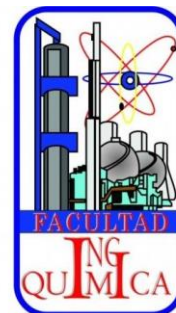




BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE METANO (CH₄) POR APLICACIÓN DE
ESTIÉRCOL BOVINO EN SUELOS PARA LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN
PUEBLA “**

TESINA

**Para obtener el grado de:
Licenciatura en Ingeniería Química**

Presenta:

BRENDA MÁRQUEZ OLALDE

Director de tesina:

Dr. José Adrián Saldaña Munive

Asesores de tesina:

M. A. María Margarita Victoria Romano Rodríguez

M. en I. Fernando Humberto del Valle Soto

SEPTIEMBRE 2024

A mi mejor amiga, Nala. Esta es la consumación de nuestras noches de desvelo.

A mi hermana, quien ha estado en mis días más negros y sin ella nadie estaría leyendo estas palabras.

A mí, por siempre seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad y capacidad de poder llegar hasta aquí, así como ponerme a las personas indicadas que me daban ánimos para no darme por vencida aun cuando quería rendirme.

A mi hermana por siempre haberme apoyado en lo profesional, económico y emocional.

Al Dr. Adrián Saldaña por haberme aguantado ya casi 10 años y siempre tener la disponibilidad y profesionalidad de ser mentor y amigo, gracias por todas las cátedras que, aunque era difícil por la diferencia de materias, siempre tuvo la paciencia de explicar paso a paso y transmitir de manera acertada todo el conocimiento.

Al Mtro. Fernando Del Valle y la Mtra. Margarita Romano por su tiempo y dedicación para hacer de este un mejor trabajo y por el apoyo y conocimiento que me brindaron a lo largo de la carrera.

A mis papás por su esfuerzo y dedicación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema	2
Justificación	2
Hipótesis	4
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	5
Estiércoles en la agricultura y su relación con la producción de CH ₄	5
Identificación del CH ₄ proveniente del suelo agrícola	5
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	7
Estimación de producción de metano (CH ₄) por aplicación de estiércol bovino en suelos para producción de maíz en Puebla	7
Determinación del tipo de orgánico y límites de estudio.....	7
Determinación de demanda de orgánicos en el suelo	10
Clasificación por tipo textural de suelo y estimado de CH ₄	12
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	20
REFERENCIAS	24
ANEXO 1	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Hectáreas sembradas con maíz en el estado de Puebla, año agrícola 2021.....	9
Tabla 2. Datos para cálculo de toneladas de CH ₄ generadas en 2021 en Puebla.....	9
Tabla 3. Estimado grueso de toneladas totales de estiércol aplicado y toneladas de CH ₄ generado con relación a la temperatura media por municipio siguiendo metodología de IPCC	11
Tabla 4. Tipo textural de suelo dominante por municipio, porcentaje de conversión a CH ₄ sugerido y estimación de CH ₄	14
Tabla 5. Factores de conversión a CH ₄ de acuerdo con temperatura y fracción dominante	19
Tabla 4. Tipo textural de suelo dominante por municipio, porcentaje de conversión a CH ₄ sugerido y estimación de CH ₄	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Municipios reportados como productores de maíz en 2021 clasificados por fracción dominante	15
Figura 2. Reacción bioquímica de producción de CH ₄	17
Figura 3. Hectáreas sembradas por tipo textural de suelo	21
Figura 4. Estimación de producción de CH ₄	22

ABREVIACIONES

°C	Grados Celsius
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
FAO	Food and Agriculture Organization
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg CO ₂ eq	Giga gramos de CO ₂ equivalente
INECOL	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
N	Nitrógeno
NCEI	National Centers for Environmental Information
P	Fósforo
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
USDA	United States Department of Agriculture

INTRODUCCIÓN

Se ha limitado el caso de estudio a la emisión de CH₄ en suelos agrícolas destinados al cultivo de maíz en los municipios del estado de Puebla; para su estimado se utilizó el método establecido por las directrices del IPCC en el volumen 4, capítulo 10, definido como “Método Nivel 1” y para mayor precisión se incluye temperatura y textura del suelo en el que se aplica el abono, para calcular el factor de conversión según la estructura del suelo y generar recomendaciones que eliminen las malas prácticas de aplicación del estiércol en suelos agrícolas y así disminuir la producción de este gas.

Adicional a las recomendaciones para reducir su producción, esta investigación tiene como objetivo la comparación entre el cálculo de emisión de CH₄ indicado por el IPCC, nivel 1 (debido a la falta de datos necesarios); y la estimación del mismo gas incluyendo factores específicos de la edafología y geografía de los suelos en donde se aplica el estiércol. Ya que, hasta la fecha no hay un método que se pueda aplicar fuera de condiciones ideales, así que la estimación de este trabajo es basada en parámetros determinados por otros investigadores.

Planteamiento del problema

La ganadería es un sector que produce miles de toneladas de estiércol al año. De acuerdo con el inventario nacional del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021), la producción anual nacional fue de 46,296,880 toneladas de estiércol, mientras que la estatal en Puebla fue de 3,143,070 toneladas; las cuales, en su mayoría fueron utilizadas para “mejorar” los suelos de uso agrícola, sin embargo, dentro de esta interacción suelo – materia orgánica existen ciertos factores que contribuyen con la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), especialmente intervienen la textura del suelo (arena, limo o arcilla) y su porosidad, que pueden propiciar condiciones anaerobias bajo las que se genera el gas metano (CH_4) como resultado final de su descomposición. Aunque este funciona como mejorador de suelo, también se comporta como un potencial contaminante, por lo que actualmente se habla de mejorar las prácticas de manejo y aplicación para reducir la producción del CH_4 . De los GEI generados, este es el más peligroso ya que tiene un potencial de calentamiento global de entre 28 y 34 veces mayor que el dióxido de carbono (CO_2) (UNECE, 2019). A pesar de que tiene un tiempo de residencia menor que el CO_2 , su volumen en la atmósfera se restaura constantemente lo que nos obliga a encontrar maneras de mitigarlo o reducir su producción en los sectores que nos sea posible, como en este caso el sector agrícola.

Justificación

De todos los tipos de estiércol, de acuerdo con datos del SIAP en 2021, el de bovino es el más utilizado por el sector agrícola debido a su gran volumen de producción. Su función principal ha sido la aplicación en suelos agrícolas sin importar las condiciones como temperatura o características del suelo, ni la producción de CH_4 que puede llegar a generar. Como bien se conoce, su principal beneficio es que mejora la estructura del suelo, incrementa el contenido de materia orgánica y por lo tanto la actividad microbiana pero no aporta nutrientes de forma significativa. Sin embargo, en México, el uso se basa en lo empírico y no en alguna referencia o base

tecnológica (Quiroga, Cueto y Figueroa, 2011). Debido a la falta de información científica o validada por parte del sector agropecuario, se ha adquirido la errónea idea de que los estiércoles pueden contribuir con la fertilidad del suelo, ocasionando su frecuente aplicación y, como consecuencia de esto, su descomposición en el suelo produce CH₄. De acuerdo con lo anterior y por su uso en el cultivo de maíz, en este trabajo se estimará un porcentaje de conversión del estiércol a CH₄ como referencia para aportar información al inventario estatal de producción de GEI ya que la metodología que marca el IPCC incluye parámetros que en México ni siquiera se tienen contemplados dentro de los censos agropecuarios, adicionalmente de que hasta la fecha las mediciones que se han llevado a cabo se enfocan en la dinámica de producción de CO₂, sin determinar gases que, aunque de menor producción como el CH₄, representan una amenaza para la atmósfera debido a su potencial de calentamiento global, y para lo cual es necesario proponer estrategias de mitigación en el sector agrícola.

Objetivos

a. General

- Estimar con datos de otras investigaciones la producción de CH₄ en suelos agrícolas que utilizan estiércol bovino como mejorador de suelo para la producción de maíz en Puebla.

b. Particulares

- Determinar la población de vacas lecheras para estimar la producción de estiércol.
- Determinar un factor de conversión de estiércol a CH₄ tomando en cuenta temperatura y edafología.
- Desarrollar una metodología alternativa para estimar la producción de CH₄
- Delimitar la superficie considerada como suelo de uso agrícola en donde se cultiva maíz y se abona con estiércol de vaca.
- Calcular la demanda de estiércol por hectárea y aplicar el factor de conversión determinado
- Señalar las condiciones bajo las cuales se genera más CH₄ en el suelo con base en su textura.

Hipótesis

La estimación de producción de CH₄ en suelos microporosos que retienen mayor humedad y favorecen la anaerobiosis será mayor comparada con la estimación de producción de CH₄ en suelos arenosos.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

Estiércoles en la agricultura y su relación con la producción de CH₄

A lo largo del tiempo, los estiércoles han ganado reconocimiento como mejoradores de suelo ya que, se ha demostrado que aportan gran cantidad de materia orgánica que da como resultado el incremento de actividad microbiana que colabora en la mejora de sus condiciones en general, debido a que, los microorganismos existentes en él participan en la fijación de nitrógeno a través de las raíces de las plantas, así como en la mineralización del carbono orgánico, tal como lo afirman Díaz, Acea y Carballas (1993) estos microorganismos conducen la biodegradación de materia orgánica constituyendo un reservorio lábil, aunque limitado de C, N y P. Otros beneficios de la aplicación de estiércol es que “mejora la estructura del suelo, reduce la erosión del mismo, tiene un efecto regulador en la temperatura y le ayuda a almacenar más humedad”. Además, la materia orgánica es un “alimento necesario para los organismos del suelo” (FAO, 2002).

Bogaard citado en Hergert, Nielsen y Margheim, 2015; indica que hay evidencia de que el uso de abonos de origen animal ha sido aplicado en la agricultura desde hace unos 8,000 años, aproximadamente. Los investigadores, concluyen que el uso de éstos comenzó debido a que los antiguos agricultores observaron una mejora en el suelo y mayor crecimiento de cultivos en áreas en donde se reunían los animales y se acumulaba de forma natural, así que comenzaron a utilizarlos como abonos. Fue hasta hace un par de décadas que se vincularon estas prácticas con la producción de gases de efecto invernadero. Además de la contaminación de mantos acuíferos y el arrastre de nutrientes por la filtración del orín.

Identificación del CH₄ proveniente del suelo agrícola

En el protocolo de Kioto en 1992 fue cuando se reconoció que el manejo del estiércol en el sector agrícola era una fuente de producción de GEI y fue hasta la

firma del protocolo de Gotemburgo en 1999, que se le dio más importancia ya que se señaló al CH₄ como precursor del ozono troposférico, fue entonces que se le dio significado relevante a nivel mundial. Derivado de los compromisos en el Protocolo de Kyoto, en 1995, el Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de Madrid, publicó un manual con prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente en donde señala que las acciones a tomar para mitigar la producción de GEI serían voluntarias por parte de los agricultores. Sin embargo, desde 1750 la producción de CH₄ se ha incrementado en un 151% y continúa en aumento (IPCC, 2001) sumado a ello, y de acuerdo con el departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), entre el 2000 y 2007 hubo un incremento de casi el 50% en los precios de los fertilizantes, aún en 2009 el incremento alcanzó el 62% arriba de los precios de la década anterior, situación que llevó a los agricultores a utilizar el estiércol como “abono”, lo cual incrementó a nivel mundial el porcentaje de emisión de CH₄ correspondiente al sector agrícola.

De acuerdo con Chen et al. (1997), las características del suelo sí contribuyen significativamente a la producción de CH₄ ya que se ha demostrado una fluctuación en la producción de este gas en estudios realizados en el Norte y Sur de China en donde la única diferencia es la estructura de los suelos, más porosos en el sur, en donde la emisión de CH₄ es menor.

En el 2000, se intentaron mediciones de producción de CH₄ en laboratorio, en donde se controlaban los parámetros atmosféricos pero la formación resultó inestable bajo incubación anaeróbica, había muchas fluctuaciones semanalmente, así que se concluyó que no bastaba con controlar los parámetros atmosféricos para predecir la producción, sino que también había de involucrar la diversidad de organismos en el suelo. Así como lo reconocen Panikov, Dedysh, Kolesnikov, Mardini y Sizova (2000), la carencia de información hace difícil el desarrollo de modelos para la estimación de la emisión, mínimamente se debe tomar en cuenta la presencia de poblaciones de bacterias metanotróficas y metanogénicas, las características del suelo y temperatura.

En Colombia Espinosa et al. (2014) realizaron una estimación de producción de CH₄ que arrojó como resultado una estrecha relación entre los flujos de CH₄, la porosidad del suelo y temperatura, confirmando parte de los hallazgos de Panikov et al. en el 2000, así como la carencia de información precisa para realizar simulaciones o modelos.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Estimación de producción de metano (CH₄) por aplicación de estiércol bovino en suelos para producción de maíz en Puebla

Determinación del tipo de orgánico y límites de estudio.

Para realizar una estimación del CH₄ producido por estiércol de bovinos confinados que se aplica en suelos de uso agrícola, y de acuerdo con Dong et al. (2006) se ha determinado que estiércol se refiere a los sólidos y líquidos producidos por el ganado, de igual manera se ha definido para esta investigación que la estimación considera la superficie de suelo destinada a la producción de maíz, y de acuerdo con reportes del SIAP (2021), está distribuida tan sólo en 50 de los 217 municipios del estado de Puebla, en los cuáles el orgánico es utilizado como mejorador de suelo. Los municipios contemplados en esta investigación se enlistan en la Tabla 1.

De acuerdo a la bibliografía (Jun, 1999), para la estimación de esta producción como resultado de la aplicación del estiércol en el suelo, existen tres metodologías nombradas como Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 de determinación de CH₄, sin embargo debido a la carencia de información (ingesta alimenticia diaria de los animales, excreción de sólidos volátiles, energía digestible del alimento, entre otros) y datos confiables requeridos para el desarrollo metodológico, es preciso utilizar únicamente la estimación más elemental, Nivel 1, que es el uso del porcentaje de

conversión de estiércol a CH₄, cuyo propósito es indicar la cantidad de CH₄ producido por el estiércol, tomando en cuenta la ubicación geográfica, su procedencia, modalidad de manejo y temperatura dónde se aplica, sin embargo, esta metodología no considera la interacción entre el suelo y la materia orgánica, por lo que se debe integrar un factor de corrección para éste Nivel que involucre las condiciones de suelo, como se explicará más adelante. Según lo establecido por el IPCC en su manual, para el caso del estado de Puebla, el valor correspondiente a este factor de conversión es de 1 para lugares con temperatura promedio anual de 10°C a 14.9°C y 1.5 para lugares con temperatura promedio anual de 15°C a 25°C, como es el caso de las regiones donde se aplica estiércol en suelos para producción de maíz.

Con base en datos registrados por el SIAP (2021), en ese año agrícola el total de hectáreas sembradas de maíz en el estado de Puebla fueron 7,715.42, cuya distribución por municipio se encuentra descrita en la Tabla 1.

	Municipio	Superficie Sembrada (ha)		Municipio	Superficie Sembrada (ha)
1	Acajete	166.8	26	San Andrés Cholula	11
2	Amozoc	145.8	27	San Felipe Teotlalcingo	19
3	Atlixco	225.12	28	San Gregorio Atzompa	306
4	Atoyatempan	145	29	San José Chiapa	233
5	Calpan	15	30	San Martín Texmelucan	53.7
6	Coronango	12	31	San Nicolás Buenos Aires	148
7	Cuautinchán	277.4	32	San Salvador El Seco	160
8	Cuautlancingo	7	33	San Salvador El Verde	293
9	Cuyoaco	670	34	Santa Isabel Cholula	35.15
10	Chalchicomula de Sesma	35	35	Santo Tomás Hueyotlipan	40
11	Chignahuapan	61	36	Soltepec	10
12	Domingo Arenas	449	37	Tecali de Herrera	118.5
13	General Felipe Ángeles	7	38	Tecamachalco	829
14	Huaquechula	171.4	39	Tepanco de López	29
15	Huejotzingo	473	40	Tepeaca	188.1
16	Huitziltepec	72	41	Tepeyahualco	133
17	Libres	380	42	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	64
18	Mazapiltepec de Juárez	105	43	Tetela de Ocampo	10
19	Nealtican	10	44	Tianguismanalco	19.6

20	Nopalucan	135	45	Tlachichuca	35
21	Ocoyucan	97.65	46	Tlahuapan	496
22	Oriental	385	47	Tlaltenango	11
23	Puebla	71.2	48	Tlanepantla	45
24	Quecholac	6	49	Tochimilco	88
25	Rafael Lara Grajales	14	50	Tochtepec	204

Tabla 1. Hectáreas sembradas con maíz en el estado de Puebla, año agrícola 2021

Por otro lado, de acuerdo con estudios realizados por el Instituto Nacional de Ecología (INECOL) en el 2021, el promedio de estiércol generado por una vaca lechera madura es de 12 boñigas al día de un peso aproximado de 4kg cada una. Con base en datos arrojados por el SIAP, en el 2021 el estado de Puebla tuvo un total de 727,915 cabezas de ganado bovino confinado cuyo estiércol generado, se estima que tiene, un potencial de producción de CH₄ de aproximadamente 127,530.71 toneladas durante el año. En la Tabla 2. se presentan de manera más detallada los datos utilizados para el cálculo. Es importante destacar que el factor de conversión asignado por el IPCC de acuerdo con las condiciones ambientales y tipo de estiércol es de 1.5 para todos los municipios de este estudio, del mismo modo, también cabe resaltar que esta estimación no toma en cuenta las características del suelo, sino únicamente el porcentaje de conversión del estiércol por sí mismo a CH₄, y el total de estiércol generado por las cabezas de ganado de vacas lecheras.

Boñigas al día	Días	Peso boñiga (kg)	Cabezas en total	Estiércol generado (kg/año)	Porcentaje de conversión según IPCC	CH₄ (ton/año)
12	365	4	727,915	12,753,070,800	0.015	191,296.062

Tabla 2. Datos para cálculo de toneladas de CH₄ generadas en 2021 en Puebla

Dado que se va a estimar el CH₄ que se produce tras la aplicación del abono en suelos destinados para siembra de maíz, otra directriz de esta investigación es la cantidad de estiércol demandada por una hectárea de maíz, cuyo valor es de 40 toneladas promedio, usualmente este es aplicado antes de la siembra, se cubre

toda la superficie con él y se espera unos días antes de proceder con algún tipo de laboreo.

Determinación de demanda de orgánicos en el suelo

En la Tabla 3 se enlista por municipio la cantidad de estiércol demandada por superficie destinada al cultivo de maíz. Además, se incluyen las toneladas de CH₄ que, de acuerdo con las investigaciones y la metodología del IPCC, se estima fueron generadas por su aplicación en el suelo, así como la temperatura promedio de los municipios que sirve como base para seleccionar el valor del factor de conversión adecuado, que como se ha mencionado corresponde a 1 y 1.5 según sea el rango de temperatura en la que se descompone el estiércol. Para determinar el factor adecuado se investigó la temperatura mínima y máxima promedio mensual para obtener la temperatura promedio anual en cada uno de los 55 municipios cuyo resultado fue un mínimo de 11.8 y un máximo de 20.5 (NCEI, 2022).

	Municipio	Superficie sembrada (ha)	T prom (°C)	Estiércol requerido (ton)	CH ₄ generado (ton)
1	Acajete	166.8	15.4	6,672	100.08
2	Amozoc	145.8	14.5	5,832	58.32
3	Atlixco	225.12	17.3	9,005	135.072
4	Atoyatempan	145.00	18.5	5,800	87
5	Calpan	15.00	13.4	600	6
6	Coronango	12.00	15	480	7.2
7	Cuautinchán	277.40	15	11,096	166.44
8	Cuautlancingo	7.00	15	280	4.2
9	Cuyoaco	670.00	17.9	26,800	402
10	Chalchicomula de Sesma	35.00	15.3	1,400	21
11	Chignahuapan	61.00	16.5	2,440	36.6
12	Domingo Arenas	449.00	15	17,960	269.4
13	General Felipe Ángeles	7.00	16	280	4.2
14	Huaquechula	171.40	20.5	6,856	102.84
15	Huejotzingo	473.00	15.9	18,920	283.8
16	Huitziltepec	72.00	17.5	2,880	43.2
17	Libres	380.00	14	15,200	152

18	Mazapiltepec de Juárez	105.00	13.9	4,200	42
19	Nealtican	10.00	15	400	6
20	Nopalucan	135.00	14.4	5,400	54
21	Ocoyucan	97.65	15.6	3,906	58.59
22	Oriental	385.00	14.25	15,400	154
23	Puebla	71.20	15	2,848	42.72
24	Quecholac	6.00	15.3	240	3.6
25	Rafael Lara Grajales	14.00	15.4	560	8.4
26	San Andrés Cholula	11	15.6	440	6.6
27	San Felipe Teotlalcingo	19	13.4	760	7.6
28	San Gregorio Atzompa	306	15.6	12,240	183.6
29	San José Chiapa	233	14.5	9,320	93.2
30	San Martín Texmelucan	53.7	14.5	2,148	21.48
31	San Nicolás Buenos Aires	148	13.9	5,920	59.2
32	San Salvador El Seco	160	13.8	6,400	64
33	San Salvador El Verde	293	13.8	11,720	117.2
34	Santa Isabel Cholula	35.15	15.6	1,406	21.09
35	Santo Tomás Hueyotlipan	40	16.6	1,600	24
36	Soltepec	10	13.8	400	4
37	Tecali de Herrera	118.5	16.2	4,740	71.1
38	Tecamachalco	829	16.3	33,160	497.4
39	Tepanco de López	29	17.2	1,160	17.4
40	Tepeaca	188.1	15.5	7,524	112.86
41	Tepeyahualco	133	15	5,320	79.8
42	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	64	17.2	2,560	38.4
43	Tetela de Ocampo	10	15.5	400	6
44	Tianguismanalco	19.6	16.2	784	11.76
45	Tlachichuca	35	11.8	1,400	14
46	Tlahuapan	496	12.25	19,840	198.4
47	Tlaltenango	11	15	440	6.6
48	Tlanepantla	45	16	1,800	27
49	Tochimilco	88	16.1	3,520	52.8
50	Tochtepec	204	17	8,160	122.4
TOTAL		7,715.42		308,616.80	4,106.55

Tabla 3. Estimado grueso de toneladas totales de estiércol aplicado y toneladas de CH₄ generado con relación a la temperatura media por municipio siguiendo metodología de IPCC

Si bien es importante tomar en cuenta la temperatura y cantidades utilizadas de estiércol, para tener una estimación más precisa, es imprescindible conocer las características del suelo en donde este es aplicado. Así como lo señala la FAO

(2002), las propiedades físicas del suelo (textura, estructura, capacidad de drenaje y aeración) dependen directamente del tamaño de las partículas minerales, es decir, un suelo arenoso está conformado por gránulos más grandes, es más fácil su manipulación y tienen bastante aeración, sin embargo, su capacidad de retención de agua es menor, lo cual disminuye la cantidad de nutrientes que contiene. Un suelo limoso está conformado por gránulos de tamaño intermedio, lo cual disminuye la aireación e incrementa la retención de agua. Finalmente están los suelos arcillosos que son aquellos formados por las partículas más pequeñas, con una alta capacidad de retención de agua y poca aireación debido a la reducción de porosidad.

Es de esperarse que en los suelos donde la fracción arcilla predomina se produzca más CH_4 debido a la falta de oxígeno y que las condiciones anaerobias propician la generación de este gas de efecto invernadero. De lo contrario, en los suelos arenosos, será donde su producción esté limitada por la cantidad de oxígeno presente. Con base en Badía (2021) y Vivanco et al. (2010), se han ordenado los suelos de los menos a los más arcillosos: arenosol, cambisol, durisol, fluvisol, gipisol, leptosol, regosol, solonchak, calcisol, chernozem, kastañozem umbrisol, acrisol, andosol, luvisol, nitisol, phaeozem y vertisol, siendo los últimos 6 los que contribuyen más con la generación de CH_4 debido a su textura, también se han clasificado según su fracción dominante (arena, limo y arcilla).

Clasificación por tipo textural de suelo y estimado de CH_4

De acuerdo con el Gobierno de Queensland (2013) la textura del suelo se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla que forman la fracción mineral del suelo que involucra los factores más importantes para la generación de CH_4 , entre los cuales se encuentran la porosidad y capacidad de retención de agua que son los que determinan el flujo limitado de aire en el suelo. Así como lo indica Rossi (2020) las partículas de arena miden de 0.05 a 2 mm, el tamaño de las partículas de limo oscila entre 0.002 mm y 0.05 mm, el tamaño de las partículas de arcilla es menor a 0.002 mm. La capacidad de retención de agua depende directamente del

tamaño de partícula, en suelos arenosos es muy baja y en suelos arcillosos es muy alta. La porosidad está estrechamente relacionada con el tamaño de partícula, al tener partículas más grandes existe mayor espacio entre ellas, lo cual permite la aireación del suelo, como lo menciona Ungurasu y Ungureanu (2011), el término se refiere a la cantidad de aire que pasa a través del suelo hacia la atmósfera, es importante destacar que la composición del aire en la atmósfera y en el suelo son distintas. El aire atmosférico contiene 20.87% de oxígeno mientras que el aire en el suelo sólo tiene 11.5% de oxígeno. Una parte importante del proceso de conversión a CH₄ es la ausencia de oxígeno ya que, las protagonistas de tal conversión son las bacterias metanogénicas, que en este caso son las bacterias hidrogenotróficas que utilizan el H₂ y CO₂ para la formación de CH₄; por otro lado, también están las bacterias acetoclásticas que utilizan el ácido acético, metanol y algunas aminos presentes en el suelo para la producción de CH₄ (Instituto Internacional de Recursos Renovables, 2014). En un suelo arenoso, encontramos partículas grandes que retienen poca agua, con poros más grandes que permiten el flujo de aire, de modo que limitan las condiciones anaerobias para la producción de este gas, contrario a lo que sucede con suelos arcillosos que tienen poros más pequeños, retienen mayor cantidad de agua, se reduce la presencia de oxígeno y se favorecen condiciones anaerobias para su producción.

Con base en las cartas edafológicas del INEGI (2013) que indican las proporciones de la fracción mineral predominante en el suelo, se han elaborado la Tabla 4 y la Figura 1, las cuales muestran textual y gráficamente el tipo textural de suelo dominante. La información edafológica contempla los primeros 30 cm que usualmente son los afectados por la labranza convencional y donde se llevan a cabo las reacciones físicas y químicas que afectan el proceso de metanogénesis. En la siguiente tabla, se enlistan sólo los municipios identificados como suelos arcillosos que son los que mayor aportan a la emisión de CH₄, así como porcentaje de conversión de estiércol a CH₄, la dinámica de difusión del gas, y la reacción reversible entre CH₄ y CO₂. La Tabla 4 completa que describe todos los municipios involucrados se encuentra en el Anexo 1.

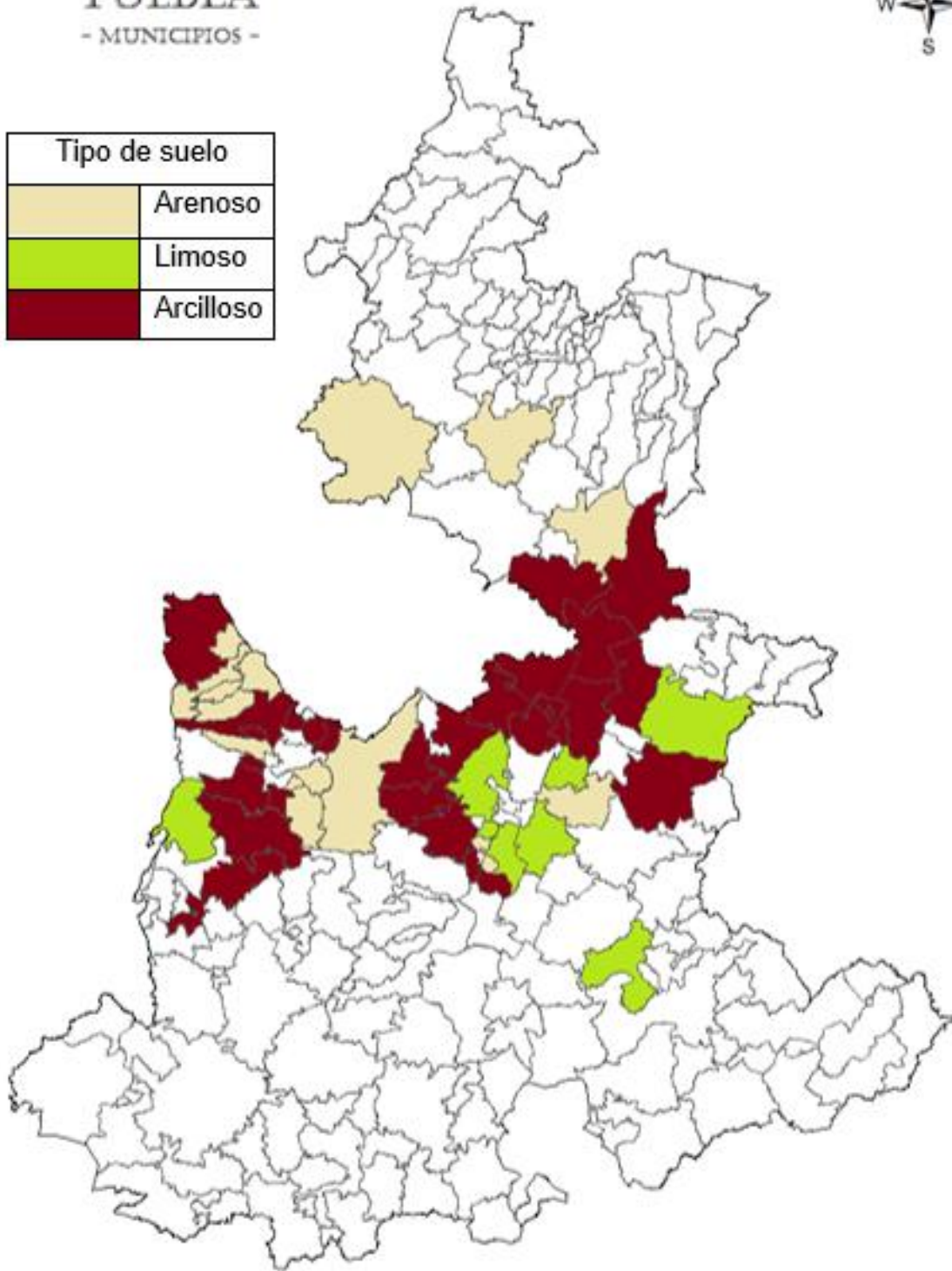
	Municipio	Tipo de suelo	Factor sug.	Estimado CH ₄ (ton)		Municipio	Tipo de suelo	Factor sug.	Estimado CH ₄ (ton)
5	Calpan	arcilloso	0.9	5.4	27	San Felipe Teotlalcingo	arcilloso	0.9	6.8
9	Cuyoaco	arcilloso	1.35	361.8	28	San Gregorio Atzompa	arcilloso	1.35	165.2
11	Chignahuapan	arcilloso	1.35	32.9	30	San Martín Texmelucan	arcilloso	0.9	19.3
21	Ocoyucan	arcilloso	1.35	52.7	33	San Salvador El Verde	arcilloso	0.9	105.5
23	Puebla	arcilloso	1.35	38.5	42	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	arcilloso	1.35	34.6
24	Quecholac	arcilloso	1.35	3.2	43	Tetela de Ocampo	arcilloso	1.35	5.4
26	San Andrés Cholula	arcilloso	1.35	5.9	48	Tlanepantla	arcilloso	1.35	24.3

Tabla 4. Tipo textural de suelo dominante por municipio, porcentaje de conversión a CH₄ sugerido y estimación de CH₄

PUEBLA
- MUNICIPIOS -



Tipo de suelo	
	Arenoso
	Limoso
	Arcilloso



0 10 20 40 KM

Fuente: INEGI

Figura 1. Municipios reportados como productores de maíz en 2021 clasificados por fracción dominante

Para la determinación del porcentaje de conversión a CH_4 , se tomaron en cuenta: la temperatura, textura del suelo, porosidad, capacidad de retención de agua y los reportes de varios estudios correspondientes al análisis de generación de CH_4 en condiciones similares a las contempladas en esta investigación, así como los factores generales establecidos por el IPCC. En condiciones oxidantes, el resultado final de la descomposición de materia orgánica sería CO_2 , sin embargo, derivado de la alteración de los ya mencionados factores en la estructura del suelo debido a la incorrecta aplicación de materia orgánica y agua; se obstruyen los poros que generan la ausencia de oxígeno y propician las condiciones anaerobias para que por medio de comunidades microbianas fermentativas la materia orgánica sea convertida en pequeños ácidos orgánicos, alcoholes, aminas metiladas e hidrógeno.

En el caso de suelos arcillosos, como los describe la FAO son aquellos que poseen mayor capacidad de retención de agua, en donde el agua presente hace aún más pequeños los poros, y se crea un ambiente sumamente reducido que, a falta de receptores potenciales de electrones como nitratos o sulfatos, estos ácidos, alcoholes y aminas pueden ser convertidos en CH_4 . Por otra parte, se encuentran las bacterias metanogénicas que, favorecidas por la estructura del suelo y temperaturas templadas o cálidas, siempre están presentes y se encargan de reducir el CO_2 (o cualquier otro átomo oxidado de carbono) dando paso a la producción de CH_4 . Además de las bacterias metanogénicas se encuentran las bacterias metanotróficas que utilizan el CH_4 como alimento, lo oxidan y convierten en CO_2 , la reacción se muestra en la Figura 2. En suelos arcillosos la producción de CH_4 se incrementa y en suelos arenosos no es tan significativa debido a la cantidad de oxígeno presente derivado del tamaño de partícula y capacidad de retención de agua.

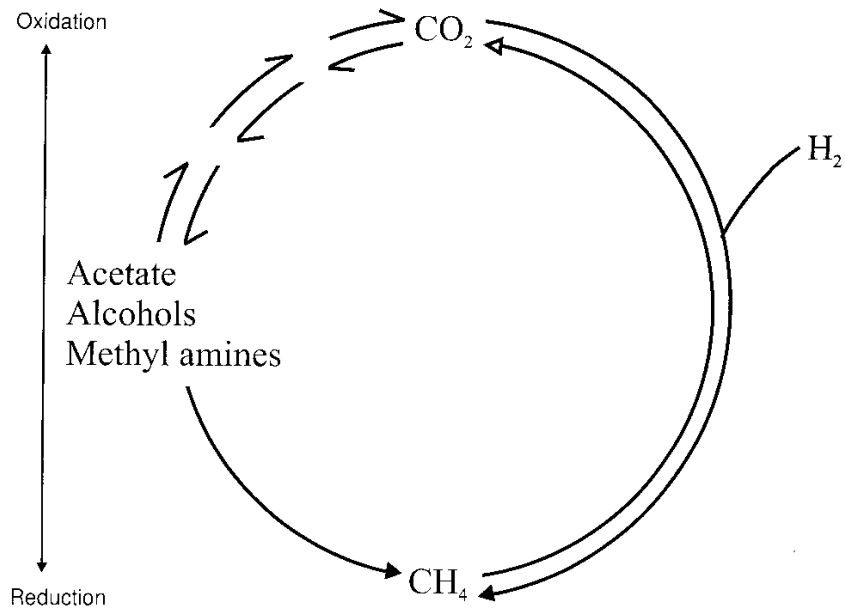


Figura 2. Reacción bioquímica de producción de CH₄

El suelo que más CH₄ puede generar debido a su textura, es el arcilloso. Topp y Pattey demostraron que debido a la fracción dominante y la población de bacterias metanotróficas y metanogénicas hay una pérdida del 10% en la cantidad de CH₄ que se puede liberar a la atmósfera, tomando como referencia el factor de 1 que propone el IPCC, se tiene que el factor real de conversión es 0.9 para rangos de temperatura entre 10°C y 14.9°C y 1.35 para temperaturas entre 15°C y 25°C en el caso de los suelos arcillosos. También reportan que un suelo mayormente limoso, debido al balance entre población metanogénica y metanotrófica, produce la mitad de un suelo arcilloso, lo que me lleva a proponer un factor de conversión para fracciones limosas de 0.45 y 0.67 dependiendo la temperatura media. Finalmente, es un hecho que en los suelos arenosos predomina la población de bacterias metanotróficas y, aunque en menor proporción, siguen existiendo las bacterias metanogénicas. La emisión de CH₄ significativa ocurre cuando las bacterias metanogénicas están en mayor proporción que las bacterias metanotróficas; para los suelos con estas condiciones, los mismos autores reportaron una baja del 80% del flujo de CH₄ con respecto a lo producido por una fracción arcillosa dominante,

por lo cual propongo un factor de 0.18 y 0.27 dependiendo el rango de temperatura de aplicación.

Siguiendo la misma metodología para los datos mostrados en la Tabla 3, y contemplando las condiciones de interacción materia orgánica – suelo que guían al ajuste del factor de conversión a CH₄, se ha estimado que las mismas 7,715.42 hectáreas de maíz sembradas producen un total de 1,657.4 toneladas de CH₄, existe un porcentaje de error del 59% entre la estimación gruesa realizada con la metodología del IPCC y la estimación teórica tomando en cuenta los ya mencionados factores relacionados con el suelo y su ubicación geográfica. Es por ello por lo que no se puede realizar una estimación de producción del gas con solamente las directrices del IPCC, ya que en México únicamente contamos con datos suficientes para el Nivel 1 de los 3 Niveles que podrán utilizarse. Sin embargo, sí pueden tomarse como referencia los factores que involucran y también añadir factores propios del suelo y de la interacción suelo materia orgánica para tener un resultado con mayor precisión. Otra manera de comprobar el error es, realizar la estimación gruesa con el Nivel 1 del IPCC, utilizar los factores de conversión aquí propuestos y realizar mediciones en campo, una vez recopiladas las mediciones bajo las mismas características de la fracción de suelo dominante, temperaturas promedio y mismo tipo de estiércol, verificar el porcentaje de error entre las primeras dos IPCC vs Factor de conversión propuesto, posteriormente obtener el porcentaje de error entre IPCC y mediciones en campo, si el valor obtenido es aproximado al valor del porcentaje ya antes mencionado, se podría inferir que basta con realizar la estimación Nivel 1 con las directrices del IPCC y descontar el 59% para obtener la estimación más precisa, entonces el porcentaje de error pasaría a ser un factor de corrección.

En resumen, los factores de conversión a CH₄ correspondientes al rango de temperatura y fracción dominante se muestran en la Tabla 5.

T °C	Arena	Limo	Arcilla
10-14.9	0.18	0.45	0.9
15-25	0.27	0.67	1.35

Tabla 5. Factores de conversión a CH₄ de acuerdo con temperatura y fracción dominante

Para comprender cómo es que ese CH₄ contribuye al calentamiento global, es importante tomar en cuenta la ley de Fick que establece que todos los gases se mueven, por difusión, de un gradiente de concentración menor a uno mayor, por lo que es de esperarse que el CH₄ producido a cierta profundidad del suelo obedezca dicha ley y viaje por difusión, pasando a través de los poros, hacia la intemperie en donde antes de salir a la atmósfera entra en contacto con bacterias metanotróficas que lo oxidan nuevamente, sin embargo, debido a la capa de estiércol aplicado en los suelos, esta segunda conversión se ve desfavorecida ya que el estiércol es materia orgánica que también contiene bacterias metanogénicas, líquidos y reduce la porosidad. Por una parte, los suelos incrementan sus condiciones anaerobias debido a la falta de oxígeno derivada de la obstrucción de los poros, ya que el líquido proveniente del estiércol se infiltra en el suelo, satura los poros y causa que la población de bacterias metanogénicas predomine sobre la de bacterias metanotróficas principalmente por la modificación de estructura del suelo por aplicación del estiércol y por otra parte, el hecho de añadir el estiércol da como resultado que los poros incrementen su tamaño haciendo que con el paso de los días, el CH₄ generado y acumulado en capas inferiores viaje por difusión a la atmósfera, buscando un gradiente de concentración menor y además es liberado por las prácticas de laboreo que deberían evitarse.

En condiciones normales se esperaría que suelos arenosos no sean una fuente significativa de CH₄, sin embargo, ya que el estiércol contiene líquidos, los poros del suelo retienen cierta cantidad de agua y, sumado a la arcilla que se mantiene en el suelo se da lugar a condiciones anaerobias para la formación de colonias de bacterias metanogénicas, que contribuyen a la formación del gas que por difusión, fluye hacia donde el gradiente de concentración de CH₄ es menor, abriéndose paso hacia la atmósfera en donde se convierte en una amenaza porque

éste gas de efecto invernadero tiene un potencial de calentamiento global de entre 28 y 34 veces mayor que el dióxido de carbono (CO₂) (UNECE, 2019) debido a que es capaz de absorber la energía en forma de luz infrarroja y no le permite salir de la atmósfera sino que la vuelve a irradiar dentro de ella. De acuerdo con las estimaciones del IPCC, así como de los ajustes estimados según las características geográficas y físicas de los suelos, se ha determinado que, tras la aplicación de estiércol en el suelo, todos los suelos son potenciales productores de CH₄, siendo los suelos arenosos los que menos contribuyen con la producción de este gas de efecto invernadero, en total, tenemos como resultado que hubieron unas 1,933.86 toneladas de CH₄ producidas en el año agrícola 2021 que provienen del cultivo de maíz en el estado de Puebla.

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tras haber incluido y analizado los principales factores que influyen en la producción del CH₄ en la interacción estiércol-suelo, se ha determinado que un suelo arcilloso siempre va a producir mayor cantidad del gas que un suelo arenoso o limoso, la producción será sumamente favorecida cuando las temperaturas son mayores a los 15°C.

De acuerdo con los datos analizados, así como con los mapas edafológicos correspondientes a los municipios registrados como productores de maíz en el año agrícola 2021, se generó la Tabla 5 ya antes presentada. Sumado a esto también nuestro la clasificación por municipios en donde fácilmente se pueden ubicar los municipios donde debe evitarse la aplicación de estiércol, estos son: Calpan, Cuyoaco, Chignahuapan, Ocoyucan, Puebla, Quecholac, San Andrés Cholula, San Felipe Teotlalcingo, San Gregorio Atzompa, San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde, Tepeyahualco de Cuauhtémoc, Tetela de Ocampo y Tlalnepantla.

Con los factores correctos involucrados y analizados se pudo obtener como estimación que en el año agrícola 2021 la producción de CH₄ fue de unas 1,654.6

ton y no 4,106,55 ton como lo marca el estimado grueso del IPCC. Tales toneladas son equivalentes a 41.4 Gg CO₂ eq, aportando un 0.34% a las emisiones totales nacionales por gestión de estiércol bovino tan sólo por aplicación en las 7,715.42 ha .

Del estimado grueso que se ha calculado de la producción de CH₄ por el tipo de ganado que generalmente se utiliza para la aplicación de estiércol (vaca lechera), sólo el 2.15% le correspondería al sector agrícola, lo anterior tomando en cuenta las directrices del IPCC. Ahora bien, tras contemplar los factores del suelo que afectan la producción del gas, del total del estimado obtenido el 52% lo producen los suelos arcillosos, cuyo total de hectáreas sembradas corresponde al 22%.

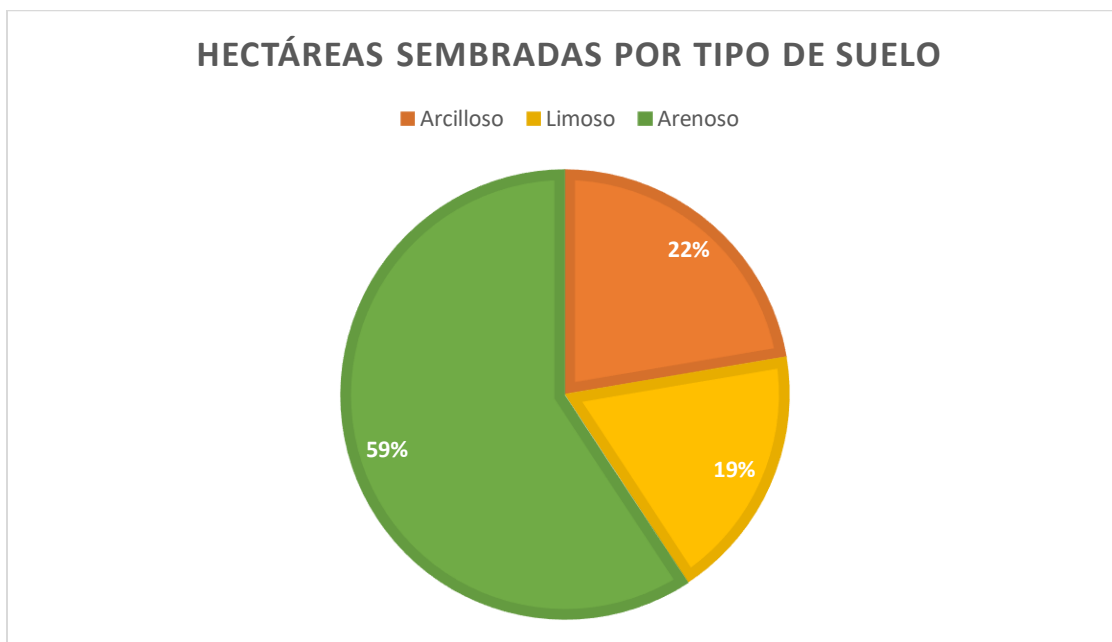


Figura 3. Hectáreas sembradas por tipo textural de suelo

ESTIMACIÓN DE PRODUCCION DE CH₄

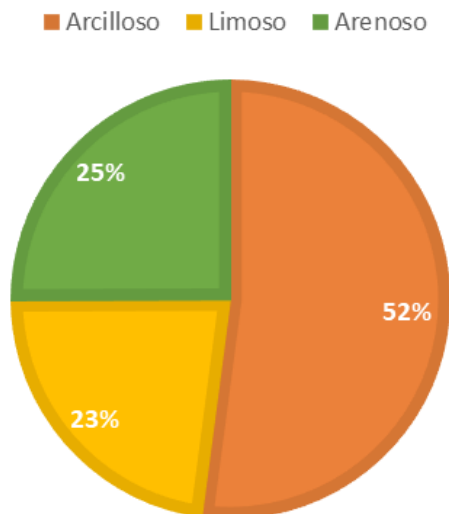


Figura 4. Estimación de producción de CH₄

Además de la producción del gas, tenemos la contaminación por infiltración, lo cual significa que, tras la aplicación del estiércol con orín, el líquido pasa a través de los poros del suelo que lo pueden guiar hasta los cuerpos de agua subterráneos, arrastrando nitratos en su camino.

Como se ha expuesto anteriormente, el estiércol podría ser un buen aportador de materia orgánica, sin embargo, se recomienda hacerle un tratamiento previo para reducir en lo más posible la producción de GEI, un buen uso podría hacerse en biodigestores o someterlo a secado antes de aplicarlo en los suelos y una vez aplicado enterrarlo y evitar su aplicación en temporada de lluvias. Para mejorar la estructura del suelo, más que la aplicación de materia orgánica se recomienda la rotación de cultivos y analizar los suelos para determinar las características fisicoquímicas y en base a ellos decidir el cultivo a aplicar.

Otro aspecto importante por resaltar es que, a nivel nacional no se cuenta con el inventario mínimo de GEI, sólo se encuentran estimaciones de carbono, en el sector agrícola el principal factor son las cabezas de ganado clasificadas por el

uso del estiércol, por lo que aplicar al pie de la letra las directrices que marca el IPCC resulta en un dato muy alejado de la realidad, es por ello que para hacer una estimación lo más cercana posible se han involucrado los factores que más propician este proceso, es decir, temperatura, tipo textural de suelo y porosidad, principalmente.

REFERENCIAS

- Badía, D. (2021). *iArasol, programa interactivo para el estudio y clasificación de suelos de Aragón*. Recuperado de: <http://www.suelosdearagon.com/contenido.php?padre=3%7C30&IDContenido=30>
- Chen, G., Huang, G., Huang, B., Yu, K., Wu, J. y Xu, H. (1997). Nitrous oxide and methane emissions from soil plant systems. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 49, 41-45. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1009758900629>
- Díaz, M., Acea, M. y Carballas, T. (1993). Microbial biomass and its contribution to nutrients concentrations in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(1), 25-31. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071793902376>
- Dong, H., Mangino, J., McAllister, T., Hatfield, J.L., Johnson, D.E., Lasset, K.R.,... Martin, J.H. (2006). Emisiones resultantes de la gestión del ganado y el estiércol. En H.S. Eggleston, L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara, y K. Tanabe. (Eds.). *Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios de gases de efecto invernadero*. (pp.10.1-10.91). Hayama, Japón: IGES.
- Espinosa, M., Contreras, J.L., Cadena, J., Martínez, J., Jaramillo, C., y Hurtado, M. (2020). Flujos de metano en suelos con coberturas de pastos en el norte de Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31 (2), 291-309. doi: <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.38387>
- Food and Agriculture Organization (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- Hergert, G., Nielsen, R. y Margheim, J. (15 de marzo de 2015). A historical overview of fertilizer use [Mensaje en un blog]. Recuperado de: <https://cropwatch.unl.edu/fertilizer-history-p1>
- Instituto Nacional de Ecología (2021). *La acumulación de estiércol en los pastizales ganaderos*. Recuperado de: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/408-la-acumulacion-de-estiercol-en-los-pastizales-ganaderos>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). *Conjunto de datos de perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II. Continuo Nacional*. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021). *Aspectos Geográficos. Puebla*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_21.pdf
- Instituto Nacional de Recursos Renovables (2014). *Manual para la implementación de proyectos de captura de metano emitido por la ganadería y agricultura en México*. Recuperado de: <https://www.biopasos.com/biblioteca/Manual%20captura%20metano%20agricultura%20ganaderia.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Recuperado de: <http://webpages.icav.up.pt/PTDC/CVT/098487/2008/IPPC,%202001.pdf>
- Jun, P., Gibbs, M., y Gaffney, K. (1999). CH₄ and N₂O emissions from livestock manure in Intergovernmental Panel on Climate Change, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. En Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nienzy, B., Emmanul, S., ... Tanabe, K.. (Eds.). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in Greenhouse Gas Inventories*. (pp. 321-338). Japan.
- National Center for Environmental Information (2022). *Weather averages*. Recuperado de: <https://www.ncei.noaa.gov/>
- Panikov, N., Dedysh, S., Kolevsnikov, O., Mardini, A., y Sizova, M. (2000). Metabolic and environmental control on methane emissions from soils: mechanistic studies of mesotrophic fen in West Siberia. *Water, air, and soil pollution: Focus, 1*, 415-428. Recuperado de <https://springerlink.bibliotecabuap.elogim.com/content/pdf/10.1023/A:1013153927194.pdf>

- Queensland Government (2013). *Soil texture*. Recuperado de: <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/soil-properties/texture>
- Quiroga, H., Cueto, J. y Figueroa, U. (2011). Efecto del estiércol y fertilizante sobre la recuperación de ¹⁵N y conductividad eléctrica. *Terra Latinoamericana*, 29(2) 201-209. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000200201
- Rossi, A. M. (2020). *Soil, texture and structure*. Recuperado de: https://www.nawm.org/pdf_lib/soils_webinar/soil_texture_and_structure_rossi_071316.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Recuperado de: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021). *Información sobre el número de animales que se crían en el país con fines de producción*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762>
- Topp E. y Pattey, E. (1997). Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian Journal of Soil Science*, 77 (2), 167-177. Recuperado de: <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/S96-107>
- Ungurasu, A. y Ungureanu, A. (Marzo 2011). Aspects regarding the methods of soil aeration. *ResearchGate*. 533-538. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/268052182_ASPECTS_REGARDING_THE_METHODS_OF_SOIL_AERATION
- United Nations Economic Commission for Europe (2019). *The Challenge*. Recuperado de: <https://unece.org/challenge>
- Vivanco, J. C., Bojórquez, J. I., Murray, R.M., Nájera, O., Hernández, A. y Flores, F. (2010). Características de los principales suelos de la cuenca del río Mololoa, Tepic, Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, 31(1),32-40. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193214880004>

ANEXO 1

Municipio	Tipo de suelo	% sug.	Estimado CH ₄ (ton)	Municipio	Tipo de suelo	% sug.	Estimado CH ₄ (ton)
1 Acajete	arenoso	0.27	18.0	26 San Andrés Cholula	arcilloso	1.35	5.9
2 Amozoc	arenoso	0.18	10.5	27 San Felipe Teotlalcingo	arcilloso	0.9	6.8
3 Atlixco	arenoso	0.27	24.3	28 San Gregorio Atzompa	arcilloso	1.35	165.2
4 Atoyatempan	arenoso	0.27	15.7	29 San José Chiapa	arenoso	0.18	16.8
5 Calpan	arcilloso	0.9	5.4	30 San Martín Texmelucan	arcilloso	0.9	19.3
6 Coronango	arenoso	0.27	1.3	31 San Nicolás Buenos Aires	arenoso	0.18	10.7
7 Cuautinchán	arenoso	0.27	30.0	32 San Salvador El Seco	arenoso	0.18	11.5
8 Cuautlancingo	arenoso	0.27	0.8	33 San Salvador El Verde	arcilloso	0.9	105.5
9 Cuyoaco	arcilloso	1.35	361.8	34 Santa Isabel Cholula	arenoso	0.27	3.8
10 Chalchicomula de Sesma	arenoso	0.27	3.8	35 Santo Tomás Hueyotlipan	limoso	0.67	10.8
11 Chignahuapan	arcilloso	1.35	32.9	36 Soltepec	arenoso	0.18	0.7
12 Domingo Arenas	arenoso	0.27	48.5	37 Tecali de Herrera	arenoso	0.27	12.8
13 Felipe Ángeles	limoso	0.67	1.9	38 Tecamachalco	limoso*	0.67	223.8
14 Huaquechula	arenoso	0.27	18.5	39 Tepanco de López	limoso*	0.67	7.8
15 Huejotzingo	arenoso	0.27	51.1	40 Tepeaca	limoso*	0.67	50.8
16 Huitziltepec	arenoso	0.27	7.8	41 Tepeyahualco	arenoso	0.27	14.4
17 Libres	arenoso	0.18	27.4	42 Tepeyahualco de Cuauhtémoc	arcilloso	1.35	34.6
18 Mazapiltepec de Juárez	arenoso	0.18	7.6	43 Tetela de Ocampo	arcilloso	1.35	5.4
19 Nealtican	arenoso	0.27	1.1	44 Tianguismanalco	arenoso	0.27	2.1
20 Nopalucan	arenoso	0.18	9.7	45 Tlachichuca	limoso*	0.5	7.0
21 Ocoyucan	arcilloso	1.35	52.7	46 Tlahuapan	arenoso	0.18	35.7
22 Oriental	arenoso	0.18	27.7	47 Tlaltenango	arenoso	0.27	1.2
23 Puebla	arcilloso	1.35	38.4	48 Tlanepantla	arcilloso	1.35	24.3
24 Quecholac	arcilloso	1.35	3.2	49 Tochimilco	limoso*	0.67	23.8
25 Rafael Lara Grajales	arenoso	0.27	1.5	50 Tochtepec	limoso*	0.67	55.1

Tabla 6. Tipo textural de suelo dominante por municipio, porcentaje de conversión a CH₄ sugerido y estimación de CH₄