Método de incorporación del nitrógeno al suelo
	Tipo de cultivo
<i>Emisiones indirectas de óxido nitroso por volatilización / depositación por uso de fertilizantes y manejo de excretas</i>	Clima
<i>Emisiones indirectas de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y escorrentía superficial, por uso de fertilizantes y manejo de excretas.</i>	Clima
<i>Emisión de COVs por la aplicación de plaguicidas</i>	Clima
<i>Emisión de metano por cultivo de arroz en campos inundados</i>	Uso de fertilizantes
<i>Emisión de óxido nitroso y metano por la quema de residuos en los campos</i>	Tipo de cultivo
<i>Emisión de metano por fermentación entérica</i>	Sistema de alimentación de los animales
	Nivel de actividad física
	Clima
<i>Emisión de metano por manejo de excretas.</i>	Sistema de alimentación de los animales
	Nivel de actividad física
	Clima
<i>Emisión directa de óxido nitroso por manejo de excretas y defecación directa de los animales sobre el campo.</i>	Composición de las excretas
	Temperatura del aire



**Figura 4.3** Proceso de análisis de un factor de emisión

En la tabla 4.22 se califica cada emisión de acuerdo a los criterios mencionados, asignando un puntaje parcial por criterio a cada emisión para luego obtener un puntaje total, correspondiente a la suma de los puntajes parciales. De esta manera, dichos puntajes se asignan como se describe a continuación:

- *Por volumen*: esta calificación preliminar se realiza de acuerdo a lo publicado en la literatura internacional, respecto del volumen esperado de emisión de un contaminante en relación al volumen de emisión de los otros contaminantes incluidos en este estudio (Berdowski et al, 1997 y 1998; USEPA, 1998) . Con base en este criterio se califica el volumen de cada emisión como bajo, medio o alto, asignándole un puntaje parcial de 1, 2 o 3, respectivamente. Una vez realizado un primer ciclo de estimaciones, se deberá revisar esta puntuación y modificarla si así correspondiera.
- *Por toxicidad*: si el contaminante no es tóxico se le asigna un puntaje de 1; si lo es, se le asigna 2.
- *Por convenios internacionales*: si el contaminante debe ser reportado en algún convenio internacional (i.e.: cambio climático, capa de ozono, Tratado de Libre Comercio de América del Norte), se le asigna un puntaje de 2, en caso contrario, su puntaje será de 1.
- *Por cantidad de variables y su influencia*: para cada variable detectada como sospechosa de introducir un error en el uso del factor de emisión respectivo (tabla 4.21) se determina, con base en la literatura (IPCC, 1997; USEPA, 1998a) la magnitud de su influencia relativa respecto de las otras variables. Así, si la influencia de una variable es baja, se le asigna un puntaje de 1; si es media, de 2 y si es alta, de 3, determinándose el puntaje total por este criterio como la suma de los puntajes de cada una de las variables que influyen en una emisión.

Finalmente, el puntaje total de cada emisión se obtiene como la suma de los cuatro puntajes parciales descritos.

En la tabla 4.23 se presenta el programa priorizado de calibración resultante de la evaluación realizada en la tabla 4.22.

#### 4.4.2 Adaptación de factores de emisión

Cuando sea posible, resulta conveniente adaptar el factor de emisión recomendado a las condiciones de México. La adaptación de factores se refiere a la modificación del factor de emisión a través de la aplicación de una función que incluya la variable que justifica la adaptación del factor, tanto en sus condiciones originales como aquellas para las cuales se quiere adaptar el factor. Esto es,

$$f_c = F(X, X^*)f \quad (4.45)$$

donde:

- $X$  = variable en sus condiciones originales  
 $X^*$  = variable en sus condiciones locales (aquellas para las cuales se quiere adaptar  $f$ )  
 $F$  = factor de emisión original  
 $f_c$  = factor de emisión adaptado, o corregido, a las condiciones locales  
 $F(X, X^*)$  = función de adaptación del factor de emisión original a las condiciones locales

La función  $F$  puede ser cualquiera que refleje adecuadamente el efecto de la diferencia entre  $X$  y  $X^*$  sobre  $f$ . Por ejemplo, suponiendo que para un determinado factor de emisión  $f$ , que depende de manera importante de la variable temperatura ( $T$ ), dicha variable es distinta en las situaciones original y local ( $X = T$  y  $X^* = T^*$ ); por otra parte, se sabe que el factor de emisión aumenta directamente con la proporción ( $T^*/T$ ), entonces:

$$F(T, T^*) \propto \left( \frac{T^*}{T} \right)$$
$$f_c \propto f \left( \frac{T^*}{T} \right)$$

Las ventajas de realizar una adaptación de factores de emisión son:

- permite obtener estimaciones de emisiones más confiables con sólo aplicar una fórmula
- no es necesario realizar una validación estadística para tener certeza de si las diferencias entre las condiciones local y original son significativas, y
- no es necesario desarrollar un nuevo factor de emisión para las condiciones locales, lo cual implica un ahorro importante de recursos.

Por otra parte, existen algunos casos para los cuales la adaptación del factor de emisión no será posible o recomendable, estas son:

- aquellos casos en que existan dos o más variables que produzcan diferencias significativas,
- aquellos casos en que no se tenga antecedentes para establecer la función  $F$  de manera confiable.

**Tabla 4.22: Evaluación de los criterios para la priorización de la calibración de los factores de emisión**

Criterios	Emisiones											
	Importancia de la emisión				Medio por uso de plaguicidas				Medio por cultivo de arroz en campos inundados			
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
<b>Puntaje 1</b>	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Puntaje 2</b>	No	1	2	No	1	2	SI	2	3	SI	2	No
Convenios Internacionales	SI	2	3	SI	2	3	SI	2	3	SI	2	3
<b>Puntaje 1</b>	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
<b>Variables que pueden introducir error</b>												
Cantidad de variables y su influencia:	Clima / Alta		Clima / Alta		Clima / Alta		Clima / Alta		Clima / Alta		Clima / Alta	
Variable / Influencia	Mét. de incorp. de nitrógeno al suelo / Alta		Clima / Alta		Clima / Alta		Uso de fert. / Alta		Tipo de cultivo / Alta		Clima / Alta	
	Tipo de cultivo / Baja		Clima / Alta		Clima / Alta		Tipo de cultivo / Baja		Tipo de cultivo / Baja		Sist. de alim. de animales / Alta	
<b>Puntaje 4</b>	7	3	7	3	3	6	3	7	4	7	7	5
<b>Puntaje Final 1</b>	12	7	14	7	9	11	7	10	14	12	10	10

(1) Bajo = 1, Medio = 2 y Alto = 3.  
 (2) No = 1 y SI = 2.  
 (3) No = 1 y SI = 2.  
 (4) Por cada variable: Influencia Baja = 1, Influencia Media = 2 e Influencia Alta = 3. El puntaje corresponde a la suma de los puntajes por variable.  
 (5) Puntaje final: corresponde a la suma de los cuatro puntajes parciales

**Tabla 4.23 Programa priorizado de calibración de factores de emisión**

Orden de prioridad	Factor de emisión
1	Metano por fermentación entérica
2	Óxido nítrico por uso de fertilizantes, cultivos fijadores de nitrógeno y residuos vegetales sobrantes de la cosecha
	Metano por manejo de excretas
3	Metano por cultivo de arroz en campos inundados
4	Metano por la quema de residuos vegetales
	Óxido nítrico por manejo de excretas y defecación directa de los animales sobre el campo
5	COVs por uso de plaguicidas
6	Óxido nítrico por la quema de residuos vegetales en los campos
	Óxido nítrico por vol./dep., por uso de fertilizantes y manejo de excretas
	Óxido nítrico por transporte en el agua sub. y superf., por uso de fertilizantes y manejo de excretas

#### 4.4.3 Diseño de la calibración

Cuando no se pueda, o no sea recomendable, adaptar un factor de emisión a las condiciones locales, es conveniente analizar si las diferencias entre los valores estimados con los factores de emisión y los valores reales son o no significativas. Este paso corresponde a responder la pregunta 3 del esquema de la figura 4.3. Para esto es necesario establecer el diseño de la experimentación que permita evaluar si los factores de emisión recomendados en la literatura pueden o no ser aplicados sin restricciones a las condiciones de México. El análisis de los datos experimentales se realiza a través de una prueba de variancia (ANVA<sup>13</sup>). En caso de que las conclusiones de la prueba indiquen la existencia de diferencias significativas, se debería desarrollar el factor de emisión nacional/local correspondiente a partir de datos experimentales. En caso contrario, se acepta que el factor de emisión extranjero para las condiciones nacionales/locales y que, por lo tanto, con su aplicación se pueden realizar estimaciones de emisiones y establecer el grado de confianza de dichas estimaciones.

Como ya se mencionó en la sección anterior, es importante que el diseño de experimento a realizar sea el más simple posible, según las condiciones particulares de cada factor de emisión. Antes de seguir adelante, es conveniente realizar algunas definiciones:

**Variable de respuesta:** corresponde a aquella variable aleatoria cuyos datos o valores observados de respuesta a cada tratamiento serán analizados. En este caso la variable será el factor de emisión  $f$ .

La variable de respuesta  $f$  se obtiene a través de un muestreo, como el cociente (emisión medida / nivel de actividad medido). Estas mediciones dependerán de cada caso particular

<sup>13</sup> Referencias para esta prueba se pueden encontrar en *Diseño Estadístico de Experimentos* (Montgomery, 1996).

y, para cada caso, se deberá definir las condiciones específicas del muestreo (parámetro medido, técnica de muestreo, técnica analítica, etc.).

**Factor de interés:** corresponde a aquella variable cuyo efecto sobre la variable de respuesta se quiere analizar. El factor de interés puede ser uno sólo o más de uno, en este último caso, será necesario el uso de un modelo factorial. Los factores de interés corresponden a aquellas variables que, en la sección 4.4, se establecieron como posibles fuentes de diferencias o efectos significativos.

**Tratamientos:** corresponden a los niveles (valores, rangos de valores, calificación, estado, etc.) del factor de interés que se desean comparar.

**Variable de bloqueo:** corresponde a una variable cuyo efecto sobre la variable de respuesta no interesa analizar pero que, sin embargo, es posible que introduzca algún efecto sobre los valores de dicha variable y, por lo tanto, es necesario aislar este efecto.

**Bloques:** corresponden a los niveles (valores, rangos de valores, calificación, estado, etc.) de cualquier variable de bloqueo cuyo efecto se quiere aislar.

**Tamaño y grados de libertad de la muestra:** sea  $p$  la cantidad de factores de interés,  $m$  el número de tratamientos que se quieren comparar y  $n$  el número de muestras o réplicas de  $f$  para cada tratamiento, entonces el tamaño total de la muestra será  $p \times m \times n$ . El valor mínimo de  $n$  debe ser tal que permita tener un número conveniente de grados de libertad para utilizar la prueba estadística correspondiente.

**Grados de libertad:** cantidad de datos independientes en una muestra utilizados para el cálculo de un estadístico.

De manera general es posible señalar lo siguientes tipos de diseño experimentales:

- a) **Diseño de efectos fijos completamente aleatorizado:** corresponde a aquellos casos en que existe sólo un factor o variable que interesa analizar (variable que pueda introducir un efecto importante) y se puede suponer que no existen otras fuentes de variabilidad sobre la variable de respuesta.
- b) **Diseño de efectos fijos con bloques aleatorizados:** en este caso también existe sólo un factor o variable que se quiere analizar, pero se piensa que puede(n) existir otra(s) variable(s) que también puede(n) introducir efectos sobre la variación total de los resultados y, por lo tanto, es necesario aislar dichos efectos.
- c) **Diseño factorial:** en este caso, existe más de un factor o variable de interés a analizar o se sospecha que existe interacción entre las variables que influyen en la variable de respuesta.

En todos los diseños mencionados, es necesario que se satisfagan las siguientes condiciones con el fin de que las conclusiones de la prueba sean estadísticamente válidas<sup>14</sup>:

- La componente de error aleatorio de la variable de respuesta, debe ser una variable normal de media cero y varianza  $\sigma_e^2$ .
- Los errores aleatorios deben ser independientes entre sí para todos los valores de la variable de respuesta.
- La varianza debe ser la misma para todos los tratamientos (existe homocedasticidad)

En caso de que la primera de estas condiciones no se cumpla, es posible emplear procedimientos estadísticos no paramétricos cuyo uso no implica la suposición de normalidad para los errores aleatorios. Si no se cumple la tercera condición, es factible emplear transformaciones en los valores de los datos que permiten estabilizar la varianza de los tratamientos. Sin embargo, si los errores aleatorios no son independientes, los datos experimentales no son válidos y es necesario repetir el muestreo.

El diseño de experimento que es recomendable utilizar, depende de cada factor de emisión en particular, de la cantidad de variables de mayor influencia (tabla 4.21) y de la magnitud de su influencia (tabla 4.22). De acuerdo con estas características, en la tabla 4.24 se muestran los diseños experimentales que se recomienda emplear para calibrar las estimaciones analizadas en este trabajo. La recomendación propone el modelo más simple posible basado en el análisis de la sección 4.3. Sin embargo, si existen los recursos necesarios, se recomienda incluir en la experimentación tantas variables como sea posible a fin de obtener resultados más confiables y, de acuerdo a esto, determinar el diseño experimental más adecuado a cada situación particular:

A continuación se justifica cualitativamente la recomendación que se realiza en la tabla 4.24 para cada factor de emisión, de acuerdo a una apreciación sobre la magnitud de la influencia de cada variable definida en la tabla 4.21, sobre el factor de emisión correspondiente. Todas las argumentaciones se apoyan en recopilaciones y experimentaciones realizadas por IPCC (1997), a menos que se indique una referencia adicional.

***Emissiones directas de óxido nitroso por: (a) uso de fertilizantes, (b) cultivos fijadores de nitrógeno, y/o (c) residuos vegetales sobrantes de la cosecha***

Las variables que tienen más influencia sobre este factor de emisión son: el *clima*, *método de incorporación del nitrógeno al suelo* y el *tipo de cultivo* (esta última variable, sólo en el caso de cultivos fijadores de nitrógeno).

La primera y la segunda de estas tres variables, corresponden a factores que controlan de manera importante los procesos de nitrificación-denitrificación, generadoras de las emisiones de óxido nitroso, ya que regulan la actividad microbiológica en el suelo.

---

<sup>14</sup> Existen procedimientos estadísticos que permiten comprobar estas condiciones (Montgomery, 1996).

Por otra parte, el *tipo de cultivo* es una variable que incide sobre la cantidad de nitrógeno disponible para dar origen a la emisión de óxido nitroso. Sin embargo, dicha cantidad es relativamente semejante en su orden de magnitud para los cultivos fijadores de nitrógeno que se producen en México, por lo tanto, se considera que esta variable tiene una influencia baja sobre la emisión de óxido nitroso respecto de las dos primeras variables consideradas.

Así, ya que se considera que las variables *clima* y *método de incorporación de nitrógeno al suelo* tienen una influencia alta sobre la emisión de óxido nitroso y la influencia de la variable *tipo de cultivo* es baja respecto de las otras dos se recomienda, como la alternativa más simple, la utilización de un modelo factorial (F) donde las dos primeras variables mencionadas corresponden a los factores e interés y la tercera variable no es considerada en el modelo. En caso de incluir la variable *tipo de cultivo* como una variable de bloqueo del diseño factorial descrito.

#### ***Emisiones indirectas de óxido nitroso por volatilización/depositación por uso de fertilizantes y manejo de excretas***

En este caso, se determinó que sólo la variable *clima* tiene una influencia significativa respecto de la que podrían tener otras variables.

La variable *clima*, en particular la temperatura, corresponde a un factor que incide fuertemente sobre el proceso de volatilización/depositación y, por lo tanto, sobre la cantidad de nitrógeno adicional disponible en el suelo que puede originar la emisión de óxido nitroso ir esta fuente.

De esta manera, ya que existe solamente una variable a considerar en el diseño experimental, se propone la utilización de un modelo completamente aleatorizado (A) donde la variable *clima* corresponde al factor de interés.

#### ***Emisiones indirectas de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y escorrentía superficial, por uso de fertilizantes y manejo de excretas***

Al igual que en el caso de las emisiones indirectas de óxido nitroso por volatilización / depositación por uso de fertilizantes y manejo de excretas, la variable *clima*, especialmente la temperatura, corresponde al factor que incide más fuertemente sobre la emisión de óxido nitroso por nitrógeno que ha sido transportado por las corrientes de agua superficiales y el agua subterránea.

Análogamente, se propone la utilización de un modelo completamente aleatorizado (A) donde la variable *clima* corresponde al factor de interés.

#### ***Emisión de COVs por la aplicación de plaguicidas***

La emisión de COVs por aplicación de plaguicidas está altamente influenciada por los factores climáticos, especialmente la temperatura, la humedad del aire y el viento (U.S.EPA, 1998). Estos factores inciden directamente sobre la capacidad de volatilización

de un COV. Es así que se determinó que sólo la variable *clima* tiene una influencia significativa respecto de la que podrían tener otras variables sobre esta emisión.

Por lo tanto, ya que existe solamente una variable a considerar en el diseño experimental, se propone la utilización de un modelo completamente aleatorizado (A) donde la variable *clima* corresponde al factor de interés.

### ***Emisión de metano por cultivo de arroz en campos inundados***

A pesar de que existe un gran número de variables que influyen sobre la emisión de metano por cultivo de arroz en campos inundados, son sólo dos las sospechosas de ejercer una influencia alta respecto de las restantes variables. Estas dos variables son el *clima* y el *uso de fertilizantes*.

El clima, particularmente la temperatura, regula la actividad microbiológica que da origen a la emisión de metano por esta fuente. Por otra parte, el *uso de fertilizantes* en forma de nitratos o sulfatos, disminuye la producción de metano ya que en condiciones de ausencia de oxígeno molecular actúan como aceptores finales de electrones y no es posible la existencia de bacterias estrictamente anaerobias, como es el caso de las bacterias metanogénicas.

Así, ya que se considera que las variables *clima* y *uso de fertilizantes* tienen una influencia alta sobre la emisión de óxido nitroso respecto de otras variables que podrían afectar este tipo de emisión, se recomienda la utilización de un modelo factorial (F) donde las dos variables mencionadas corresponden a los factores e interés.

### ***Emisión de óxido nitroso y metano por la quema de residuos en los campos***

Aún cuando existen varios factores que influyen de manera importante sobre estas emisiones, todos ellos inciden directamente sobre la estimación del nivel de actividad que serán multiplicados los factores de emisión respectivos. No obstante lo anterior, estos factores de emisión sí dependen de los contenidos de nitrógeno y carbono de los residuos vegetales a quemar, los que a su vez dependen del *tipo de cultivo* cuyos residuos serán quemados (U.S.EPA, 1998).

Por esta razón, ya que existe solamente una variable a considerar en el diseño experimental, se propone la utilización de un modelo completamente aleatorizado (A) donde la variable *tipo de cultivo* corresponde al factor de interés.

### ***Emisión de metano por fermentación entérica***

Las variables que tienen más influencia sobre este grupo de factores son: el *clima* y el *sistema de alimentación de los animales* (calidad y cantidad de alimentos ingeridos).

Ambas variables influyen en el balance energético con el cual tanto IPCC como USEPA han estimado estos los factores de emisión.

Así, ya que se considera que estas dos variables tienen una influencia alta sobre la emisión de metano, se recomienda, como la alternativa más simple, la utilización de un modelo factorial (F) donde las variables mencionadas corresponden a los factores e interés.

#### ***Emisión de metano por manejo de excretas***

Las variables que influyen sobre estos factores son las mismas descritas para la emisión de metano por fermentación entérica.

Análogamente a lo anterior, se propone la utilización de un modelo factorial (F) donde las variables *clima* y sistema de alimentación de los animales corresponden a los factores de interés del modelo.

#### ***Emisión directa de óxido nitroso por manejo de excretas y defecación directa de los animales sobre el campo***

Las variables que tienen más influencia sobre estos factores de emisión son: la *temperatura del aire* y la *composición e las excretas*.

Ambas variables controlan los procesos de nitrificación-denitrificación, generadoras de las emisiones de óxido nitroso, ya que regulan la actividad microbológica en el suelo o en los sistemas de manejo empleados. Es posible suponer que la *temperatura* ejerce una influencia mayor que la *composición de las excretas* en los procesos mencionados.

De esta manera, se propone, como la alternativa más simple, la utilización de un modelo bloqueado (B) donde la variable temperatura del aire corresponde al factor de interés y la *composición de las excretas* corresponde a la variable de bloqueo. Sin embargo, si existen sospechas de que estas dos variables interactúen o interfieran entre sí, el modelo experimental recomendado sería un factorial (F) con dos factores de interés.

**Tabla 4.24 Diseños estadísticos recomendados para analizar los factores de emisión**

<b>Factor de emisión</b>	<b>Diseño recomendado<sup>1</sup></b>	<b>Factores de interés</b>	<b>Variables de bloqueo</b>
Emisiones directas de óxido nitroso por: - uso de fertilizantes - cultivos fijadores de nitrógeno - residuos vegetales sobrantes de la cosecha	F o FB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clima</li> <li>• Forma de incorporación del nitrógeno al suelo</li> </ul>	Tipo de cultivo
Emisiones indirectas de óxido nitroso por volatilización/depositación, por uso de fertilizantes y manejo de excretas	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clima</li> </ul>	-
Emisiones indirectas de óxido nitroso por transporte en el agua subterránea y superficial, por uso de fertilizantes y manejo de excretas	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clima</li> </ul>	-
COVs por uso de plaguicidas	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clima</li> </ul>	-
Metano por cultivo de arroz en campos inundados	F	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clima</li> <li>• Uso de fertilizantes</li> </ul>	-
Oxido nitroso por la quema de residuos vegetales	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de cultivo</li> </ul>	-
Metano por la quema de residuos vegetales	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de cultivo</li> </ul>	-
Metano por fermentación entérica	F	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de alimentación de animales</li> <li>• Clima</li> </ul>	-
Metano por manejo de excretas	F	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de alimentación de animales</li> <li>• Clima</li> </ul>	-
Emisión directa de óxido nitroso por manejo de excretas y defecación directa de los animales sobre el campo	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura del aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composición de las excretas</li> </ul>

- (1) A: diseño de efectos fijos completamente aleatorizado  
 B: diseño de efectos fijos en con bloques aleatorizados  
 F: diseño factorial  
 FB: diseño factorial bloqueado

## 5. EJEMPLOS

A continuación se desarrollarán dos ejemplos con el fin de aplicar la metodología planteada para la estimación de emisiones de una actividad agrícola y una pecuaria.

### 5.1 Emisiones de paratión metílico

Se desarrolla este ejemplo ya que el paratión metílico es el ingrediente activo más usado en México en formulaciones de plaguicidas del tipo insecticida, para varios tipos de cultivo y estados del país. Su aplicación, como insumo indirecto para la producción agrícola, deriva en emisiones al aire, agua y suelo, tal como lo muestra el diagrama de la figura 4.1.

Este ingrediente activo es un COV de fórmula química  $C_6H_{10}NO_5PS$  (N°CAS 298-00-0), soluble en solventes orgánicos, relativamente soluble en agua y pobremente soluble en petróleo y en aceites minerales. Generalmente se aplica en spray, a partir de un concentrado emulsificable.

Por a su movilidad en el medio tiende a volatilizarse, aunque también permanece en el suelo (WHO, 1992). Las emisiones al aire ocurren en forma de vapores y las emisiones al agua y suelo corresponden al ingrediente activo.

#### 5.1.1 Análisis de información

En la tabla 5.1 se muestra la información necesaria para realizar la estimación de la emisión de paratión metílico a los distintos medios y posteriormente se describe la forma en que se obtuvo dicha información.

**Tabla 5.1 Información necesaria para la estimación de emisiones de paratión metílico**

Medio receptor	Información necesaria	Variable	Unidades
Aire	Cantidad de plaguicida aplicado	$P'$	ton/año
	Formulación del plaguicida		
	• Fracción del ingrediente inerte	$i$	-
	• Fracción del ingrediente activo	$a$	-
	• Fracción de COV del ingrediente inerte	$i_{COV}$	-
	Método de aplicación del plaguicida	-	-
	Presión de vapor del ingrediente activo	-	mm de Hg, (entre 20 y 25 °C)
Agua y suelo	Solubilidad en el agua del ingrediente activo del plaguicida	$s_w$	mg/l
	Capacidad de ionización del ingrediente activo del plaguicida	-	-
	Presión de vapor del ingrediente activo	-	mm de Hg, (entre 20 y 25 °C)
	Emisión del ingrediente inerte y activo al aire	$Ea_a, Ea_m$	kg/año

- **Cantidad de plaguicida aplicado:** no se cuenta con información de la cantidad de plaguicidas aplicados que usan paratión metílico en su formulación, pero se conoce el consumo aparente de este ingrediente activo a nivel nacional. De acuerdo con la Asociación Mexicana de la Industria de Plaguicidas y Fertilizantes, el consumo en 1995 fue de 2,447.54 kg/año (AMIFPAC, 1997).
- **Formulación del plaguicida:** no se cuenta con esta información; sin embargo, no será necesaria ya que se tiene la información de consumo aparente del ingrediente activo puro.
- **Método de aplicación del plaguicida:** no se cuenta con esta información específica, sin embargo, se supone que el plaguicida no se aplica de forma aérea y que su aplicación es superficial (situación más desfavorable, desde el punto de vista de la emisión al aire).
- **Presión de vapor del ingrediente activo:**  $P_v = 1.3 \text{ mPa} = 9.88 \times 10^{-6} \text{ mm de Hg}$  a  $20^\circ\text{C}$  (BCP & RSC, 1995).
- **Solubilidad en el agua del ingrediente activo del plaguicida:**  $S_w = 55 - 60 \text{ mg/l}$  a  $20^\circ\text{C}$  (BCP & RSC, 1995).
- **Capacidad de ionización del ingrediente activo del plaguicida:** no se cuenta con esta información, por lo cual se estimará la emisión al agua y suelo con base en los datos de presión de vapor y solubilidad del ingrediente activo.
- **Emisión del ingrediente inerte y activo al aire:** a calcular

### 5.1.2 Estimación de emisiones

De acuerdo a los métodos de estimación de emisiones de COVs al aire propuestos (ver sección 4.2.1.3) y de emisiones al agua y suelo (sección 4.2.2), a continuación se estiman dichas emisiones:

#### *Emisión al aire*

Se calcula la emisión del ingrediente activo. Se cuenta con información acerca de la cantidad total de ingrediente activo aparentemente usada en México a nivel nacional, lo que equivale al producto ( $P' * a$ ). Por otra parte, ya que se supuso que el método de aplicación es superficial y  $P_v = 9.88 \times 10^{-6} \text{ mm de Hg}$  a  $20^\circ\text{C}$ , el factor de emisión seleccionado es  $f = 350 \text{ kg de paratión metílico volatilizado / ton de paratión metílico aplicado}$ , por lo tanto, de la ecuación (4.14) se obtiene la emisión anual de paratión metílico al aire como:

$$\begin{aligned}
 E_{a_{ia}} &= (P' * a) * f \\
 &= 2.44754 * 350 \\
 E_{a_{ia}} &= 856.64 \text{ kg paratión metílico volatilizado/año en México}
 \end{aligned}$$

### **Emisión al agua y suelo**

Con la información disponible y la recién calculada emisión al aire; siguiendo el diagrama de la figura 4.2, se tiene lo siguiente:

- $P_v < 10^{-3}$  (mm de Hg a 20° C),
- $s_w < 500$  (mg/l),
- $s_w > 25$  (mg/l), por lo tanto:

$$E_{w_{ia}} = 0.00 \text{ kg paratión metílico emitidos al agua/año en México}$$

$$\begin{aligned}
 E_{s_{ia}'} &= (P' * a) - E_{a_{ia}} \\
 &= 2,447.54 - 856.64
 \end{aligned}$$

$$E_{s_{ia}'} = 1,590.9 \text{ kg de paratión metílico emitido al suelo/año en México}$$

### **5.1.3 Análisis de factores de emisión**

Como se ha visto, la única emisión de este ejemplo que utiliza directamente un factor de emisión para su estimación corresponde a la emisión al aire. Dicho factor se expresa en unidades de (kg de ingrediente activo que se volatiliza/ton de ingrediente activo aplicado) y es recomendado, específicamente, para ingredientes activos con una presión de vapor en el rango  $1 \times 10^{-6} < P_v$ , mm de Hg a 20°C  $< 1 \times 10^{-4}$  y de aplicación superficial. Debe señalarse que las variables que definen el nivel de actividad para la estimación de la emisión  $P' * a$ , en este caso, fueron determinadas localmente.

De acuerdo a lo señalado en el capítulo 4, secciones 4.3 y 4.4, y siguiendo el esquema de proceso de análisis de un factor de emisión (figura 4.3), se tiene que la única variable que podría ser fuente significativa de error en la aplicación de este factor es el *clima*.

En un comienzo se había considerado también la variable *tipo de Suelo*, sin embargo, se determinó que la variable *clima* tiene una influencia mayor que la variable, en el sentido de la probabilidad de introducir error en la estimación debido a la diferencia entre las condiciones locales y aquellas para las cuales el factor de emisión recomendado fue estimado. La justificación a lo anterior es que, por una parte, es posible suponer que el factor de emisión recomendado fue estimado como un promedio de los resultados encontrados para distintos tipos de suelo, los que son representativos de las condiciones promedio de los suelos de México a nivel nacional. Por otra parte, las condiciones climáticas de México, definidas por una combinación de factores climáticos, pueden diferir de manera importante de las consideradas para la estimación del factor de emisión

empleado y, por lo tanto, se estima que la variable *clima* puede ser una fuente significativa de error y la variable *tipo de suelo*, en comparación con la variable *clima*, no lo es.

Ya que efectivamente existe al menos una variable que puede ser distinta a la utilizada en la estimación del factor de emisión empleado, es ahora necesario analizar si es posible adaptar el factor a las condiciones de México. Como ya se mencionó, la variable *Clima* puede ser definida por una combinación de factores climáticos tales como la temperatura promedio, la humedad relativa del aire, la presión atmosférica, la velocidad del viento, la lluvia caída, etc. Sin embargo, entre todos estos factores, es la temperatura la que tiene una mayor influencia sobre la emisión al aire, o volatilización, de un compuesto como el paratión. Adicionalmente, se supone que la emisión de COV aumenta proporcionalmente con la temperatura (IPCC, 1998a), por lo tanto, se propone adaptar el factor de emisión empleado a las condiciones locales de México con la siguiente ecuación:

$$f_c \propto f\left(\frac{T^*}{T}\right)$$

donde,

$f_c$  = factor de emisión corregido o adaptado a las condiciones locales

$T^*$  = temperatura promedio a nivel local

$T$  = temperatura promedio empleada en la estimación del factor de emisión recomendado

$f$  = factor de emisión recomendado

Sin embargo, aunque la adaptación planteada podría mejorar la estimación de la emisión de paratión al aire, posiblemente incluye simplificaciones tales que no permiten estimar con precisión dicha emisión. Si así fuera, sería necesario determinar si la diferencia o error que introduce la variable *clima* a la aplicación del factor de emisión en México es significativa. Para esto, se establece un diseño de experimentación que permita evaluar si el factor de emisión empleado puede o no ser aplicado sin restricciones a las condiciones de México, a través de la aplicación de una prueba de análisis de variancia ANVA.

Considerando que la variable *clima* tiene una influencia alta y es la única variable que se está manejando, se recomienda el uso de un modelo completamente aleatorizado cuya variable de respuesta es el factor de emisión producto del muestreo en las condiciones locales y el factor de interés corresponde a la variable *clima*, definida ya sea por el factor climático que mayormente influya sobre la volatilización de paratión aplicado superficialmente, o por la combinación de factores climáticos que definen las distintas regiones climáticas del país. Sin embargo, queda fuera del alcance de este trabajo hacerlo.

## 5.2 Emisión de gases invernadero por ganado bovino

La experiencia internacional ha mostrado que las actividades pecuarias, en particular las que involucran ganado bovino, son generadoras de emisiones significativas de gases invernadero, especialmente de óxido nitroso y metano. Las actividades que involucran

estas emisiones son dos: fermentación entérica (emisión de metano) y manejo de residuos orgánicos de los animales (emisiones de metano y óxido nitroso). Por este motivo, es interesante la aplicación de la metodología planteada para la estimación de estas emisiones al aire.

El ejemplo se desarrollará para el estado de Querétaro, ya que fue en este estado donde se materializó en el año 1997, por iniciativa de UNITAR, la primera experiencia de PRTR en México.

### 5.2.1 Análisis de información

En la tabla 5.2 se muestra la información necesaria para realizar la estimación de estas emisiones al aire, y posteriormente se describe la forma en que se obtuvo esa información.

**Tabla 5.2 Información necesaria para la estimación de emisiones de gases invernadero por ganado vacuno**

Emisión	Información necesaria <sup>1</sup>	Variable	Unidades
Metano por fermentación entérica	Población animal promedio	$P_j$	cabezas
Metano por manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	Población animal promedio	$P_j$	cabezas
	Masa típica animal	$M_j$	kg
Óxido nitroso por manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)	Población animal promedio	$P_j$	cabezas
	Masa típica animal	$M_j$	kg

(1) La clasificación de la población requerida depende del método a emplear.

- **Población animal promedio:** existen dos fuentes de información para determinar esta variable:
  - *Anuarios estadísticos estatales* del INEGI, y
  - *Resultados definitivos, VII Censo Agrícola y Ganadero* (INEGI/SAGAR, 1994)

La primera corresponde a una publicación anual que incluye información acerca de la población bovina total de cada estado del país. La segunda es una publicación que se realiza cada 10 años (la última corresponde a 1994) e incluye información de la población bovina por estado, de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Por edad: 0-12 meses (B1), 12-36 meses (B2), hembras mayores de 36 meses (B3) y machos mayores de 36 meses (B4)
- Por destino de producción: vacas para producción de leche (B5), bovinos para producción de carne (B6) y bovinos (hembras) para ambos propósitos (B7).

Como puede verse, no se conoce la población bovina de cada tipo para cada año. Sin embargo, es razonable suponer que la proporción de cada tipo de bovino se mantiene relativamente constante en los períodos intercensos.

- **Masa típica animal:** en la publicación *Anuario estadístico de la producción pecuaria de los Estados Unidos Mexicanos* (CEA/SAGAR), aparece información acerca de la masa típica de los bovinos en cada estado del país. La información corresponde a un promedio global, es decir, no se cuenta con un desglose por tipo de vacuno.

## 5.2.2 Estimación de emisiones

### *Metano por fermentación entérica*

Debido a que la clasificación de la información de la población del ganado bovino con que se cuenta en México no corresponde a la requerida por el método de USEPA y el hecho de que los factores propuestos por el IPCC fueron estimados para América Latina, se utilizaran éstos últimos (sección 4.2.1.7). Para aplicar dichos factores, el IPCC requiere clasificar la población bovina en las siguientes categorías:

- vacas para producción de leche ( $P_1$ ), y
- bovinos para otros fines ( $P_2$ ),

Para ajustar la clasificación empleada en México a la requerida por el método de IPCC, se supondrá lo siguiente:

- la población destinada a doble propósito de producción ( $B7$ ) se divide en 50% para producción de leche y 50% para otros fines.
- la diferencia,  $B8$ , entre la población total ( $B1+B2+B3+B4$ ) y la destinada a producción ( $B5+B6+B7$ ), corresponde a una población destinada a otros fines.

Si  $P_T = (B1+B2+B3+B4)$  es la población bovina total que reporta el anuario, entonces, las proporciones aproximadas de la población bovina de acuerdo al último censo agropecuario y a la clasificación requerida por IPCC son:

$$P_1(\%) = [B5 + 0.5 B7] * 100 / P_T$$

$$y, P_2(\%) = [B6 + 0.5 B7 + B8] * 100 / P_T$$

Entonces, las poblaciones bovinas del año en el cual se quieren estimar las emisiones se calculan como:

$$P_1(\text{cabezas}) = P_1(\%) * P_T / 100$$

$$P_2(\text{cabezas}) = P_2(\%) * P_T / 100$$

En la tabla 5.3 se resumen los cálculos de estimación de la población bovina para el estado de Querétaro en el año 1997.

**Tabla 5.3 Población bovina en el estado de Querétaro**

Tipo de bovino	Población	
	(cabezas)	(%)
Clasificación por edad <sup>1</sup>		
- 0-12 meses (B1)	34,809	-
- 12-36 meses (B2)	56,646	-
- mayores que 36 meses (B3+B4)	118,308	-
Clasificación por destino de producción <sup>1</sup>		
- para leche (B5)	27,247	-
- para carne (B6)	35,731	-
- doble propósito (B7)	40,368	-
Diferencia (B8)	106,417	-
P <sub>1</sub> (%)	-	22.61
P <sub>2</sub> (%)	-	77.39
P <sub>T</sub> (cabezas) <sup>2</sup>	240,832	-
P <sub>1</sub> (cabezas)	54,452	-
P <sub>2</sub> (cabezas)	186,380	-

(1) Según censo de 1994

(2) Según anuario de 1997

De acuerdo con la ecuación (4.28) y a los factores de emisión recomendados por IPCC correspondientes, la emisión de metano por fermentación entérica del ganado bovino en el estado de Querétaro es:

$$\begin{aligned}
 E_{aM} &= P_1 * f_1 + P_2 * f_2 \\
 &= 54,452 * 57.0 + 186,380 * 49.0 \\
 &= 12,236,384 \text{ kg de metano emitidos al aire/año} \\
 E_{aM} &= 12,236.4 \text{ ton de metano emitidos al aire por} \\
 &\text{fermentación entérica del ganado bovino en el estado de} \\
 &\text{Querétaro/año}
 \end{aligned}$$

#### **Metano por manejo de residuos orgánicos de los animales**

Al igual que en el caso anterior, se aplicará el método recomendado por el IPCC (sección 4.2.1.8). La población clasificada como este método lo requiere ya fue calculada, por lo tanto, aplicando la ecuación (4.28) y los factores de emisión recomendados por IPCC correspondientes a clima templado, se obtiene la emisión de metano por manejo de residuos orgánicos de los animales en el estado de Querétaro:

$$\begin{aligned}
 E_{aM} &= P_1 * f_1 + P_2 * f_2 \\
 &= 54,452 * 1.0 + 186,380 * 1.0 \\
 &= 240,832 \text{ kg de metano emitidos al aire/año} \\
 E_{aM} &= 240.8 \text{ ton de metano emitidos al aire por manejo de} \\
 &\text{excretas del ganado bovino en el estado de} \\
 &\text{Querétaro/año}
 \end{aligned}$$

### ***Oxido nitroso por manejo de residuos orgánicos de los animales***

A continuación se estiman las emisiones directas de óxido nitroso y luego las indirectas por volatilización/depositación y por transporte en el agua superficial y subterránea (sección 4.2.1.8).

#### **a) Emisiones directas**

- **Excretas no manejadas**

- 1) Se calcula la cantidad de nitrógeno de las excretas depositada por los animales sobre el suelo. De la ecuación (4.31b), usando los valores recomendados por IPCC para América Latina (donde  $k$  = defecación directa sobre el suelo, tabla 4.10) y la población de bovinos calculada anteriormente, se tiene:

$$\begin{aligned}KN_a &= 0.8 * KN_a \\ &= 54,452 * 0.36 * 70 + 186,380 * 0.99 * 40 \\ KN_a &= 8,752,838 \text{ kg de nitrógeno excretado/año}\end{aligned}$$

- 2) De la ecuación (4.32) se calcula la cantidad de nitrógeno que no se volatiliza:

$$\begin{aligned}N_a^* &= P_1 * w_{1k} * K_{T1} + P_2 * w_{2k} * K_{T2} \\ &= 0.8 * 8,752,838 \\ N_a^* &= 7,002,270 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado/año}\end{aligned}$$

- 3) De la ecuación (4.33) se calcula la emisión directa de óxido nitroso por esta fuente.

$$\begin{aligned}Ea_{Na} &= 0.02 * N_a^* \\ &= 0.02 * 7,002,270 \\ &= 140,045 \text{ kg de óxido nitroso emitido al aire/año} \\ Ea_{Na} &= 140.0 \text{ ton de óxido nitroso emitido al aire /año}\end{aligned}$$

- **Excretas manejadas**

- 1) Se calcula la cantidad de nitrógeno Kjeldahl en las excretas manejadas por cada sistema usando la ecuación (4.34b). Como no se conoce para México el valor de  $w_{jk}$  (porcentaje de aplicación de cada sistema de manejo) se emplearán los valores recomendados por IPCC (ver tabla 4.10):

- Lagunas anaerobias:

$$KN_1 = P_1 * w_{11} * K_{T1} + P_2 * w_{21} * K_{T2}$$

$$= 54,452 * 0.00 * 70 + 186,380 * 0.00 * 40$$

$$KN_1 = 0.0 \text{ kg de nitrógeno excretado y manejado en lagunas anaerobias/año}$$

- Sistemas líquidos:

$$KN_2 = P_1 * w_{12} * K_{T1} + P_2 * w_{22} * K_{T2}$$

$$= 54,452 * 0.01 * 70 + 186,380 * 0.00 * 40$$

$$KN_2 = 38,116 \text{ kg de nitrógeno excretado y manejado en sistemas líquidos/año}$$

- Almacenamiento sólido y lechos de secado:

$$KN_3 = P_1 * w_{13} * K_{T1} + P_2 * w_{23} * K_{T2}$$

$$= 54,452 * 0.01 * 70 + 186,380 * 0.00 * 40$$

$$KN_3 = 38,116 \text{ kg de nitrógeno excretado y manejado como almacenamiento sólido y lechos de secado/año}$$

- Combustible:

$$KN_4 = P_1 * w_{14} * K_{T1} + P_2 * w_{24} * K_{T2}$$

$$= 54,452 * 0.00 * 70 + 186,380 * 0.00 * 40$$

$$KN_4 = 0.0 \text{ kg de nitrógeno excretado y usado como combustible/año}$$

- Esparcimiento diario:

$$KN_5 = P_1 * w_{15} * K_{T1} + P_2 * w_{25} * K_{T2}$$

$$= 54,452 * 0.62 * 70 + 186,380 * 0.00 * 40$$

$$KN_5 = 2,363,217 \text{ kg de nitrógeno excretado y manejado por esparcimiento diario/año}$$

- Otros sistemas:

$$KN_6 = P_1 * w_{16} * K_{T1} + P_2 * w_{26} * K_{T2}$$

$$= 54,452 * 0.00 * 70 + 186,380 * 0.01 * 40$$

$$KN_6 = 74,552 \text{ kg de nitrógeno excretado y manejado por otros sistemas/año}$$

2) De la ecuación (4.35) se estima la cantidad de nitrógeno que no se volatiliza para cada sistema de manejo:

- Lagunas anaerobias:

$$N_{m1} = 0.80 * KN_1$$

$$= 0.80 * 0.0$$

$$N_{m1} = 0.0 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado en lagunas anaerobias/año}$$

- Sistemas líquidos:

$$N_{m2} = 0.80 * KN_2$$

$$= 0.80 * 38,116$$

$$N_{m2} = 30,493 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado en sistemas líquidos/año}$$

- Almacenamiento sólido y lechos de secado:

$$N_{m3} = 0.80 * KN_3$$

$$= 0.80 * 38,116$$

$$N_{m3} = 30,493 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado en almacenamiento sólido y lechos de secado/año}$$

- Combustible:

$$N_{m4} = 0.80 * KN_4$$

$$= 0.80 * 0.0$$

$$N_{m4} = 0.0 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado en uso de combustible/año}$$

- Esparcimiento diario:

$$N_{m5} = 0.80 * KN_5$$

$$= 0.80 * 2,363,217$$

$$N_{m5} = 1,890,754 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado en esparcimiento diario/año}$$

- Otros sistemas:

$$N_{m6} = 0.80 * KN_6$$

$$= 0.80 * 74,552$$

$$N_{m6} = 59,642 \text{ kg de nitrógeno no volatilizado en otros sistemas/año}$$

3) Con la ecuación (4.36) se calcula la emisión de óxido nítrico de las excretas manejadas, aplicando los factores de emisión correspondientes a cada sistema de manejo.

$$Ea_{Nm} = N_{m1} * f_1 + N_{m2} * f_2 + N_{m3} * f_3 + N_{m4} * f_4 + N_{m5} * f_5 + N_{m6} * f_6$$

$$= 0.0 * 0.001 + 30,493 * 0.001 + 30,493 * 0.005 + 0.0 * 0.005 + 1,890,754 * 0.005 + 59,642 * 0.005$$

$$= 9,934 \text{ kg de óxido nítrico emitido al aire/año}$$

$$Ea_{Nm} = 9.9 \text{ ton de óxido nítrico emitido al aire/año}$$

Finalmente, la emisión total de óxido nítrico por manejo de excretas es:

$$\begin{aligned}
 Ea_N &= Ea_{Na} + Ea_{Nm} \\
 &= 140.0 + 9.9 \\
 Ea_N &= 149.9 \text{ ton de óxido nitroso emitido al aire por manejo} \\
 &\text{de excretas del ganado bovino en el estado de} \\
 &\text{Querétaro/año}
 \end{aligned}$$

**b) Emisiones indirectas por volatilización/depositación de nitrógeno**

- 1) De la ecuación (4.37) se calcula el nitrógeno total excretado por los animales. En este caso se incluirá las excretas usadas como fertilizante:

$$\begin{aligned}
 KN &= P_1 * K_{T1} + P_2 * K_{T2} \\
 &= 54,452 * 70 + 186,380 * 40 \\
 KN &= 11,266,840 \text{ kg de nitrógeno excretados/año}
 \end{aligned}$$

- 2) De la ecuación (4.39) se calcula el nitrógeno contenido en la excretas y que volatiliza:

$$\begin{aligned}
 N_{ev} &= 0.2 * KN \\
 &= 0.2 * 11,266,840 \\
 N_{ev} &= 2,253,368 \text{ kg de nitrógeno volatilizado/año}
 \end{aligned}$$

- 3) De la ecuación (4.40) se calcula la emisión de óxido nitroso debida a la volatilización/depositación de  $NH_3$  y  $NO_x$ :

$$\begin{aligned}
 Ea_N &= 0.01 * N_{ev} \\
 &= 0.01 * 2,253,368 \\
 &= 22,534 \text{ kg de óxido nitroso emitido al aire/año} \\
 Ea_N &= 22.5 \text{ ton de óxido nitroso emitido al aire por} \\
 &\text{volatilización/depositación de nitrógeno/año}
 \end{aligned}$$

**c) Emisiones indirectas por transporte de nitrógeno en el agua subterránea y por la escorrentía superficial**

- 1) De la ecuación (4.41) se estiman la cantidad de nitrógeno transportada en el agua, proveniente del manejo de residuos orgánicos de los animales:

$$\begin{aligned}
 N_{ow} &= 0.3 * KN \\
 &= 0.3 * 11,266,840 \\
 N_{ow} &= 3,380,052 \text{ kg de nitrógeno volatilizado/año}
 \end{aligned}$$

- 2) Estimar la emisión indirecta de óxido nitroso por transporte de nitrógeno en el agua:

$$\begin{aligned}
 E_{a_N} &= 0.025 * N_{ew} \\
 &= 0.025 * 3,380,052 \\
 &= 84,501 \text{ kg de óxido nitroso emitido al aire/año} \\
 E_{a_N} &= 84.5 \text{ ton de óxido nitroso emitido al aire por transporte} \\
 &\text{en el agua/año}
 \end{aligned}$$

### 5.2.3 Análisis de factores de emisión

En este ejemplo se utilizaron varios factores de emisión, los cuales se resumen en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Factores de emisión utilizados**

<b>Emisión</b>	<b>Unidades del factor de emisión</b>
Metano por fermentación entérica <sup>1</sup>	kg CH <sub>4</sub> emitido / cabeza / año
Metano por manejo de residuos orgánicos de los animales <sup>1</sup>	kg CH <sub>4</sub> emitido / cabeza / año
Emisiones directas de óxido nitroso por manejo de residuos orgánicos de los animales.	
• Excretas manejadas <sup>2</sup>	kg N <sub>2</sub> O-N / kg N excretado que no volatiliza
• Excretas no manejadas	kg N <sub>2</sub> O-N / kg N excretado que no volatiliza

(1) Se utilizaron dos factores de emisión, uno para vacas destinadas a producción de leche y otro para ganado bovino destinado a la producción de carne.

(2) De los seis factores de emisión recomendados para la estimación de esta emisión, se utilizaron sólo cuatro correspondientes a los siguientes sistemas de manejo de excretas: sistemas líquidos, almacenamiento sólido y lechos de secado, esparcimiento diario y otros sistemas.

De acuerdo a lo señalado en el capítulo 4, secciones 4.3 y 4.4, y siguiendo el esquema de proceso de análisis de un factor de emisión (figura 4.3) a continuación se analizan las variables que podrían ser fuente de error en la aplicación de los factores de emisión mencionados.

#### *Metano por fermentación entérica*

Las variables que podrían ser fuente de error en la aplicación de estos factores de emisión de acuerdo con la tabla 4.21, son:

- sistema de alimentación de los animales
- nivel de actividad física
- clima

Si se desea adaptar el factor de emisión recomendado a las condiciones locales, dicha adaptación debe reflejar la influencia de cada una de las tres variables que son posibles

causantes de error y la de sus posibles interacciones. Ya que existen tres variables que pueden ser distintas a las utilizadas en la estimación del factor de emisión empleado, es necesario diseñar una experimentación que permita determinar la función de adaptación del factor a través del control adecuado de las variables.

Ya que aquellos existen más de dos variables sospechosas de producir diferencias significativas y, además, no se tiene antecedentes necesarios para establecer la función de adaptación de manera directa y confiable, es necesario adoptar el camino alternativo, es decir, analizar si el error que introducen las variables a la aplicación del factor de emisión en México es significativa. Para esto, se establece un diseño de experimentación que permita evaluar si el factor de emisión empleado puede o no ser aplicado sin restricciones a las condiciones de México, a través de la aplicación de una prueba de análisis de la variancia (ANVA).

Considerando que en el capítulo 4, sección 4.4, se estableció que las variables *clima* y *sistema de alimentación de los animales* tienen una influencia alta y la variable *nivel de actividad física* tiene una influencia baja, se tiene el caso donde se recomienda no considerar en el diseño la variable con influencia baja, ya que existen dos variables que presentan una influencia alta respecto de la tercera variable y, por lo tanto, se plantean dos alternativas de diseño experimental:

- diseño factorial con dos factores de interés (*clima* y *sistema de alimentación de los animales*).
- diseño factorial bloqueado con dos factores de interés (*clima* y *sistema de alimentación de los animales*) y una variable de bloqueo (*nivel de actividad física*).

La realización de la experimentación planteada queda fuera del alcance de este trabajo.

#### ***Metano por manejo de residuos orgánicos de los animales***

El análisis es análogo al caso de los factores de emisión de metano por fermentación entérica, por lo tanto, se plantea también el uso de los dos diseños experimentales señalados anteriormente.

#### ***Emisiones directas de óxido nitroso por manejo de residuos orgánicos de los animales***

Las variables que podrían ser fuente de error en la aplicación de los factores de emisión recomendados para la estimación de óxido nitroso son:

- composición de las excretas
- temperatura del aire

Para determinar la diferencia o error que pueden introducir estas variables a la aplicación del factor de emisión en México, se establece un diseño de experimentación basado en una prueba de análisis de la variancia (ANVA). Considerando que en el capítulo 4, acápite 4.4, se estableció que la *temperatura del aire* tiene una influencia alta y la *composición de las*

*excretas* tiene una influencia media, se recomienda un diseño bloqueado, con un factor de interés (*temperatura del aire*) y una variable de bloqueo (*composición de las excretas*).

### **5.3 Conclusiones del desarrollo de los ejemplos**

A continuación se mencionan las conclusiones obtenidas después de desarrollar los dos ejemplos anteriores:

#### ***Emisiones de paratión metílico***

- La resolución espacial con que se puede obtener estimaciones de COVs en México está acotada por la información disponible; para la realización de este ejemplo, sólo se contó con información a nivel nacional.
- Lo anterior permite tener una estimación global de este tipo de emisión, sin embargo, es importante y conveniente realizar la estimación de las emisiones a nivel estatal y regional, para una mejor planificación y evaluación de las políticas ambientales.
- En el caso de la estimación de emisiones al agua y al suelo, es recomendable realizarlas a nivel de cuenca hidrográfica para tener la posibilidad de usar esta información en modelos de calidad, planes de descontaminación y manejo de cuencas.
- Para poder realizar estimaciones con una mayor resolución espacial, es necesario generar información confiable al nivel deseado.
- Otra manera de aumentar la confiabilidad de estas estimaciones es obtener datos precisos acerca de la formulación de los plaguicidas más usados en México y sus métodos de aplicación.
- Por otra parte, el uso de un factor de emisión estimado en condiciones climáticas y de prácticas de manejo agrícola no necesariamente similares a las de las condiciones promedio de México, pueden llevar a errores importantes en la estimación de emisiones de COVs.
- Dado lo anterior, es fundamental considerar la adaptación de los factores de emisión de COVs a la situación particular de México y, de esta manera, acercarse a los objetivos que persigue un registro de emisiones como el RETC.

#### ***Emisión de gases invernadero por ganado bovino***

- Como pudo verse en el desarrollo de este ejemplo, la mayor dificultad en el uso del método de estimación de estas emisiones fue la diferencia de las estadísticas de población de ganado bovino en el país respecto de las categorías requeridas por el método de estimación empleado.
- Al igual que en el primer ejemplo, la confiabilidad en la estimación de emisiones también puede mejorar al contar con datos precisos y clasificados de la manera más similar posible a los que el método requiere.
- Por este motivo, es importante coordinar la generación de la información estadística pecuaria de tal forma que sirva de manera más directa para la estimación de estas emisiones, evitando tanto como sea posible la necesidad de suposiciones y manipulación de los datos de población de ganado.

- Por otra parte, deben calibrarse los factores de emisión recomendados, ya que estos no son necesariamente representativos de las condiciones promedio en México, en general, y en el estado de Querétaro, en particular, ya sea por las condiciones climáticas, las prácticas de manejo ganaderas o por el tipo de animales.
- Así, si se pretende mejorar la estimación de estas emisiones, es fundamental considerar a futuro la adaptación de los factores de emisión realizando mediciones en campo y aplicando el diseño estadístico recomendado.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A continuación se señala las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio, de acuerdo al objetivo general y metas planteadas al inicio del mismo.

### ***Revisión de inventarios de emisiones y tendencias nacionales e internacionales***

- La experiencia internacional muestra la positiva y exitosa utilización de los registros de emisiones y transferencia de contaminantes, PRTR, como instrumentos de administración ambiental. Su aplicación cubre un amplio rango de posibilidades y objetivos.
- De acuerdo a los objetivos definidos para la utilización de un PRTR, éstos deben incluir: tipos de fuentes contaminantes, listado de sustancias contaminantes, cobertura espacial del registro, ciclo de reporte y de estimación para fuentes difusas, métodos para recopilar, medir y estimar emisiones, y políticas para manejo de la información del registro.
- Considerando la dimensión espacial, un PRTR debe incluir tanto fuentes puntuales como fuentes difusas. Dentro de esta gran clasificación es conveniente realizar una agrupación más fina y establecer una selección priorizada de las fuentes específicas que deben incluirse en el inventario.
- El desarrollo del registro de emisiones de México, RETC, se encuentra en su fase de implementación. Este registro ha incluido, ya en tres ciclos de reporte anual, las emisiones y transferencias de fuentes puntuales. No obstante, el gobierno ha definido las prioridades en cuanto a otros tipos de fuentes que deberán integrarse al RETC.

### ***Importancia del sector agrícola y ganadero***

- Dentro de las fuentes clasificadas como prioritarias, se encuentran algunas del tipo difuso y, en este grupo se encuentran incluidas, específicamente, las actividades de la agricultura.
- Las actividades de la agricultura emiten contaminantes, tanto al aire como al agua y suelo, que se encuentran incluidos dentro del listado de sustancias que considera el RETC.
- Las emisiones de la agricultura, como las de cualquier fuente difusa, son difíciles, si no imposibles, de medir. Por este motivo, es necesario definir los métodos indirectos de estimación de emisiones que son factibles de utilizar para este tipo de fuente y contaminantes.

- Para analizar las actividades de la agricultura, se debe aplicar un enfoque sistémico de tal manera que sea posible detectar, para cada una de estas actividades, los contaminantes emitidos y el medio receptor de éstos.
- De acuerdo al sistema definido, se plantean los métodos específicos de estimación de emisiones de la agricultura, basados en técnicas de estimación indirecta recomendados y utilizados a nivel internacional.

### ***Metodología de estimación***

- La selección del método específico de estimación de emisiones está siempre íntimamente ligada a los recursos disponibles para realizar dicha estimación y a la precisión que se quiere obtener.
- En el caso de la agricultura en México, todos los métodos específicos de estimación considerados incluyen el uso de factores de emisión.
- En México no se cuenta con factores para el cálculo de las emisiones generadas por la agricultura. Sin embargo, existen factores de emisión recomendados internacionalmente por haberse estimado en condiciones que cubren amplios rangos de las variables de aplicación de dichos factores.
- La aplicación de estos factores de emisión es atractiva ya que constituye un método simple y económico, pero la precisión de los resultados obtenidos depende de cuán parecidas sean las variables en las condiciones locales de las de desarrollo del factor de emisión, y de la calidad de la información necesaria para la estimación del nivel de actividad que multiplica este factor.
- De esta manera, los factores de emisión internacionales recomendados en este estudio necesitan ser validados a nivel local y/o nacional, con el fin de conocer y mejorar su confiabilidad.
- Dado que dicha validación conlleva un costo, es importante considerar una priorización acerca de qué factores es conveniente validar primero, dependiendo de la importancia relativa de las emisiones que se están estimando.
- Por otra parte, y como se comprobó en el desarrollo de los ejemplos del capítulo 5, los resultados de las estimaciones de emisiones dependen de manera importante de la calidad de la información existente para la aplicación de los métodos de estimación recomendados.
- Considerando que el RETC corresponde a un registro con un ciclo de reporte anual, otra dificultad importante en la estimación indirecta de emisiones de la agricultura es que gran parte de la información necesaria para la estimación de sus emisiones es generada con un desfase temporal de la difusión de dicha información.

## ***Recomendaciones***

- Se recomienda que el desfase temporal en la difusión de la información sea solucionado a través de un esfuerzo de coordinación y cooperación entre las autoridades encargadas del RETC y los entes generadores de la información de interés para la estimación de las emisiones de la agricultura.
- En general, no se cuenta con la información exacta y específica requerida por los métodos planteados siendo necesario adaptar los datos existentes a las necesidades del método. Por este motivo se recomienda realizar campañas para la obtención de la información requerida.
- La estimación de las emisiones de la agricultura, a través de la aplicación de los métodos específicos aquí planteados y otras variables recomendadas en la literatura internacional, constituye un punto de partida en este campo y, será necesario, destinar los recursos pertinentes para el constante mejoramiento de la confiabilidad y calidad de dichas estimaciones.
- Una vez realizada la estimación preliminar de las emisiones provenientes del sector agrícola y comprobada su contribución dentro del panorama nacional, se recomienda realizar un estudio de sensibilidad de los factores de emisión empleados a las variables que los afectan.
- Finalmente, dado el número de fuentes difusas a estimar dentro de los inventarios de contaminantes, se recomienda extrapolar la metodología planteada en este trabajo a otras fuentes.

## BIBLIOGRAFIA

Barnes J.W., *Statistical Analysis for Engineers and Scientists, A Computer-Based Approach*, McGraw-Hill Inc. (1994).

Berdowski J.J.M., Brouwer J.G.H., Draaijers G.P.H., Evers C.W.A, *EMISSION DATA FOR THE NETHERLANDS, 1995 and estimates for 1996. Publication Series Emission Inventory, Nr.42*, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of the Netherlands, Publicatiereeks Emissieregistratie (Diciembre de 1997).

Berdowski J.J.M., Draaijers G.P.H., Evers C.W.A., Bloos J.P.J., van der Brugh J.H.A.M, Coenen P.W.H.G., *EMISSION DATA FOR THE NETHERLANDS, 1996 and estimates for 1997. Publication Series Emission Inventory, Nr.45*, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of the Netherlands, Publicatiereeks Emissieregistratie (Agosto de 1998).

British Crop Protection & The Royal Society of Chemistry, *The Pesticide Manual*, Clive Tomlin Ed. (1994).

CCA, *Emisiones y Transferencia de Contaminantes en América del Norte*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal (1995).

CCA, *Putting the Pieces Together: the Status of Pollutant Release and Transfer Registers in North America*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal (1996).

Crutzen P.J., Aselmann I. and Seiler W., *Methane Production by Domestic Animals, Wild Ruminants, other Herbivorous Fauna and Humans*, Tellus 38B (1986).

CSWRCB, *Irrigated Agriculture*, California State Water Resources Control Board / California Environmental Protection Agency, California (1994a).

CSWRCB, *Report of the Technical Committee Advisory for Pesticide Management*, California State Water Resources Control Board / California Environmental Protection Agency, California (1994b).

CSWRCB, *Confined Animal TAC, Nonpoint Source Pollution Solutions: Watershed Approach*, California State Water Resources Control Board / California Environmental Protection Agency, California (1994c).

CSWRCB, *Report of the Technical Advisory Committee for Plant Nutrient Management*, California State Water Resources Control Board / California Environmental Protection Agency, California (1994d).

De Nevers N., *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*, McGraw Hill, México D.F. (1998).

Department of Pesticide Regulation and the State Water Resources Control Board, *California Pesticide Management Plan for Water Quality*, California Environmental Protection Agency, California (1997).

Evers C.W.A., van der Most P.F.J., *Estimating Environmental Releases from Diffuse Sources: A Guide to Methods*, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment of the Netherlands, Publicatiereeks Emissieregistratie (1998).

Haith D.A., *Environmental Systems Optimization*, John Wiley & Sons Inc. (1982).

Holzappel-Pschorn A., Conrad A.R., Seiler W. *Production, Oxidation and emission of methane in rice paddies*, FEMS Microbiology Ecology 31 (1985).

INE, *Programa para la Minimización y Manejo Integral de Residuos Industriales Peligrosos en México, 1996-2000*, Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1a. Ed, México D.F. (1996a).

INE, *Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes: Propuesta Ejecutiva Nacional*, Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1a. Ed. corregida, México D.F (1997).

INE, *Gestión Ambientalmente Racional de las Sustancias Químicas desde la Perspectiva de la Industria*, Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca 1a. Ed, México D.F. (1997a).

INE, *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente*, Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 15a. Ed, Porrúa, México D.F. (1998).

INE, *Instructivo de la Cédula de Operación Anual (COA), 1999-2000*, Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México D.F. (1999), (<http://www.ine.gob.mx/dggia/retc/coa/formato99.html>)

INEGI, *Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática / Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca INEGI, Aguascalientes (1998a).

INEGI, *Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, 1997*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes (1998b).

INEGI, *Estadísticas Demográficas y Socioeconómicas de México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes (1998c).

IPCC, *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Bracknell UK (1997).

Jury W.A. *et al*, *Behavior Assessment Models for Trace Organics in Soil: I. Model Description*, Journal of Environmental Quality 12(4) (1983).

Jury W.A. *et al*, *Behavior Assessment Models for Trace Organics in Soil: II. Chemical Classification and Parameter Sensitivity, III. Application of Screening Model*, Journal of Environmental Quality 13(4) (1984).

Midwest Research Institute, *Emission Factor Documentation for AP-42 Section 9.2.2 Pesticide Application*, Kansas City (1994).

Montgomery J., *Diseno Estadístico de Experimentos*, México D.F. (1996).

OECD, *Pollutant Release and Transfer Registers (PRTs): A Tool For environmental Policy and Sustainable Development. Guidance Manual for Governementes*, Organisation for Economic Co-Operation and Development Paris (1996) (OCDE/GD(96)32).

OECD, *Eco-Efficiency*, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris (1998).

ONU, *Agenda XXI*, Organización de Naciones Unidas (1992).

Safley L.M., Woobury J.W., Roos K.F., *Global methane emissions from livestock and poultry manure*, USEPA 400/1-91/048, Office of Air and Radiation, Washington D.C. (1992).

SAGAR, *Boletín mensual de la información básica del sector agropecuario y forestal*, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, México (1997).

Sass R.L., Fisher F.M., Harcombe P.A., Turner F.T. *Methane production and emission in a Texas rice field*, Global Biochemical Cycles 4 (1990).

SEMARNAP, *Lo que usted debe saber sobre los plaguicidas: Serie Plaguicidas No. 1*, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca / Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, México D.F. (1996).

UNITAR, *Implementación del Proyecto para el Diseño de un RETC Nacional: Documento Guía*, United Nations Institute for Training and Research (1997a).

USEPA, *Compilation of Air Pollutants Emission Factors AP-42, 5<sup>th</sup> Ed., Volume I: Stationary Point and Area Sources*, United States Environmental Protection Agency /

Clearinghouse for Inventories and Emission Factors (CHIEF) (1995)  
(<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42html#chapter>).

USEPA, *1997 Toxics Release Inventory and Right-to Know Conference – Proceedings*, United States Environmental Protection Agency, Kimberly Click Ed., Washington D.C. (1997).

USEPA, *1996 Toxics Release Inventory: Public Data Release Report*, United States Environmental Protection Agency / Office of Pollutant Prevention and Toxics, Washington D.C., (1998), (<http://www.epa.gov/opptintr/tri/pdr96/drhome.htm>).

USEPA, *Area Sources Documents, Vol. III y Vol. VIII*, United States Environmental Protection Agency / The Emission Inventory Improvement Program (EIIP), Washington D.C., (1998a), (<http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip.htm>).

Villarreal A., *Notas sobre diseño estadístico de experimentos*, DEPMI, UNAM (1991).

WHO, *Methyl Parathion, Health and Safety Guide N° 75*, World Health Organization (WHO) / IPCS International Programme of Chemical Safety, Health and Safety Guide, Geneva (1992).

### Lista de sustancias

Sustancia	Clave	Sustancia	Clave	Sustancia	Clave
Acenafteno	83-32-9	Clorodibromometano	124-48-1	Dióxido de azufre	7446-09-05
Acetaldehído	75-07-0	Cloroformo	67-66-3	Dióxido de cloro	10049-04-4
Acetamida	60-35-5	Clorometano	74-87-3	Dióxido de nitrógeno	10102-440
Ácido sulfúrico	7664-93-9	1 Cloro, 4 nitrobenzono	100-00-5	Disulfuro de Carbono	75-15-0
Acrilamida	79-06-1	Clorpirifos	2921-88-2	Endosulfán I	959-98-8
Acrlonitrilo	107-13-1	Cloruro de metileno	75-09-2	Endrin	72-20-8
Acroleína	107-02-8	Cloruro de vinilo	75-01-4	Epiclorhidrina	106-89-8
Aldrin	309-00-2	2,4 D (ácido 2,4 diclorofenoxiacético)	94-75-7	Estireno	100-42-5
Alfa-clorotolueno	100-44-7	DDT	50-29-3	Etanol	64-17-5
Alfa-hexaclorociclohexano	319-84-6	Diazinon	333-41-5	Etilbenzono	100-41-4
4 Aminobifenilo	92-67-1	1,2 Dibromo 3 cloropropano	96-12-8	Etilen tiourea	96-45-7
4 Aminoazobenceno	60-09-3	Dibromuro de etileno	106-93-4	Etilmetilcetona	78-93-3
Anilina	62-53-3	Dibutil ftalato	84-74-2	2 Etoxi-etanol	110-80-5
Aroclor 1016	12674-11-2	1,2 Diclorobenceno	95-50-1	Fenol	108-95-2
Aroclor 1242	53469-21-9	1,3 Diclorobenceno	541-73-1	Formaldehido	50-00-0
Aroclor 1260	11096-82-5	1,4 Diclorobenceno	106-46-7	Heptacloro	76-44-8
Asbesto	1332-21-4	3,3' Diclorobencidina	91-94-1	Heptacloro epóxido	1024-57-3
Benceno	71-43-2	1,4 Dicloro 2 buteno	764-41-0	Hexacloro-1,3 butadieno	87-68-3
Bencidina	92-87-5	1,2 Dicloro 3 buteno	760-23-6	Hexaclorobenceno	118-74-1
Bifenilo	92-52-4	1,2 Dicloroetano	107-06-2	Hexaclorociclopentadieno	77-47-4
Bióxido de carbono	124-38-9	1,1 Dicloroetileno	75-35-4	Hexacloroetano	67-72-1
Bis (2 cloro, 1 metil etil) éter	108-60-1	Diclorodifluorometano	75-71-8	Hexafluoruro de azufre	2551-62-4
Bis (clorometil) éter	542-88-1	2,4 Diclorofenol	120-83-2	Hidracina	302-01-2
Bis(2 cloroetil) éter	111-44-4	1,2 Dicloropropano	78-87-5	Isobutanol	78-83-1
Bis(2 etilhexil) ftalato	117-81-7	1,3 Dicloropropeno	542-75-6	Lindano	58-89-9
Boro	7440-42-8	Dieldrin	60-57-1	Malatión	121-75-5
1 Bromo, 2cloroetano	107-04-0	1,2 Difenilhidracina	122-66-7	Manganeso	7439-96-5
Bromodiclorometano	75-27-4	2,4 Dimetilfenol	105-67-9	M-Cresol	108-39-4
Bromoforno	75-25-2	2,6 Dimetilfenol	576-26-1	Metacrilato de metilo	80-62-6
Bromometano	74-83-9	Dimetil fenol (mezcla de isómeros)	1300-71-6	Metano	74-82-8
Bromuro de vinilo	593-60-2	2,4 Dinitrofenol	51-28-5	Metil mercurio	22967-92-6
1,3 Butadieno	106-99-0	2,4 Dinitrotolueno	121-14-2	4,4' Metilen bis (2 cloroanilina)	101-14-4
Butilencil ftalato	85-68-7	2,6 Dinitrotolueno	606-20-2	4,4' Metilen bis (n,n-dimetil) anilina	101-61-1
Captán	133-06-2	Dinitrotolueno (mezcla de isómeros)	25321-14-6	Metil-isobutil-cetona	108-10-1
Clordano	57-74-9	4,6 Dinitro-o-cresol	534-52-1	2 Metilpiridina	109-06-8
Clorobenceno	108-90-7	1,4 Dioxano	123-91-1		
Monóxido de carbono	630-08-0	Paratión	56-38-2	Tetraóxido de osmio	20816-12-0

Tabla 12. Lista de sustancias (continuación)

Sustancia	Clave	Sustancia	Clave	Sustancia	Clave
Naftaleno	91-20-3	Paratión metílico	298-00-0	Tiourea	62-56-6
2 Naftilamina	91-59-8	P-cresol	106-44-5	Tiram	137-26-8
N-dodecano	112-40-3	Pentaclorodibenzofurano	30402-15-4	2,4-Toluendiisocianato	584-84-9
Nitrobenceno	98-95-3	Pentaclorodibenzo-p-dioxina	36088-22-9	Toluen diisocianatos (mezcla de isómeros)	26471-62-5
4 Nitrobifenilo	92-93-3	Pentacloroetano	76-01-7	Tolueno	108-88-3
4 Nitrofenol	100-02-7	Pentaclorofenol	87-86-5	Toxafeno (cañeno clorado técnico)	8001-35-2
2 Nitropropano	79-46-9	Piridina	110-86-1	Tri-butil-estaño	688-73-3
N-nitrosodifenilamina	86-30-6	Quinoleína	91-22-5	1,2,4- Triclorobenceno	120-82-1
N-nitrosodimetilamina	62-75-9	Silvex (ácido 2,4,5-triclorofenoxipropiónico)	93-72-1	1,1,1-Tricloroetano	71-55-6
N-nitroso-di-n-propilamina	621-64-7	Sulfuro de hidrógeno	7783-06-4	1,1,2-Tricloroetano	79-00-5
4-Nitrosomorfolina	59-89-2	2,3,7,8 Tetracoloro dibenzo-p-dioxina	1746-01-6	Tricloroetileno	79-01-6
O-anisidina	90-04-0	2,3,7,8-Tetracoloro dibenzofurano	51207-31-9	2,4,5-Triclorofenol	95-95-4
O-cresol	95-48-7	1,1,1,2-Tetracoloroetano	630-20-6	2,4,6-Triclorofenol	88-06-2
Octacloroestireno	29082-74-4	1,1,2,2-Tetracoloroetano	79-34-5	Triclorofluorometano	75-69-4
O-fenilfenol	90-43-7	1,1,2,2-Tetracoloroetileno	127-18-4	Trifuralin	1582-09-8
Óxido de etileno	75-21-8	2,3,4,5-Tetracolorofenol	4901-51-3	1,2,4-Trimetilbenceno	95-63-6
Óxido de tributilestaño	56-35-9	2,3,4,6-Tetracolorofenol	58-90-2	Trióxido de azufre	7446-11-9
Óxido nítrico	10102-43-9	Tetracoloruro de carbono	56-23-5	Warfarina	81-81-2
Óxido nitroso	10024-97-2	Tetraetilo de plomo	78-00-2		
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) <sup>1</sup>	CHP01	Compuestos de cadmio (sales inorgánicas, respirables o solubles) <sup>3</sup>	CCM04	Compuestos de plata (sales inorgánicas solubles) <sup>3</sup>	CCM10
Nitro-hidrocarburos aromáticos policíclicos <sup>2</sup>	CHP02	Compuestos de cobalto (sales inorgánicas solubles) <sup>3</sup>	CCM05	Compuestos de plomo (en todas sus formas excepto la alquílica) <sup>3</sup>	CCM11
Hidrofluoro carbonos	CFC01	Compuestos de cobre (sales inorgánicas) <sup>3</sup>	CCM06	Compuestos de selenio <sup>3</sup>	CCM12
Perfluoro carbonos	CFC02	Compuestos de cromo <sup>3</sup>	CCM07	Compuestos de uranio <sup>3</sup>	CCM13
Compuestos de arsénico inorgánico <sup>3</sup>	CCM01	Compuestos de mercurio (inorgánico y elemental) <sup>3</sup>	CCM08	Compuestos de zinc (inorgánico, respirable, soluble) <sup>3</sup>	CCM14
Compuestos de bario <sup>3</sup>	CCM02	Compuestos de níquel (inorgánico, respirable o soluble) <sup>3</sup>	CCM09	Compuestos de cianuro <sup>4</sup>	COC01
Compuestos de berilio	CCM03				

FUENTE: Tabla 12 del Instructivo Cédula de Operación Anual (COA), 1999-2000, Instituto Nacional de Ecología (INE).

**Factor: *BIÓXIDO DE CARBONO POR USO DE CAL Y DOLOMITA PARA TRATAMIENTO DE ACIDEZ DEL SUELO***

**Valor y unidades:** 0.12 ton C/ton cal  
0.13 ton C/ton dolomita

**Fuente:** USEPA 1998

**Variables de las que depende:**

- Composición química de la cal y la dolomita
- Tipo de suelo

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:** generales

**Observaciones:** Ninguna

---

---

**Factor: *ÓXIDO NITROSO POR INCORPORACIÓN DIRECTA DE NITRÓGENO AL SUELO (RESPECTO DEL NITRÓGENO NO VOLATILIZADO)*<sup>1</sup>**

**Valor y unidades:** 0.0125 kg (N<sub>2</sub>O-N)/kg N

**Fuente:** IPCC 1997

**Variables de las que depende:**

La emisión de óxido nitroso por incorporación directa de nitrógeno al suelo depende de un amplio número de factores que afectan las tasas de nitrificación en el suelo, y cuya influencia aún no ha sido comprendida del todo, existiendo gran incertidumbre acerca de los efectos combinados de los factores. Estos factores son:

- Características del suelo: estas variables controlan y/o regulan la actividad microbológica del suelo y, por ende, la velocidad de las reacciones de nitrificación/denitrificación/emisión de N<sub>2</sub>O:
  - humedad
  - temperatura
  - disponibilidad de nitrógeno inorgánico

---

<sup>1</sup> Este factor es aplicable a las siguientes fuentes:

- Aplicación de fertilizantes comerciales
- Aplicación de excretas animales como fertilizantes
- Aplicación de otros orgánicos como fertilizantes
- Fijación biológica de nitrógeno por cultivos
- Residuos vegetales de la etapa de cosecha

- disponibilidad de carbono orgánico
- pH
- Clima
  - temperatura
- Prácticas agrícolas:
  - tipo de cultivo (granos, oleaginosas, cereales, etc), en el caso de fijación biológica de nitrógeno
  - forma de incorporación del nitrógeno al suelo (tipo de fuente: aplicación de fertilizantes, residuos vegetales productos de la etapa de cosecha y fijación biológica de nitrógeno en el suelo)

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:** la estimación de este factor de emisión se realizó con base en mediciones de campo en regiones templadas.

**Observaciones:**

Dada la amplia gama de combinaciones posibles de factores que influyen sobre la emisión de óxido nitroso, hasta ahora no ha sido posible la validación estadística de éste.

Como referencia, IPCC estima que este factor tiene un rango de variación entre 0.0025 y 0.0225 ((kg N<sub>2</sub>O-N/kg N).

**Factor: *ÓXIDO NITROSO DEBIDA A LA VOLATILIZACIÓN/DEPOSITACIÓN ATMOSFÉRICA DE NITRÓGENO***

**Valor y unidades:** 0.01 kg (N<sub>2</sub>O-N)/kg (NH<sub>3</sub>-N y NO<sub>x</sub>-N) volatilizados

**Fuente:** IPCC 1997

**Variables de las que depende:**

La emisión de óxido nitroso por depositación atmosférica de nitrógeno, al igual que la emisión de óxido nitroso por incorporación directa de nitrógeno al suelo, depende de un amplio número de factores que afectan las tasas de nitrificación en el suelo, y cuya influencia aún no ha sido comprendida del todo. Estos factores son:

- Características del suelo: estas variables controlan y/o regulan la actividad microbiológica del suelo y, por ende, la velocidad de las reacciones de denitrificación:
  - presencia de oxígeno
  - temperatura
  - concentración de nitratos
  - disponibilidad de carbono orgánico
  - pH

- **Clima:**
  - temperatura del aire

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:** generales

**Observaciones:**

El factor de emisión no ha sido aún validado estadísticamente.

---

---

**Factor:** *ÓXIDO NITROSO POR FUGAS DE NITRÓGENO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL*

**Valor y unidades:** 0.025 kg de (N<sub>2</sub>O-N)/kg N en el agua

**Fuente:** IPCC 1997

**Variables de las que depende:**

La emisión de óxido nitroso por depositación atmosférica de nitrógeno, al igual que la emisión de óxido nitroso por incorporación directa de nitrógeno al suelo, depende de un amplio número de factores que afectan las tasas de nitrificación en el suelo, y cuya influencia aún no ha sido comprendida del todo. Estos factores son:

- **Características del agua:** estas variables controlan y/o regulan la actividad microbiológica del suelo y, por ende, la velocidad de las reacciones de desnitrificación:
  - presencia de oxígeno
  - temperatura
  - concentración de nitratos
  - disponibilidad de carbono orgánico
  - pH
- **Clima:**
  - temperatura del aire

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:** generales

**Observaciones:**

El factor de emisión no ha sido aún validado estadísticamente. Sin embargo, se considera que el factor de emisión representa bien el fenómeno al nivel de comprensión científica actual.

---

---

**Factor:** *VOCs DE COMPONENTES ACTIVOS DE PLAGUICIDAS*

**Valor y unidades:**

Método de aplicación	Rango de presión de vapor mm Hg entre 20 y 25°C	f (1)
		kg/ton
Aplicación superficial	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$	350
	$> 1 \times 10^{-4}$	580
Incorporación en el suelo	$< 1 \times 10^{-6}$	2.7
	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$	21
	$> 1 \times 10^{-4}$	52

(1) Expresado como peso de ingrediente activo que se volatiliza por unidad de peso de ingrediente activo aplicado.

**Fuente:** USEPA 1998, basado en Jury *et al* 1983, Jury *et al* 1984 y el Midwest Reasearch Institute 1994.

**Variables de las que depende:**

- Clima
- Características del suelo: estas variables influyen en la capacidad de adsorción del suelo:
  - humedad
  - contenido de arcilla
  - contenido de materia orgánica

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:**

Se desarrollaron varios factores de emisión separados, primero, por método de aplicación del plaguicida (aplicación superficial o incorporación del plaguicida en el suelo) y, segundo, por rango de presión de vapor del ingrediente activo del plaguicida.

**Observaciones:** Ninguna

---

---

**Factor: METANO POR CULTIVO DE ARROZ EN CAMPOS INUNDADOS**

**Valor y unidades:**  $12 \leq f \text{ g/m}^2 \leq 28$

**Fuente:** IPCC, 1997

**Variables de las que depende:**

- Características del suelo
  - Contenido de carbono y otros nutrientes
  - Potencial Redox
  - Textura
  - Temperatura
- Tipo de arroz
- Prácticas agrícolas:
  - Manejo del agua (ciclos de inundación, profundidad, etc)
  - Uso de fertilizantes
- Clima
  - Temperatura del aire

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:**

En este caso, se propone el uso de un rango para el factor de emisión con el fin de calcular emisiones mínimas y máximas, utilizando los valores extremos del rango. El rango recomendado corresponde a aquel definido por la desviación estándar en torno a una media aritmética obtenida con valores recopilados por IPCC, medidos en diferentes lugares del mundo, incluyendo Asia, Australia, Europa y Estados Unidos. Como ejemplo, en el estado de Texas en Estados Unidos, el factor de emisión recomendado está en el rango de  $15 \leq f \text{ (g/m}^2) \leq 35$ . Los valores corresponden a una situación de campos continuamente inundados y en los que no se aplican fertilizantes orgánicos.

**Observaciones:**

La recomendación del uso de un rango para el factor de emisión deriva de que se han medido fluctuaciones temporales importantes en las emisiones de metano por esta fuente. Lo anterior se debe a que estas emisiones dependen de un gran número de factores (de los cuáles aquí se mencionan sólo los más importantes) que varían ampliamente tanto temporal como espacialmente. Así el uso de un rango para el factor de emisión resulta una manera más realista de realizar la estimación de la emisión.

En el caso de que las condiciones de los cultivos difieran de las señaladas anteriormente (campos continuamente inundados y sin aplicación de fertilizantes), será necesario realizar ciertas correcciones, multiplicando el factor de emisión utilizado por los valores que se señalan a continuación, de manera que el factor de emisión corregido  $f_c$  es igual a  $\alpha * f$ .

Condición del cultivo	$\alpha$
Campos inundados de forma intermitente	
• Aireación simple	0.5
• Aireación múltiple	0.2
Campos con incorporación de fertilizantes orgánicos	2.0

(1) Valores promedio

**Factor: ÓXIDO NITROSO Y METANO POR QUEMA DE RESIDUOS VEGETALES DE LA COSECHA**

**Valor y unidades:** 0.007 kg de N<sub>2</sub>O/kg N de la materia seca quemada  
0.005 kg de CH<sub>4</sub>/kg C emitido

**Fuente:** USEPA 1998

**Variables de las que dependen:**

- Tipo de cultivo del cuál se queman sus residuos
- Fase de la combustión

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:** generales

**Observaciones:**

Los factores de emisión se obtuvieron con mediciones de tasas de emisión para una amplia variedad de quemas agrícolas. En muchos casos, las tasas de emisión corresponden a promedios de toda la biomasa quemada.

**Factor: METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DE LOS ANIMALES**

**Valor y unidades:**

**Factores de emisión para ganado bovino**

Tipo de animal	<i>f<sub>i</sub></i> (kg CH <sub>4</sub> /cabeza/año)	
	IPCC	USEPA <sup>(1)</sup>
<i>Vacas para producción de leche</i>		
0-12 meses	57.0	19.6
12-24 meses		58.7
Vacas maduras		122.2
<i>Ganado para otros fines</i>		
0-12 meses	49.0	22.3
12-24 meses		64.9
Vacas maduras		66.5
Toros		99.8

(1) Promedio nacional en Estados Unidos

### Factores de emisión para otros animales

Tipo de animal	$f_j$ (kg CH <sub>4</sub> /cabeza/año)	
	IPCC	USEPA
Ovejas	5.0	8.0
Cabras	5.0	5.0
Cerdos	1.0	1.5
Caballos	18.0	18.0
Burros	10.0	22.0

Fuente: USEPA 1998 y IPCC 1997 para ganado bovino y Crutzen *et al* (1986) para otros animales.

#### Variables de las que depende:

- Tipo de animal (edad, peso, factores genéticos)
- Dieta de los animales
  - calidad / digestibilidad
  - cantidad
  - esquema de alimentación
- Nivel de actividad física
- Clima
  - temperatura
- Producción de leche (sólo para vacas destinadas a este fin)

#### Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:

Se desarrollaron varios factores de emisión separados por tipo de animal. En el caso del ganado bovino, se diferenciaron los animales según el tipo de producción al que están destinados (leche u otros fines) y a su edad y peso, debido a que son los mayores productores de metano.

La USEPA también desarrolló factores diferenciados por zona geográfica (este, central-norte, atlántico-norte y atlántico sur); los que aquí se presentan corresponden a valores promedio.

En la siguiente tabla se resumen las condiciones específicas para las cuales IPCC estimó sus factores de emisión.

**Observaciones:** Ninguna

### Condiciones consideradas por el IPCC para la estimación de los factores de emisión recomendados

Tipo de animal	Peso (kg)	Tasa de aumento de peso (kg/día)	Tipo de alimento	Producción de leche (kg/cab/año)	Horas de trabajo (hr/día)	% preñez	Digestibilidad del alimento (%)	Conversión de metano (%)	Cantidad de alimento consumido (Mj/cab/día)
Vacas para producción de leche	400	0.0	Pastizales	800	0	80	60	6	-
Bovinos para otros fines									
• 0-24 meses	230	0.3	Pastizales	NA	0	0	60	6	-
• Vacas maduras	400	0.0	Pastizales	NA	0	67	60	6	-
• Toros	450	0.0	Pastizales	NA	0	0	60	6	-
Otros animales									
Ovejas	-	-	-	-	-	-	-	6	13
Cabras	-	-	-	-	-	-	-	5	14
Caballos	-	-	-	-	-	-	-	2.5	110
Mulas y asnos	-	-	-	-	-	-	-	2.5	60
Cerdos	-	-	-	-	-	-	-	1.3	13

NA: no aplica

**Factor: METANO POR MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LOS ANIMALES (EXCRETAS)**

Valor y unidades:

**Factores de emisión de metano por manejo de residuos orgánicos de los animales (excretas)**

Tipo de animal	$f_i$ según clima (kg de metano/cabeza/año)		
	Frío	Templado	Cálido
<i>Ganado bovino</i> <sup>2</sup>			
Para producción de leche	0.0	1.0	2.0
Para otros fines	1.0	1.0	1.0
Cerdos			
	0.0	1.0	2.0
<i>Otros animales</i> <sup>3</sup>			
Ovejas	0.10	0.16	0.21
Cabras	0.11	0.17	0.22
Caballos	1.09	1.64	2.18
Mulas y asnos	0.60	0.90	1.19
Aves (pollos, patos y pavos)	0.012	0.018	0.023

- (1) El tipo de clima, en este caso, se define por la temperatura media de la región: Frío = menor que 15°C, Templado = entre 15 y 25 °C y Cálido = mayor a 25 °C. Las tasas de conversión de metano utilizadas para la estimación de los factores de emisión son de 1, 1.5 y 2 % para clima frío, templado y cálido, respectivamente.
- (2) Los factores de emisión corresponden a los recomendados por IPCC para América Latina. IPCC supone que casi todas las excretas son manejadas en forma sólida sobre los campos y establos.
- (3) Los factores de emisión corresponden a los recomendados por IPCC para países en vías de desarrollo

Fuente: IPCC, 1997

**Variables de las que depende:**

- Tipo de animal (edad, peso, factores genéticos)
- Dieta de los animales
  - calidad / digestibilidad
  - cantidad
  - esquema de alimentación
- Nivel de actividad física
- Clima
  - temperatura
- Tipo de sistema de manejo (sólidos o líquidos)

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:**

Se desarrollaron varios factores de emisión separados por tipo de animal y por rangos de temperatura (frío, templado y caluroso). Los factores de emisión propuestos corresponden a los desarrollados para América Latina y países en vías de desarrollo, de acuerdo a lo que se muestra en la siguiente tabla:

Observaciones: Ninguna

### Condiciones consideradas por el IPCC para la estimación de los factores de emisión recomendados

Tipo de animal	Peso (kg)	Digestibilidad del alimento (%)	Energía consumida (MJ/día)	Cantidad de alimento consumido (kg/día)	% población	Producción de excretas (kg/cab/día)	Prod. de Sólidos volátiles (kg/cab/día)	Bo (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)
<b>Ganado bovino</b>								
Vacas para producción de leche	400	60	145.9	7.9	100	3.16	2.91	0.13
<b>Bovinos para otros fines</b>								
• 0-24 meses	400	60	148.0	8.0	37	3.21	2.95	0.10
• Vacas maduras	450	60	144.0	7.8	5	3.12	2.87	0.10
• Toros	230	60	107.5	5.8	58	2.33	2.14	0.10
• Promedio	305	60	124.4	6.7	100	2.70	2.48	0.10
<b>Otros animales</b>								
Cerdos	28	50	13.0	0.7	100	0.35	0.34	0.29

(1) Condiciones para América Latina

(2) Condiciones para países en vías en desarrollo

---

---

**Factor: ÓXIDO NITROSO POR SISTEMAS DE MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LOS ANIMALES (EXCRETAS)**

**Valor y unidades:**

<b>Sistemas de manejo de excretas</b>	<b><math>f</math> (kg N<sub>2</sub>O-N/kg N)</b>
Lagunas anaerobias y sistemas líquidos	0.001 <sup>1</sup>
Almacenamiento sólido, secado u otro <sup>3</sup>	0.02 <sup>2</sup>

(1) Fuente: IPCC 1997

(2) Fuente: IPCC 1997, USEPA 1998

(3) Aunque IPCC 1997 recomienda  $f = 0.005$  Kg N<sub>2</sub>O-N/kg N para 'otros' sistemas, USEPA encontró inconsistencia con este valor y recomienda el uso del  $f$  para sistemas de almacenamiento sólido y en lotes de secado

**Fuente:** IPCC 1997 y USEPA 1998

**Variables de las que depende:**

- Composición de las excretas (contenido de nitrógeno)
- Características del sistema de manejo:
  - cantidad de oxígeno (aireación)
  - duración del ciclo de almacenamiento y tratamiento
- Clima
  - Temperatura del aire
- Tipo de animal

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:**

Se desarrollaron factores de emisión separados por tipo de sistema de manejo de las excretas.

**Observaciones:**

La información disponible para la estimación de los factores de emisión recomendados es limitada, por lo tanto, existe gran incertidumbre en cuanto a la precisión de éstos.

---

---

**Factor:** *ÓXIDO NITROSO POR INCORPORACIÓN DE NITRÓGENO AL SUELO MEDIANTE LA DEPOSITACIÓN DIRECTA DE LAS EXCRETAS DE LOS ANIMALES EN EL CAMPO, ESTABLOS Y CORRALES*

**Valor y unidades:** 0.02 kg (N<sub>2</sub>O-N)/kg N excretado

**Fuente:** IPCC 1997

**VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE:**

La emisión de óxido nitroso por la depositación directa de las excretas de los animales en el campo, establos y corrales depende de un amplio número de factores que afectan las tasas de nitrificación de las excretas, y cuya influencia aún no ha sido comprendida del todo pero que, en conjunto, controlan y/o regulan la actividad microbológica del suelo y, por ende, la velocidad de las reacciones de nitrificación/denitrificación/emisión de N<sub>2</sub>O. Estos factores son:

- Características de las excretas:
  - humedad
  - contenido de nitrógeno
  - contenido de carbono
  - pH
- Clima:
  - temperatura del aire
  - humedad

**Condiciones específicas para las cuáles fue desarrollado:** este factor se recomienda para todo el mundo y para todo tipo de animales; fue estimado con base en, principalmente, mediciones en regiones templadas y sistemas de ganadería intensiva.

**Observaciones:** el factor de emisión no ha sido aun validado estadísticamente. Sin embargo, se considera que el factor de emisión representa bien el fenómeno al nivel de comprensión científica actual.