

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA DURANTE LA EXTRACCIÓN DE YACIMIENTOS SHALE GAS



YURY TATIANA CÁRDENAS HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICOS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2015

**PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA CONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA GENERADA DURANTE LA EXTRACCIÓN DE YACIMIENTOS
SHALE GAS**

YURY TATIANA CÁRDENAS HERNÁNDEZ

**Trabajo de Grado para optar por el título de
Especialización en Ingeniería Ambiental**

Director

PHD FERNANDO VIEJO

Codirector

MAURICIO CARDEÑOSA

EDGAR YAÑEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICOS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico primeramente a Dios dadas mis creencias y las fortalezas que he encontrada al buscarle.

A mis padres Rosalva Hernández y Desiderio Cárdenas quienes desde muy niña han sido mis grandes maestros y a pesar de los obstáculos siempre me han apoyado y han creído en mí.

A mi chata linda que siempre me ha acompañado en cada etapa de mi vida dándome un motivo para sonreír y a mis amores Angelly y Fercha para que nunca desistan en alcanzar sus metas.

A mi querido chiqui quien se ha convertido en mi compañero de vida en las buenas y en las malas.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad Industrial de Santander por brindarme los conocimientos necesarios para ser profesional, a la escuela de ingeniería química por fortalecerme como persona íntegra.

Al instituto Colombiano de Petróleos-Ecopetrol por la experiencia de estar más cerca de la industria y al grupo de investigación Estabilidad de pozo por darme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos y reforzar los ya adquiridos.

Al Dr Fernando Viejo por su apoyo incondicional y la confianza a lo largo de la ejecución de este Proyecto.

A los ingenieros Edgar Yañez, Alexander Martínez, Yair Quintero, Reinel Corzo, y la Doctora Zuly calderón por sus aportes y contribución en la construcción de nuevos conocimientos.

A mis compañeros de clase con quienes he compartido gratas experiencias y siempre estuvieron dispuestos a resolver todas mis dudas y finalmente a todos mis compañeros del GIEP.

TABLA DE CONTENIDO

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA DURANTE LA EXTRACCIÓN DE YACIMIENTOS SHALE GAS	14
OBJETIVO	14
INTRODUCCIÓN	15
1. DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE TRABAJO	17
2. DESARROLLO DEL ESQUEMA DE TRABAJO	19
2.1 SELECCIÓN DE LOS LIMITES DE ESTUDIO	19
2.2. ANALISIS DE LAS CUATRO (4) METODOLOGÍA SELECCIONADAS ...	19
2.2.1 ANALISIS DE LA METODOLOGÍA 1/4	19
2.2.2 ANALISIS DE LA METODOLOGÍA 2/4	32
2.2.3 ANALISIS DE METODOLOGIA 3 / 4	49
2.2.4 ANALISIS DE METODOLOGÍA 4/4	63
3. CONTAMINANTES SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS	72
4. ETAPAS SELECCIONADAS DE CADA METODOLOGÍA	75
5. METODOLOGÍA PROPUESTA POR EL AUTOR	86
6. COMPARACION DE RESULTADOS POR ETAPA	102
7. COMPARACIONES DE RESULTADOS CON OTRA METODOLOGÍA (2014) 103	
8. RESULTADO FINALES EN CADA UNA DE LAS ETAPAS ANALIZADAS	104
9. COMPARACIONES ENCONTRADAS EN LA LITERATURA	105
10. CONCLUSIONES	108
11. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Límites y consideraciones propuestas en la metodología 1	21
Figura 2: Uso de agua de perforación de acuerdo a la metodología 1	26
Figura 3: Uso de agua de fracturamiento de acuerdo a la metodología 1	29
Figura 4: Disposición de agua metodología 1	31
Figura 5: Límites de estudio de la metodología 2	34
Figura 6: Especificaciones de la quema de las emisiones metodología 2	48
Figura 7: Límites de estudio para la metodología 3.....	50
Figura 8: Etapas de la metodología propuesta por la metodología 4	64
Figura 9: Esquema de los resultados obtenidos en las operaciones de cabeza de pozo.	70
Figura 10: Esquema de los resultados obtenidos incluyendo todo el ciclo de vida del gas.....	71
Figura 11: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante la construcción del “ <i>well pad</i> ”.	77
Figura 12: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante la perforación.....	79
Figura 13: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante el fracturamiento hidráulico.	81
Figura 14: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante el completamiento.	83
Figura 15: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para el “ <i>well pad</i> ”	86
Figura 16: Contaminantes presentes en cada operación durante la construcción del “ <i>well pad</i> ”	87
Figura 17: Emisiones debidas a la construcción del “ <i>well pad</i> ”.	90
Figura 18: Contaminantes presentes durante la construcción del “ <i>well pad</i> ”	90
Figura 19: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para la perforación.	91
Figura 20: Contaminantes presentes en cada operación durante la perforación..	92
Figura 21: Emisiones debidas a la perforación.....	94
Figura 22: Contaminantes presentes durante la perforación	94
Figura 23: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para el fracturamiento	95

Figura 24: Contaminantes presentes en cada operación durante el fracturamiento y completamiento	96
Figura 25: Emisiones debidas Al fracturamiento hidráulico	98
Figura 26: Contaminantes presentes durante el fracturamiento	98
Figura 27: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para el completamiento	99
Figura 28: Emisiones debidas al completamiento	100
Figura 29: Contaminantes presentes en el completamiento.....	101
Figura 30: Comparación entre las emisiones generadas para diversos componentes en cada una de las etapas	102
Figura 31: Comparación de la metodología propuesta con la metodología base realizada en el 2014	103
Figura 32: Resultados finales en cada una de las etapas	104
Figura 33: Comparación entre los estudios realizados para estimar la contaminación atmosférica.....	105
Figura 34: Resultados de emisión en función de la energía generada.....	106
Figura 35: Resultados de emisión en función de la energía generada.....	106
Figura 36: Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el gas y carbón.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Costos para construcción de la carretera según la metodología 1	22
Tabla 2: Costos para construcción del “ <i>well pad</i> ” según la metodología 1	23
Tabla 3: Emisiones en perforación por factores de emisión metodología 1	24
Tabla 4: Factores de emisión de SimaPro	25
Tabla 5: Costo de aditivos de fluido de fractura metodología 1	28
Tabla 6: Resumen de las emisiones metodología 1	32
Tabla 7: Consumo de energía de equipos y vehículos	35
Tabla 8: Especificaciones de los equipos implementados durante la construcción del “ <i>well pad</i> ” metodología 2	36
Tabla 9: Factores de emisión de la EPA AP-42 1995.	39
Tabla 10: Emisiones debidas a los equipos usados en la construcción del “ <i>well pad</i> ” metodología 2.....	40
Tabla 11: Especificaciones de los equipos usados en transporte de aditivos metodología 2.....	42
Tabla 12: Emisiones de los equipos usados en transporte de aditivos metodología 2	42
Tabla 13: Especificaciones de equipos de circulación metodología 2	43
Tabla 14: Emisiones totales de la etapa de perforación y las sub-etapas metodología 2	44
Tabla 15: Equipos implementados en la cementación de pozos metodología 2...	45
Tabla 16: Emisiones de los equipos usados en la cementación de pozos metodología 2.....	45
Tabla 17: Especificaciones de los equipos usados en el fracturamiento hidráulico metodología 2.....	46
Tabla 18: Emisiones de los equipos usados en el fracturamiento hidráulico metodología 2.....	47
Tabla 19: Emisiones debidas al transporte de diésel metodología 2	48
Tabla 20: Resumen de las emisiones metodología 2	48
Tabla 21: Factores de emisión utilizados en la metodología 3.....	51
Tabla 22: Parámetros de entrada para la metodología 3.	51
Tabla 23: Composición del gas comprimido empleado en los dispositivos neumáticos.....	58

Tabla 24: Parámetros de ingreso para el cálculo de los dispositivos neumáticos.	58
Tabla 25: Resumen de los resultados obtenidos por cada fuente con la metodología 3	62
Tabla 26: Resumen de los resultados obtenidos por cada actividad con la metodología 3	62
Tabla 27: Resultados obtenidos con la metodología 4.	69
Tabla 28: Contaminantes estudiados	74
Tabla 29: Información adicional	75
Tabla 30: Cálculo de las emisiones debidas a la construcción del “ <i>well pad</i> ” para los contaminantes NO _x SO ₂ y CO _{2e} .	78
Tabla 31: Emisiones debidas a la perforación para los contaminantes NO _x SO ₂ y CO _{2e} .	80
Tabla 32: Emisiones debidas al fracturamiento hidráulico para los contaminantes NO _x SO ₂ y CO _{2e} .	82
Tabla 33: Emisiones debidas al completamiento para los contaminantes NO _x SO ₂ y CO _{2e} .	84
Tabla 34: Emisiones de otros contaminantes que sólo fueron incluidos por la metodología 3.	85
Tabla 35: Consumo de energía de vehículos	88
Tabla 36: Información adicional, factores de emisión de la EPA – 1995 y poder calorífico del diésel.	89
Tabla 37: Características del gas para las emisiones fugitivas	93
Tabla 38: Información para estimación de emisiones de COVs y PM _{2,5}	93
Tabla 39: Información para estimación de emisiones de COVs y PM _{2,5}	97

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA DURANTE LA EXTRACCIÓN DE YACIMIENTOS SHALE GAS*

AUTOR: CARDENAS HERNANDEZ Yury Tatiana **

PALABRAS CLAVES: Shale Plays, contaminación atmosférica, factores de emisión.

DESCRIPCIÓN:

Debido a la demanda energética, países como EEUU se ven en la necesidad de incursionar en yacimientos no convencionales (shale gas) e implementar nuevas tecnologías para su extracción, según algunos estudios, en el 2009 el shale gas llegó a ser el 14% y 16% de la producción y para el 2035 se espera que este aproximadamente entre el 45% y 47%. En consecuencia de este desarrollo tecnológico para la extracción de shale gas, en Colombia se están adelantando estudios previos en este tipo de yacimientos, encontrado necesario analizar las emisiones atmosféricas, para tratar de mitigarlas y evitar afectación a la calidad del aire. Según algunas entidades ambientales como la EPA las emisiones en operaciones de yacimientos no convencionales (shale gas) tales como las registradas durante la perforación, completamiento, y fracturamiento hidráulico, aumentan la contaminación atmosférica y los gases de efecto invernadero. En virtud de lo anterior, la finalidad de este trabajo, es realizar la estimación de la contaminación en cada una de las etapas mencionadas anteriormente, para identificar en cuál se presenta las emisiones más críticas, y de esta forma tratar de mitigarlas. Para alcanzar este objetivo, se realizará una revisión de estudios previos publicados para diferentes yacimientos del shale en el mundo y en base a estos definir el mejor procedimiento y proponer una metodología que se puede aplicar en los próximos proyectos de shale gas en Colombia.

*Proyecto de posgrado

**Facultad de ingenierías físico químicas. Escuela de ingeniería Química. Director PhD. Fernando Viejo. codirector Mauricio Cardeñosa Edgar Yañez

SUMMARY

TITLE: PROPOSAL FOR A METHODOLOGY FOR ESTIMATING AIR POLLUTION GENERATED DURING THE EXTRACTION OF SHALE GAS FIELDS*

AUTHOR: HERNANDEZ CARDENAS Yury Tatiana **

KEYWORDS: Shale Plays, Air Pollution, Emission Factors.

DESCRIPTION:

Because energy demand, countries like the US are in the need to venture into unconventional reservoirs (shale gas) and implement new technologies for extraction, according to some studies, in 2009 the shale gas became 14% and 16 % of production and by 2035 is expected to be approximately 45% and 47%. As a result of this technological development for the extraction of shale gas in Colombia are being ahead earlier studies in such sites, found it necessary to analyze atmospheric emissions, to try to mitigate and avoid affecting the air quality. According to some environmental organizations like the EPA emissions operations unconventional reservoirs (shale gas) such as those recorded during the drilling, completion and hydraulic fracturing, increased air pollution and greenhouse gases. Under the above, the aim of this work is the estimation of the contamination in each of the steps mentioned above, to identify which emission occurs most critical, and thus try to mitigate them. To achieve this objective, a review of previous studies published to different deposits of shale in the world and will be made based on these define the best procedure and propose a methodology that can be applied in future projects of shale gas in Colombia.

* Project graduate

** Faculty of Physical chemical engineering. School of Chemical Engineering. PhD Director. Fernando Viejo. Codirector Mauricio Cardeñosa Edgar Yañez

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA DURANTE LA EXTRACCIÓN DE YACIMIENTOS SHALE GAS

OBJETIVO

Proponer una metodología para estimar la contaminación atmosférica generada durante la extracción de yacimientos shale gas.

INTRODUCCIÓN

Inicialmente se realiza el análisis de cuatro (4) metodologías propuestas en la literatura para determinar la contaminación atmosférica que se genera durante el proceso de extracción de shale gas.

La metodología 1 es propuesta por Mohan Jiang et al (2011), se desarrolló en el campo Marcellus en Estados Unidos, con un límite de estudio de 25 años. Analiza los contaminantes CH₄ y CO₂ por medio de la relación entre las emisiones generadas según el costo de cada operación y otros teniendo en cuenta las emisiones producto de los equipos utilizados. Los resultados se expresan en tCO_{2e}/pozo.

La metodología 2 es propuesta por Yuan Chang et al (2014), se desarrolló en el campo Changning-Weiyuan Shale Zone in Sichuan en China, con un límite de estudio de 10 a 15 años, obteniendo resultados de Energía utilizada (GJ) y emisiones de SO₂ (kg), NO_x (kg), CO₂ (Toneladas métricas), CH₄ (kg) y CO_{2e} (Toneladas métricas). El autor considera las emisiones según la energía requerida en cada operación utilizando los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental, EPA.

La metodología 3 es propuesta por Anirban A. Roy et al 2013 y se desarrolla en el campo Marcellus en los Estados Unidos. Analiza los contaminantes NO_x, COV, y partículas finas (2,5 micras de diámetro aerodinámico PM_{2.5}), de actividades como la perforación, el fracturamiento hidráulico, estaciones de compresión y completamiento. Las emisiones se calcularon para el año 2009 y se hace su proyección para 2020 implementando los efectos de las regulaciones adicionales existentes y potenciales. Los resultados se expresan en ton / pozo o ton/día - ton/producción.

La metodología 4 es propuesta por Trevor Stephenson et al 2011 y se desarrolla para los campos de América del Norte - e incluye el análisis de todas las etapas del

ciclo de vida del gas para la generación de electricidad a lo largo de la vida útil del campo. Los resultados se expresan en $\text{gCO}_2 \text{ e/KWh}$ - $\text{gCO}_2 \text{ e/MJ}$.

Posteriormente a partir de los datos de la literatura, la disponibilidad de información y los planteamientos realizadas por los autores mencionados, se propone una metodología que cuantifica la contaminación atmosférica en las etapas de preparación del “*well pad*”, perforación, fracturamiento hidráulico y completamiento, así mismo en cada una de estas etapas se analiza la influencia de las subetapas que intervienen en cada operación.

En relación a los contaminantes se determina la influencia del $\text{CO}_{2\text{e}}$, SO_x , NO_x COV, y $\text{PM}_{2,5}$ en cada una de las subetapas, con el fin de evidenciar cuales causan mayor impacto en la calidad del aire.

1. DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE TRABAJO

Se realizó una revisión bibliográfica preliminar con el objetivo de determinar el límite de análisis de la presente investigación, como resultado se encontró que la preproducción que abarca la preparación del “*well pad*”, la perforación, el fracturamiento hidráulico y el completamiento eran las de mayor impacto.

A continuación se realizó una revisión bibliográfica de los estudios en la literatura a nivel mundial que determinaran la contaminación atmosférica por extracción de yacimientos no convencionales shale gas durante la preproducción; para el presente análisis se seleccionaron y analizaron cuatro metodologías.

Seguidamente se compararon las cuatro metodologías, teniendo como criterio de análisis la información necesaria para cuantificar las emisiones, los contaminantes estudiados y las subetapas que se consideraban en cada uno de las metodologías.

Posteriormente de cada metodología analizada se seleccionaron las subetapas que conformarían la metodología propuesta por el autor de la presente investigación, así como los contaminantes que serán objeto de análisis.

De acuerdo con la revisión realizada y las subetapas seleccionadas, la información requerida para cada subetapa es la siguiente:

“*well pad*” : Area del “*well pad*” , tipo de vegetación removida, tasa de secuestro de CO₂ y el combustible gastado por cada uno de los equipos.

Perforación: Consumo de combustible para cada uno de los equipos y los factores de emisión de la EPA

Fracturamiento Hidráulico: Número de etapas, equipos y combustible gastado tanto en el proceso como en el tratamiento de flowback.

Completamiento: Emisiones fugitivas, composición del gas y relación entre gramos de metano, gramos de CO₂ quemado o venteado y porcentaje que se ventea o se quema

Cabe resaltar que de presentarse emisiones fugitivas en las etapas anteriores al completamiento también se debe conocer la información mostrada en el completamiento.

Consecutivamente se determinó de forma cuantitativa las emisiones generadas durante la preproducción para cada una de las subetapas analizadas así como los contaminantes.

Finalmente se realizó un análisis de los resultados obtenidos con la metodología propuesta por el autor y se comparó con metodologías encontradas en la literatura.

2. DESARROLLO DEL ESQUEMA DE TRABAJO

2.1 SELECCIÓN DE LOS LIMITES DE ESTUDIO

De acuerdo al estudio realizado por Christopher L. Weber y Christopher Clavin “Life Cycle Carbon Footprint of Shale Gas: Review of Evidence and Implications” es posible evidenciar que la etapa de preproducción representa un 13% del total de emisiones reportadas para una determinada producción, este valor resulta representativo ya que las operaciones durante esta etapa se realizan solo una vez durante la vida del pozo, en un periodo de 6 a 12 meses; por otro lado las etapas de procesamiento y la transmisión representan un 87% del total de las emisiones reportadas, sin embargo estas se distribuyen en un periodo de 10 a 15 años aproximadamente, por lo tanto la etapa de preproducción constituye una mayor intensidad en virtud de las emisiones generadas.

Es de resaltar que los datos anteriores están sujetos a incertidumbre debido a las siguientes consideraciones: El número de trabajos de reacondicionamiento del pozo, las emisiones fugitivas consideradas, la tasa de recuperación final estimada (es decir, el gas total producido) del pozo (shale gas principalmente), las emisiones de la planta de procesamiento de gas, entre otras.

En virtud de lo anterior para el presente análisis se determina como límite de estudio la etapa de preproducción que abarca la preparación del “*well pad*”, la perforación, el fracturamiento hidráulico y el completamiento.

2.2. ANALISIS DE LAS CUATRO (4) METODOLOGÍA SELECCIONADAS

2.2.1 ANALISIS DE LA METODOLOGÍA 1/4

Según el estudio realizado por Mohan Jiang et al 2011, en el 2009 el shale gas llegó a ser el 16% de la producción y para el 2035 se espera que sea aproximadamente el 47%, debido a la necesidad de desarrollar pozos no convencionales. Surge la premura, entonces, de estudiar la contaminación atmosférica, ya que un pozo no

convencional necesita de operaciones adicionales como el fracturamiento hidráulico para iniciar su producción. Es por ello que Mohan Jiang realizó un estudio para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero en unidades de tCO_{2e}/pozo.

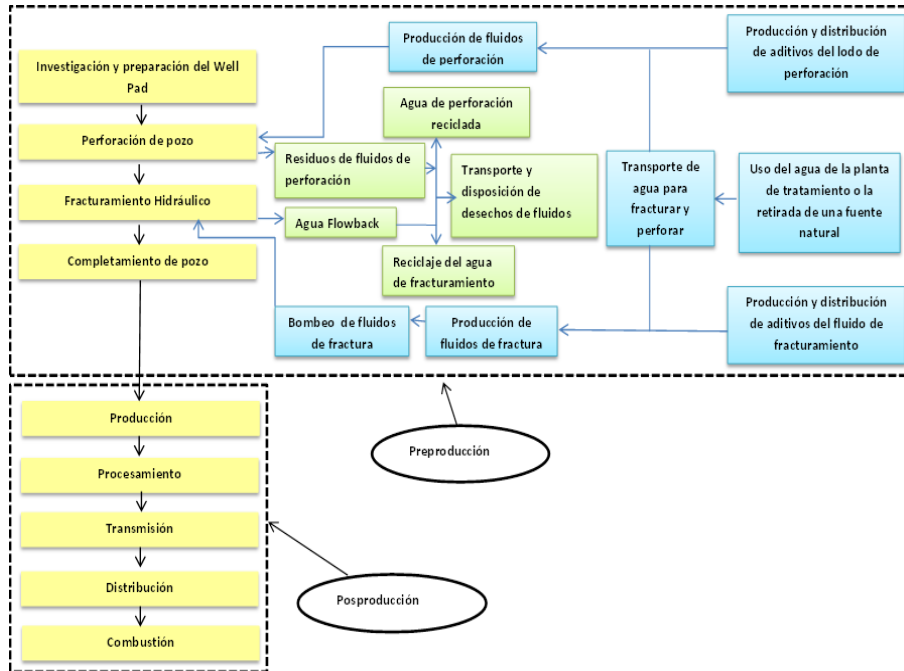
Esta metodología muestra dos formas de cuantificar las emisiones: primero, por medio de los factores de emisión de SimaPro expresados en unidades de kgCO_{2e}/kg Producción para la bentonita, y gCO_{2e}/hp-hr para los motores¹ y segundo, por medio de los costos necesarios como, por ejemplo, los asociados a la construcción del “*well pad*” los cuales se realizan con el modelo EIO-LCA que muestra las emisiones por cada millón de dólares, en este caso 612 T CO_{2e}/ \$1 millón de dólares.

Limites

El análisis de emisiones atmosféricas se estima para la preproducción, donde se considerarán las emisiones asociadas a la investigación y preparación del “*well pad*” que incluye el daño a la vegetación, la construcción de carreteras y la construcción del “*well pad*”, la perforación del pozo que incluye el consumo de energía asociadas al taladro, la producción de lodo o fluido de perforación, la producción y disposición del aditivos del lodo de perforación como es el caso de la bentonita, el uso de agua para la perforación que debe ser transportada y cuyas emisiones pueden aumentar si se compra de una planta de tratamiento; posterior a la perforación vendrá el fracturamiento hidráulico que requiere producción y distribución de los fluidos de fracturamiento y bombeo de fluidos, (la tasa de flowback y la tasa que se recicla son tenidos en cuenta para estimar la carga de los camiones) y por último, la disposición de los desechos de los fluidos utilizados tanto en perforación como en fracturamiento. El completamiento de pozo incluye la quema de gases provenientes del flowback. La figura 1 muestra el límite análisis para este estudio.

¹ Sheehan, Camobreco et al. 2000

Figura 1: Límites y consideraciones propuestas en la metodología 1



Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

Como generalidades del estudio se tomó el siguiente caso base: un “*well pad*” con 6 pozos cada uno produciendo 2,7Bscf (Billones de pies cúbicos estándar) lo que equivale a 0,3 MMPCD durante 25 años. En este estudio no se tiene en cuenta el análisis para la posproducción ya que el autor planteó que se producirán las mismas emisiones en un yacimiento convencional y no convencional.

Investigación y preparación del “*well pad*”

Los gases de efecto invernadero resultantes de esta etapa consisten en la pérdida de carbón debida a la destrucción del suelo y la interrupción vegetativa del sitio, las cuales son estimadas en función del área y la tasa de secuestro de CO₂ en la pradera; y las emisiones de CO₂ relacionadas con la construcción de vías de acceso y “*well pad*” las cuales se realizarán con el modelo económico (EIO-LCA (CMUGDI 2010)).

Perdidas de carbón debidas a la limpieza de la vegetación

Datos necesarios: Tasa de secuestro de CO₂ tomada de la literatura (24 a 30) gCO₂/ft²-año (Tilman, Hill et al. 2006), y área aproximada del “well pad” (96000 – 260000) ft²”well pad”. El rango de emisiones atmosféricas en esta etapa está entre 11 y 44 tCO₂/Pozo.

La ecuación 1 es un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones.

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones} &= \frac{27 \text{ gCO}_2}{\text{ft}^2 * \text{año}} * \frac{150000 \text{ ft}^2}{\text{well pad}} * 25 \text{ años} * \frac{\text{well pad}}{6 \text{ pozos}} * \frac{\text{ton}}{1 * 10^6 \text{ g}} \\
 &= \frac{16,8 \text{ tCO}_2}{\text{pozo}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Construcción de la carretera

Para las emisiones debidas a la construcción de la carretera se requiere de los gastos para la implementación del modelo económico. La tabla 1 muestra un ejemplo de estos gastos.

Tabla 1: Costos para construcción de la carretera según la metodología 1

Ítem		Unidad	Cantidad	Precio	Costo (\$)
Limpieza del sitio	Excavar y remover	Acre	1,4	1475	2100
	Talar árboles	Acre	1,4	4600	6600
Nivelación		S.Y.	6900	3,14	22000
Estabilizar suelos		S.Y.	6900	2,16	15000
Pavimento		S.Y.	6900	14,45	100000
Total					145700

S.Y: Yarda Cuadrada.

Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

Construcción del “well pad”: Al igual que la construcción de la carretera, las emisiones debidas al “well pad” se estiman usando un modelo económico. En la tabla 2 se muestra un resumen de los gastos y actividades realizadas en su construcción. Dentro de las construcciones que se hacen, están los embalses para almacenar fluidos implementados en perforación y fracturamiento hidráulico, tanques de almacenamiento, entre otros.

Tabla 2: Costos para construcción del “well pad” según la metodología 1

Ítem		Unidad	Cantidad	Precio(\$)/unidad	Costo(\$)
Limpieza del sitio	Excavar y remover	Acre	5	1475	7400
	Talar árboles	Acre	5	4600	23000
Nivelación		S.Y.	24000	3,14	76000
Estanques	Zanja de lodo	C.F.	100000	25,9	2600000
	Revestimiento de estanques	S.F.	22000	1,42	32000
Pavimento		S.Y.	24000	14,45	350000
Tanques de almacenamiento, 50000		Ea	2	193764	390000
Total					3478400

C.F: Pie Cúbico

S.F: Pie Cuadrado

Fuente: Mohan Jiang et al, 2011

Luego de tener los costos necesarios para la construcción de la carretera y el “well pad” se implementa el modelo económico que indica cuántas emisiones se generan por \$1 millón de dólares. La ecuación 2 muestra un ejemplo del cálculo de las emisiones durante la Investigación y preparación del “well pad”.

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones} &= \frac{612 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millon } \$} * (3,478 \text{ millon } \$ + 0,145 \text{ millon } \$) * \frac{1}{6 \text{ Pozo}} \\
 &= \frac{369,5 \text{ tCO}_2}{\text{Pozo}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Perforación

Consumo de energía

Para estimar las emisiones por perforación se tiene en cuenta principalmente las emisiones producidas por la combustión de los motores diésel que le dan la potencia al taladro. Para esta etapa se requieren datos de potencia de los motores, tiempo que demora la perforación y un factor de emisión que indique cuántas emisiones hay en función de la energía utilizada, ver tabla 3.

Tabla 3: Emisiones en perforación por factores de emisión metodología 1

	Min	Max	Promedio
Capacidad del taladro	1000	1600	1300
Tiempo de perforación	340	610	480
Emisiones	215	618	395

Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

La ecuación 3 muestra un ejemplo del cálculo de las emisiones teniendo los valores de la tabla 3, potencias del taladro de 1600 hp, tiempo de 610 hr y factor de emisión de 633,28gCO₂/hp-hr.

$$\text{Emisiones} = 1600 \text{ hp} * 610 \text{ hr} * \frac{633,28 \text{ gCO}_2}{\text{hp} - \text{hr}} = 618 \text{ tCO}_2 \quad (3)$$

Otra forma de realizar los respectivos cálculos es mediante el modelo económico EIO-LCA (CMUGDI 2010), conociendo los gastos debidos a la perforación, longitud por pozo y las emisiones generadas por cada millón de dólares. La ecuación 4 muestra un ejemplo de cálculo.

$$\text{Emisiones} = \frac{161 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millon}} * \left(\frac{\$175,78}{\text{ft}} \right) * \frac{12500 \text{ ft}}{1 \text{ Pozo}} * \frac{1 \text{ millon}}{1 * 10^6 \$} = \frac{358,75 \text{ tCO}_2}{\text{Pozo}} \quad (4)$$

Los resultados de emisiones a partir del modelo económico son similares a los resultados obtenidos a partir de factores de emisión ya que se encuentran cerca al valor promedio de la tabla 3.

Producción del fluido de perforación

Para analizar las emisiones debidas al lodo se parte de sus principales componentes, la bentonita y el agua ya que los demás aditivos sólo se encuentran en un 5%. Un pozo común puede gastar alrededor de 100000 galones de agua para el lodo y 13000 kg de bentonita.

El cálculo de las emisiones se realiza mediante el modelo económico EIO-LCA. Para éste se requiere el precio de la bentonita que se estima en \$1100 dólares y las emisiones por cada 1 millón de dólares 1290 tCO₂. La ecuación 5 muestra un ejemplo para estimar las emisiones.

$$Emisiones = \frac{1290 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millon}} * (1,1 * 10^{-3}) \text{ millones} = 1,4 \text{ tCO}_2 \quad (5)$$

Alternativo al método anterior existen unos factores de emisión para la bentonita que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Factores de emisión de SimaPro

Fuente	Nombre	Unidad emisión(kg CO _{2e} /kg Producción)
ETH-ESU	Bentonita ETH S	0,14
Ecoinvent	Bentonite, at mine/DE S	0,0264
US-EI	Bentonite, at mine/DE with US electricity U	0,027

Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

Este método depende de los kilogramos de producción como se indica en el siguiente cálculo descrito por la ecuación 6.

$$Emisiones = \frac{0,14 \text{ kgCO}_2}{\text{kg produccion}} * 13000 \text{ kg} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} = 1,82 \text{ tCO}_2 \quad (6)$$

Uso del agua para perforar

La figura 2 muestra el uso del agua para la perforación, especificando qué porcentaje es reciclada y cuál se lleva para disposición.

Figura 2: Uso de agua de perforación de acuerdo a la metodología 1



Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

Según la empresa Chesapeake Energy se requieren 100000 galones para perforar un pozo. Asumiendo que se recicla el 85% la carga de los camiones, se estima en 560 ton-milla/pozo como caso base para llevar los fluidos al sitio de perforación y al lugar de disposición. La energía que utiliza un camión es 1028 BTU/ton-milla en ambas direcciones de viaje, el factor de emisiones del diésel es 0,094 gCO_{2e}/kJ (Wang and Santini 2009), el factor de emisión para el tratamiento de agua municipal es 3,4 gCO_{2e}/galón y, finalmente, el costo de inyectar el fluido es (0,57-0,6) dólares/galón. Con estos datos se emplea nuevamente el modelo económico EIO-LCA que para este caso, las emisiones son 650 tCO_{2e} por cada millón de dólares. A continuación se muestra un ejemplo para el cálculo del uso del agua.

Transporte de agua para perforar

La ecuación 7 representa el cálculo de la energía necesaria para transportar 100000 galones de agua.

$$Energía = 560 \text{ ton - milla} * \frac{1028 \text{ BTU}}{\text{ton - milla}} * \frac{1,06 \text{ KJ}}{1 \text{ BTU}} = 610220,8 \text{ kJ} \quad (7)$$

La ecuación 8 representa el cálculo de las emisiones según la energía.

$$Emisiones = \frac{0,094 \text{ gCO}_2}{\text{KJ}} * 610220.8 \text{ kJ} * \frac{1 \text{ ton}}{1 * 10^6 \text{ g}} = 0,057 \text{ tCO}_2 \quad (8)$$

Compra de agua a la planta de tratamiento

- La ecuación 9 representa el cálculo de las emisiones por tratamiento de agua.

$$Emisiones = \frac{3,4 \text{ gCO}_2}{\text{galon}} * 100000 \text{ galones} * \frac{1 \text{ ton}}{1 * 10^6 \text{ g}} = 0,34 \text{ tCO}_2 \quad (9)$$

Disposición de los desechos de los fluidos de perforación

- La ecuación 10 representa el cálculo de las emisiones por inyección del 15 % de disposición.

$$Emisiones = \frac{650 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millon}} * \frac{0,6 \text{ dolar}}{\text{galon}} * 15000 \text{ galon} * \frac{1 \text{ millon}}{1 * 10^6 \text{ dolar}}$$

$$= 5,85 \text{ tCO}_2 \quad (10)$$

Las emisiones totales debidas al uso del agua para perforar son la suma en las ecuaciones 7, 8, 9 y 10.

$$Emisiones \text{ totales} = 5,85 + 0,34 + 0,057 = 6,24 \text{ tCO}_2$$

Fracturamiento hidráulico

Se requiere alrededor de 2 a 6 millones de galones de agua.

Energía para las bombas

Dentro de los requerimientos para el fracturamiento se encuentran bombas en serie, mezcladoras, aditivos químicos, sistemas de hidratación y unidades de acidificación. La potencia requerida para las bombas en total para este caso base es 34150 hp, la tasa de bombeo esta entre 50 – 100 Bl/minuto, la fractura multi-

etapa dura entre 10 a 30 horas y el factor de emisión para la bomba es el mismo que se utilizó para perforación 633,28 g CO_{2e}/hp-hr. La ecuación 11 muestra un ejemplo de cálculo.

$$Emisiones = 34150 \text{ hp} * 30 \text{ hr} * \frac{633,28 \text{ gCO}_{2e}}{\text{hp} - \text{hr}} * \frac{1 \text{ ton}}{1 * 10^6 \text{ g}} = 648,79 \text{ tCO}_2 \text{ (11)}$$

Producción de fluidos de fractura

Para estimar las emisiones debidas al fluido de fractura se utiliza el modelo económico EIO-LCA en función de los costos para generar estos fluidos, los cuales se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Costo de aditivos de fluido de fractura metodología 1

Material	Costo(\$)	t CO ₂ /1 millón (\$)	Emisiones t CO ₂
Destilados de petróleo	3000	1260	3,78
Material inorgánico	3000	2060	6,18
Material orgánico	8000	2540	20,32
Propante	22000	1360	29,92

Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

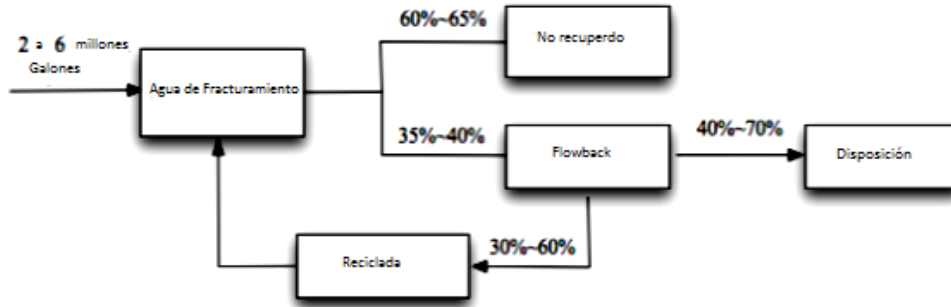
En la ecuación 12 se muestra un ejemplo del cálculo para los datos del propante de la tabla 5.

$$Emisiones = \frac{1360 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millon}} * (0,022 \text{ millones}) = 29,92 \text{ tCO}_2 \text{ (12)}$$

Como se observa en la tabla 5, se realizan las estimaciones de emisiones en función de los gastos de cada aditivo para un total de 60,2 tCO₂.

Uso del agua para fracturar

Figura 3: Uso de agua de fracturamiento de acuerdo a la metodología 1



Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

Las emisiones debidas a los camiones usados en el transporte, se estiman igual al agua usada en la perforación, la tasa de flowback y la tasa que se recicla son tenidos en cuenta para estimar la carga de los camiones. La carga de los camiones se estima en 63000 ton-milla y se tomarán 3 millones de galones de agua, los demás datos se toman de la etapa de perforación como se muestra a continuación. La figura 3 muestra el uso del agua para el fracturamiento, especificando qué porcentaje es reciclada y cuál se lleva para disposición.

Transporte de agua para fracturar

- La ecuación 13 muestra el cálculo de la energía necesaria para transportar 3000000 galones de agua.

$$Energía = 63000 \text{ ton} - \text{milla} * \frac{1028 \text{ BTU}}{\text{ton} - \text{milla}} * \frac{1,06 \text{ KJ}}{1 \text{ BTU}} = 68649840 \text{ kJ} \quad (13)$$

- La ecuación 14 muestra el cálculo de las emisiones según la energía.

$$Emisiones = \frac{0,094 \text{ gCO}_2}{\text{KJ}} * 68649840 \text{ kJ} * \frac{1 \text{ ton}}{1 * 10^6 \text{ g}} = 6,45 \text{ tCO}_2 \quad (14)$$

Compra de agua a la planta de tratamiento

- La ecuación 15 muestra el cálculo de las emisiones por tratamiento de agua.

$$Emisiones = \frac{3,4 \text{ gCO}_2}{\text{galon}} * 3000000 \text{ galones} * \frac{1 \text{ ton}}{1 * 10^6 \text{ g}} = 10,2 \text{ tCO}_2 \text{ (15)}$$

Disposición de los desechos de los fluidos de fractura

- La ecuación 16 muestra el cálculo de las emisiones por inyección de disposición: En esta etapa se tomará el 40% de flowback y de este, se destinará para inyectar el 60%.

$$Vinyeccion = 3 * 10^6 \text{ galones} * 0,4 * 0,6 = 720000 \text{ galones (16)}$$

$$Emisiones = \frac{650 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millón}} * \frac{0,6 \text{ dolar}}{\text{galon}} * 720000 \text{ galon} * \frac{1 \text{ millón}}{1 * 10^6 \text{ dolar}} \\ = 280,8 \text{ tCO}_2 \text{ (17)}$$

El total de emisiones debidas al fluido de fractura por pozo es 297,45 tCO₂ resultado de la suma de las ecuaciones 14, 15, y 17.

Completamiento

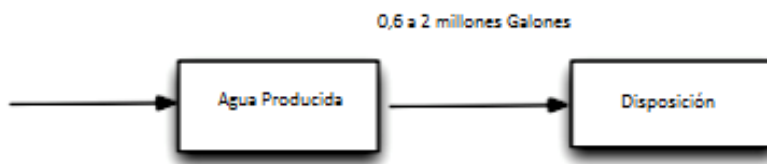
Quema de gases provenientes del flowback y demás emisiones

La quema es necesaria durante las primeras 12 a 24 (0,5 – 1 día) horas de flowback y, en caso de no contar con tubería para estas emisiones, la quema puede durar entre 4 y 15 días. La combustión genera CO₂ y emisiones de metano debido a que la combustión no es completa (98% de eficiencia de combustión), la composición del gas de estudio es 97,2% de metano, se toma la tasa de los primeros 30 días de producción 4,1 MMscf. Para el caso de la combustión incompleta se usa como factor de combustión 2,75 g CO₂/g metano y finalmente un factor que convierte las emisiones de metano en CO_{2e} cuyo valor es 25 g CO_{2e}/g metano. Con los datos anteriores se realiza la estimación de las emisiones como se muestra a en la ecuación 18.

$$\begin{aligned}
 tCO_2 &= \frac{4,1 \text{ MMscf}}{\text{dia}} * 0,98 * 0,97 * 0,5 \text{ dia} * \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{2,75 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} + \frac{4,1 \text{ MMscf}}{\text{dia}} * 0,02 \\
 &* 0,97 * 0,5 \text{ dia} * \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 103 + 19,11 \\
 &= 122,2 \text{ tCO}_2 \text{ (18)}
 \end{aligned}$$

Emisiones debidas a la producción de agua

Figura 4: Disposición de agua metodología 1



Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

Durante la vida del pozo se produce agua la cual requiere de camiones para su disposición, se producen de 5 a 20 bl/MMscf. la tasa de producción promedio durante los 25 años es de 0,3 MMscf/día.

- La ecuación 19 muestra el cálculo del agua producida

$$V \text{ agua} = \frac{10 \text{ bl}}{\text{MMscf}} * \frac{0,3 \text{ MMscf}}{\text{dia}} * \frac{365}{1 \text{ año}} * 25 \text{ años} = 27375 \text{ bl} \text{ (19)}$$

- La ecuación 20 muestra el cálculo del costo para inyectar el agua

$$\text{Cost} = \frac{0,6\$}{\text{galón}} * 27375 \text{ bl} * \frac{42 \text{ galon}}{1 \text{ bl}} * \frac{1 \text{ millon}}{1 * 10^6} = 0,7 \text{ millones} \text{ (20)}$$

- La ecuación 21 muestra la estimación de las emisiones: Se toma el mismo factor usado con desechos de perforación

$$\text{Emisiones} = \frac{650 \text{ tCO}_2}{1 \text{ millon}} * 0,7 \text{ millones} = 455 \text{ tCO}_2 \text{ (21)}$$

En resumen se tuvieron las emisiones presentadas en la tabla 6

Tabla 6: Resumen de las emisiones metodología 1

		MT CO ₂ e/well
Preparación del Well Pad (asumen 6-well pad)		386,3
Perforación	Perforación	618
	Uso del agua	6,24
	Producción del lodo	1-2
	Suma	625
Fracturamiento	Bombeo	648,79
	Aditivos de fluido de fractura	60,2
	Uso de agua	297,45
	Suma	1006,45
Completamiento	Quema de emisiones	122,2
Agua de producción	Disposición de agua	455
Total		2594,3

Fuente: Mohan Jiang et al, 2011.

2.2.2 ANALISIS DE LA METODOLOGÍA 2/4

Generalidades

La segunda metodología es un estudio realizado en China. Se basó en los datos del primer pozo horizontal de gas shale realizado en ese país (Wei 201-H1). Los resultados sugieren que para un pozo de shale gas se requiere de 59 TJ de energía y genera 5500 toneladas métricas de gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones fueron dominadas por la producción y el uso de combustible diésel para los fluidos de perforación base aceite, para la combustión, por las emisiones fugitivas y la quema durante el completamiento.

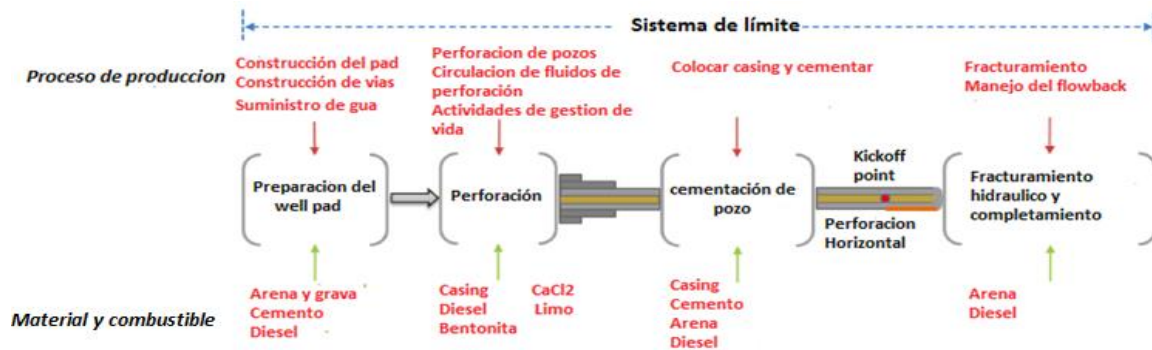
Yuan Chang 2014 basa su estudio en los factores de emisión de la EPA AP-42 y el uso de combustible implementado en todas las operaciones. Debido a que el periodo de construcción es corto (de 60 a 90 días) y la vida útil de los equipos es de

10 a 15 años, la energía utilizada en la construcción de los equipos no es considerada (Chang Y, Ries RJ, Wang YW 2013). Este estudio tiene en cuenta el uso de la energía asociada con el transporte de materiales y combustibles para el pozo, en el que se incluye insumos como el cemento, casing y combustible diésel, además, que del uso de la energía operativa de equipos para la construcción de pozos de shale gas varía según el pozo, y se ve afectada por diversos factores, como la estructura geográfica, la profundidad de la perforación, y el acceso al agua. Para las emisiones de transporte se utiliza las distancias medias de los proveedores, para las emisiones atmosféricas asociadas con emisiones fugitivas de metano y quema se utilizaron los índices de emisiones fugitivas promedio y tasas de quema de US, teniendo en cuenta el contenido de metano del shale gas en China.

Límites

En este caso se mostrará una metodología aplicada en China, que se compone de cuatro grandes procesos: la preparación del “*well pad*”, perforación, cementación de pozo, fracturamiento hidráulico y completamiento. Durante la etapa de preparación “*well pad*” se tiene movimiento de tierras, nivelación, pavimentación de vías y la construcción de instalaciones; la perforación incluye la instalación de sistemas de perforación, elaboración de fluidos de perforación, circulación y gestión de un lugar para las personas; cementación incluye la aplicación de revestimiento y cemento; el fracturamiento hidráulico y completamiento consideran los impactos de los equipos de fracturación y manejo de flowback y gases fugitivos durante el completamiento. La figura 5 muestra los límites propuestos.

Figura 5: Límites de estudio de la metodología 2



Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

A continuación se muestra las etapas que se consideraron para la estimación de las emisiones en este estudio.

Preparación del “*well pad*”

Construcción del “*well pad*”

Según estándar nacional, el área del “*well pad*” es aproximadamente 5000 m² y se reexcava la vegetación hasta 20 cm de profundidad, como estas zonas de exploración están en áreas rurales, las zonas de disposición están a 5 Km, los suministros son comprados en las plantas más cercanas, las distancias se estiman con Google Earth en 50 km promedio, el sumidero debe ser construido de 2000 m³, para pozos de 5000 metros, en este caso, se necesitaron 182 toneladas de cemento, 310 toneladas de arena, 537 toneladas de grava, y 85 toneladas de agua y la distancia a las plantas de suministro es de 32 km aproximadamente.

Construcción de la carretera

Se repararon 2,8 km de carretera y se construyeron 65 m, se excavaron 20 cm y se pavimentaron 5 cm.

Construcción del embalse de agua

Se dispuso de un área de embalse de agua de 7000 m³. La parte inferior embalse fue cubierto por tela impermeable (2857 m², incluyendo 2% de residuos) para prevenir la contaminación del suelo.

Equipos y vehículos

Para el trabajo de construcción del “*well pad*”, se tiene en cuenta la productividad del equipo, referida al trabajo realizado (por ejemplo, el volumen de suelo removido por una excavadora) en una operación de los equipos con turnos de 8 horas. Para la construcción del embalse de disposición de residuos, se usa un generador diesel de 100 kW durante la construcción del fregadero de residuos. Las especificaciones del consumo de diésel para los vehículos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Consumo de energía de equipos y vehículos

Peso neto de vehículo (ton)	Consumo de diésel	
	(L/100km)	(kg/100km)
6-7	16,3	13,9
7-9	18,8	16,0
9-11	21,5	18,3
11-13	23,8	20,2
13-15	25,7	21,8
15-17	27,4	23,3
17-19	28,9	24,6

Peso neto de vehículo	Consumo de diésel	
	(ton)	(L/100km) (kg/100km)
19-21	30,2	25,7
21-23	31,4	26,7
23-25	32,5	27,6
25-27	33,5	28,5
27-29	34,5	29,3
29-31	35,5	30,2
31-32	36	30,6
>32	36	30,6
Promedio	24,9	21,2

Fuente: Huo et al, 2012.

Dado que el periodo de construcción es corto, la energía incorporada de los equipos no se consideró en este estudio. Para calcular el uso de energía necesaria para el uso de los equipos se hace en función del uso de los equipos durante toda la vida útil. En la tabla 8 se muestran las especificaciones de los equipos usados y la cantidad de energía consumida en cada turno de trabajo.

Tabla 8: Especificaciones de los equipos implementados durante la construcción del “*well pad*” metodología 2

Equipos	Especificaciones	Carga de	Productividad	Intensidad	Tipo de
		trabajo	(m ³ turno ⁻¹) ^a	de energía	energía
		(m ³)		(kg turno ⁻¹)	
Construcción del pad					
Excavadora	90kW	1000	776	59	Diésel
Cargador	2m ³ Cap. de carga	1000	380	65	Diésel

Equipos	Especificaciones	Carga de trabajo	Productividad	Intensidad de energía	Tipo de energía
		(m ³)	(m ³ turno ⁻¹) ^a	(kg turno ⁻¹)	
Camiones (eliminación de suelo)	8-ton, del Transporte	5km 1000	6,5m ³ /load	0,22kg/km	Diésel
Nivelador	120 kW	5000 m ²	1429 m ² turno ⁻¹	55	Diésel
Rodillo	15 ton	5000 m ²	7143 m ² turno ⁻¹	43	Diésel
Regadera camión	4000 Cap. litros	5000 m ²	5000 m ² turno ⁻¹	30	Diésel
Camiones (transporte grava)	8ton, de transporte	50km 380 ton	8 ton/Carga	0,22kg/km	Diésel
Construcción de la carretera					
Excavadora	90kW	78	776	59	Diésel
Cargador	2m ³ Cap carga	78	380	65	Diésel
Camiones (eliminación de suelo)	8-ton, del transport	5km 78	6,5m ³ /carga	0,22kg/km	Diésel
Nivelador	120kW	390 m ²	1429 m ² turno ⁻¹	55	Diésel
Rodillo	15ton	390 m ²	7143 m ² turno ⁻¹	43	Diésel
Camión de regar	4000 Cap. litros	390 m ²	5000 m ² turno ⁻¹	30	Diésel
Camiones (transporte grava)	8ton, de transporte	50km 30 ton	8 ton/Carga	0,218kg/km	Diésel

Equipos	Especificaciones	Carga de trabajo (m ³)	Productividad (m ³ turno ⁻¹) ^a	Intensidad de energía (kg turno ⁻¹)	Tipo de energía
Construcción de zona de residuos					
Camión (# 325 Cemento)	Cemento a granel camion, 32 km transporte	186 ton	10 Carga	ton/ 0,23kg/km	Diésel
Camiones (arena y grava)	8ton, 50km transporte	870 ton	8 ton/ Carga	0,22kg/km	Diésel
Hormigonera	1500 litros	446,5	75 m ³ /h	24kWh	Electricidad
Bombas hormigón	de 80m ³ /h	446,5	80 m ³ /h	58kWh	Electricidad
Reparación del camino					
Nivelador	120kW	16800 m ²	1429 turno ⁻¹	m ² 55	Diésel
Rodillo	15ton	16800 m ²	7143 turno ⁻¹	m ² 43	Diésel
Construcción del embalse					
Excavadora	1.25m ³ carga	Cap. 7000	571	54	Diésel
Cargador	2m ³ cap. carga	7000	380	65	Diésel
Camión	8-ton, 5km transporte	7000	6,5m ³ / Carga	0,22kg/km	Diésel

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Estimación de las emisiones

Para esta metodología se utilizaron los factores de emisión de la EPA AP-42 tabla 9, para estimar las emisiones de cada contaminante producido en las operaciones de los equipos. Sólo las emisiones de SO_x (es decir, no SO₂) por millón de unidades térmicas británicas (MMBtu) de uso de combustible fueron listadas en el manual de la AP-42, por lo tanto, los factores de emisión de SO₂ de diesel y gasolina de motores industriales se estimaron en 90% del total de emisiones de SO_x.

Tabla 9: Factores de emisión de la EPA AP-42 1995.

Contaminante	Diésel	
	Factor emisión (lb/hp-hr) (power output)	Factor emisión (lb/MMBtu) (fuel input)
NO _x	0,031	4,41
CO ₂	1,15	164
SO _x	2,05 E-03	0,29

Fuente: EPA AP-42 1995.

A continuación se muestra un ejemplo de los respectivos cálculos

Nota: Cabe resaltar que en la metodología propuesta por Yuan Chang 2014 no hay ejemplos de cálculos sin embargo, se buscó la información necesaria en otras fuentes para hacer un ejemplo de los cálculos y obtener los resultados propuestos en esta metodología. A continuación se realizará un ejemplo de cálculo para las emisiones producidas por el Buldócer.

- ❖ Mediante el poder calorífico del diésel la ecuación 22 muestra el cálculo de cuanta energía genera el combustible gastado por el Buldócer.

$$Energía = \frac{43 \text{ MJ}}{\text{Kg}} * 80 \text{ Kg diesel} * \frac{0,943 * 10^{-3} \text{ MMBTU}}{1 \text{ MJ}} = 3,24 \text{ MMBTU} \quad (22)$$

- ❖ La ecuación 23 muestra el cálculo para convertir la energía utilizada a potencia de salida EPA AP – 42.

$$Potencia\ de\ salida = \frac{3,24\ MMBTU}{7000\ \frac{BTU}{hp-hr}} = 462,85\ hp - hr\ (23)$$

- ❖ La ecuación 24, 25 y 26 muestran el cálculo de las emisiones para cada componente estudiado.

$$Emisiones\ NO_x = \frac{0,031\ lb}{hp - hr} * 462,85\ hp - hr * \frac{1kg}{2,2\ lb} = 6,53\ kg\ aprx\ 7kg\ (24)$$

$$Emisiones\ SO_x = \frac{2,05 * 10^{-3}\ lb}{hp - hr} * 462,85\ hp - hr * \frac{1kg}{2,2\ lb} = 0,43\ kg\ aprx\ 0,4\ kg\ (25)$$

$$Emisiones\ CO_2 = \frac{1,15\ lb}{hp - hr} * 462,85\ hp - hr * \frac{1kg}{2,2\ lb} = 242\ kg\ (26)$$

En la tabla 10 se muestran las emisiones de SO₂ (kg), NO_x (kg), CO₂ (kg) para cada uno de los equipos.

Tabla 10: Emisiones debidas a los equipos usados en la construcción del “well pad” metodología 2

Equipo	Tipo de Energía	Consumo (kg)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	CO ₂ (kg)
Buldócer cargador	Diesel	80	0,4	7	250
Camiones (eliminación del suelo)	Diesel	2700	13	220	8220
Camión de cemento granel	Diesel	260	1	20	770
Camión Diésel (100kW)	Diesel	120	0,6	10	360
Nivelador	Diesel	850	4	70	2570

Equipo	Tipo de Energía	Consumo (kg)	SO₂ (kg)	NO_x (kg)	CO₂ (kg)
Rodillo	Diesel	130	0,6	10	400
Camión de regar	Diesel	30	0,2	2	90
Camiones (transporte de grava)	Diesel	3460	17	280	10400
Excavadora	Diesel	660	3	50	2000
Total^a		10000	50	800	30000

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Emisiones del taladro de perforación

Taladro de perforación

La longitud del pozo es de 4000 m y la plataforma de perforación es impulsada por tres generadores de 1200 kW (potencia) diesel. Sin embargo, dado que el poder real de una bomba de la perforación es de aproximadamente 66% de la potencia y la bomba de perforación y malacate no operan simultáneamente, el poder real de la plataforma de perforación se supone que es 2400 kW.

Fluidos de perforación

En este caso se usaron 3 tipos de fluidos de perforación, lodos base agua, lodos base aceite y aire comprimido, para un pozo de 4000 m tiene como mínima capacidad 180 m³ circulando y 80m³ en los tanques. Para los fluidos base agua el principal aditivo es la bentonita y en este caso se utilizaron 13 toneladas y el consumo de agua fue de 290 m³. Posteriormente para una operación, se utilizaron otras 11 toneladas de bentonita lo cual suma 24 toneladas totales. Para los fluidos base aceite se tuvieron en cuenta las emisiones producto del transporte de los principales aditivos, Cal y CaCl₂. Este pozo necesito 727 m³ de lodo base aceite, para el cual el contenido estimado fue de 432 toneladas de diesel, 218 toneladas de agua, 54 toneladas de cal, y 80 toneladas de CaCl₂.

Recortes de perforación

El total de recortes se estimó en 8 toneladas y se desplazó 5 Km para su disposición. En las tablas 11 y 12 se detallan los camiones necesarios para el transporte de bentonita, aditivos y recortes de perforación y los resultados de las emisiones producto de transporte. Para los contaminantes, se tomaron los factores de la EPA y la estructura de los cálculos es la misma implementada en la estimación de emisiones producto de la construcción y adecuación del “*well pad*”.

Tabla 11: Especificaciones de los equipos usados en transporte de aditivos metodología 2.

Equipo	Especificaciones	carga (ton)	Intensidad de energía (kg/km)	Tipo de energía
Camión (bentonita)	8-ton, transporte	20km 24	0,22	Diésel
Camión (lime and CaCl ₂)	8-ton, transporte	46km 138	0,22	Diésel
Camión (Disposición de cutting)	8-ton, transporte	5km 270	0,22	Diésel

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Tabla 12: Emisiones de los equipos usados en transporte de aditivos metodología 2

Equipo	Tipo de energía	Consumido (kg)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	CO ₂ (kg)
Camión (bentonita)	Diésel	30	0,1	2	80
Camión (Limo y CaCl ₂)	Diésel	360	2	30	1090
Camión (Disposición de cutting)	Diésel	75	0,4	6	220
Total^a		470	2,5	40	1400

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Equipo de circulación

En términos de una plataforma de perforación 4000m, el equipo pertinente incluye, principalmente, la zaranda (2 juegos), desarenador, desarenador barro, desgasificador, centrifugadora, tanque de lodo, y el tanque de la circulación, se utilizaron seis bombas de agua de 37 kW (5m³ / minuto), cuatro fueron utilizados en la fracturación hidráulica, y dos fueron utilizados para bombear agua de un río cercano al embalse de agua. En la tabla 13 se muestran las especificaciones de los equipos.

Tabla 13: Especificaciones de equipos de circulación metodología 2

Equipo	Requerimientos estándar	Potencia(kW)
Shale shaker (2 set)	Productividad no menos de 182 m ³ /hora	3,73
Des-arenador Integrado y des-arenador de lodo	Productividad no menos de 182 m ³ /hora	3,73
Des-gasificador	Productividad no menos de 182 m ³ /hora	60,5
Centrífuga	Productividad 40 m ³ /hora; Separación de partículas 5µm-7µm	27,5
Bombas	Bombas de desplazamiento 155m ³ /h; Elevación de la bomba 32 m	55
Bombas de arena	Bombas de desplazamiento 200m ³ /h; Elevación de la bomba 36 m	55

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Gestión y vivienda en las instalaciones

En esta etapa se consideran las emisiones derivadas de las instalaciones para las actividades cotidianas tales como alumbrado, cocinar y consumo de agua. Basado en lo anterior se consideran las emisiones de generación de electricidad y bombas. El total de agua gastada fueron 480 toneladas, dado que la demanda total de electricidad es de 533 kW, uno de 350 kW y uno diesel de 200 kW. La tasa de consumo de diesel se estimó en 206g / kWh. Para el Wei201-1, el tiempo de perforación neta fue de 260 horas, la cementación, el mantenimiento y la

terminación con tiempo neto de 1170 horas, y el tiempo neto fracturación hidráulica era 30 horas. El tiempo total de la perforación del pozo fue de 74 días. El consumo y las emisiones del sistema de generador diesel de energía estimada se muestran en la tabla 14.

Tabla 14: Emisiones totales de la etapa de perforación y las sub-etapas metodología 2

Trabajo	Equipo	Potencia a carga (kW)	Operación ^a (hora)	Diésel (kg)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	CO ₂ (kg)
Perforación	Generadores diésel (3600 kW potencia nominal; 2400kW Poder practico)	2400	260	128300	620	10400	385700
Circulación de fluidos+ Administración+ living	Generadores diésel (350 kW 1 grupo)	311	260	18700	90	1500	56200
Administración + living + Transporte de agua (7000 m ³ en el embalse)	Generadores diésel (200 kW 1 grupo)	176	8	340	2	30	1000
Administración + Vivir (Incluye el transporte de agua de perforar, agua para el cemento y agua para vivir)	Generadores diésel (200 kW 1 grupo)	102	1480	60900	290	4900	183200
Administración + Vivir +transporte de agua + Fracturamiento + Procesamiento de flowback	Generadores diésel (350 kW 1 set; 200 kW 1 grupo)	533 ^b	30	3400	20	300	10200
Total^c				212000	1000	17000	636000

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Cementación de pozos

Casing

Para el casing se estima el peso, en este caso, 4,7 toneladas de casing de superficie, 32 toneladas de casing intermedio, y 121 toneladas de revestimiento de producción, el cual es trasladado 170 Km.

Cemento

El consumo total de lechada de cemento se calculó 55m³ y el consumo de cemento y agua se estima en 79 toneladas y 30 toneladas respectivamente la cual se transporta 160 km.

Vehículos

Se implementaron equipos de 40 toneladas y uno especial para la cementación. Las especificaciones y las respectivas emisiones se muestran en la tabla 15 y 16.

Tabla 15: Equipos implementados en la cementación de pozos metodología 2

Equipo	Especificaciones	Carga de trabajo	Productividad	Intensidad de energía	Tipo de energía
Camión (Casings)	40-ton, superficie plana, transportado 170 km	158 ton	40 ton carga ⁻¹	0,31kg/km	Diésel
Camión (Cemento clase D)	Tanques con cemento, transportado 160 km	80 ton	10 ton carga ⁻¹	0,23kg/km	Diésel
Camión de cementación	Contribución energía 336kW	de 55 m ³	1,64 ^a m ³ /min	31,3 ^b kg diésel/h	Diésel

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Tabla 16: Emisiones de los equipos usados en la cementación de pozos metodología 2

Equipo	Tipo de energía	Consumo (kg)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	CO ₂ (kg)
Camión (Casings)	Diésel	420	2	35	1250

Camión (Cemento clase D)	Diésel	600	3	50	1800
Camión de cementación	Diésel	20	0,1	1	50
Total	Diésel	1040	5	90	3100

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Fracturamiento hidráulico

Preparación de la fractura

Para este caso, el tiempo neto de fracturamiento fue 1817 minutos, fracturando el consumo de líquidos era 23655 m³, el consumo de arena era 960 toneladas (4% de tasa de residuos), y 11 etapas de fracturamiento. La potencia total de la flota de fracturamiento era 34000hp, y la flota de fracturación se estimó para incluir 17 autobombas, 2 camiones, 1 mezcladora de fracturamiento y 2 camiones múltiples, las especificaciones se muestran en la tabla 17.

Tabla 17: Especificaciones de los equipos usados en el fracturamiento hidráulico metodología 2

Equipo	tipo	Potencia del motor diésel (kW)
Bomba	SYL2000Q-105	1680
Mezcladora	SHS 10	410
Monitoreo	SYQ2000	12,4 (Generador diésel)
Camión colector	SYG 140	-

Equipo	Especificaciones	Carga de trabajo	Productividad	Intensidad de energía	Tipo de energía
Camión (transporte de arena)	8ton, transport	50km 1000 ton	8 ton/load	0,22 kg/km	Diesel

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

En la tabla 18 se muestran las especificaciones de los equipos y las emisiones generadas.

Tabla 18: Emisiones de los equipos usados en el fracturamiento hidráulico metodología 2

Equipo	Potencia de practica (kW)	Operaciones (hora)	Consumo de diésel (kg)	SO₂ (kg)	NO_x (kg)	CO₂ (kg)
Bomba	19050 ^a	30,28	139000	670	11240	418000
Mezcladora	547 ^a	30,28	4000	20	320	12000
Monitoreo	12,4	30,28	80	0,4	6	230
Total			143000	700	11600	430200

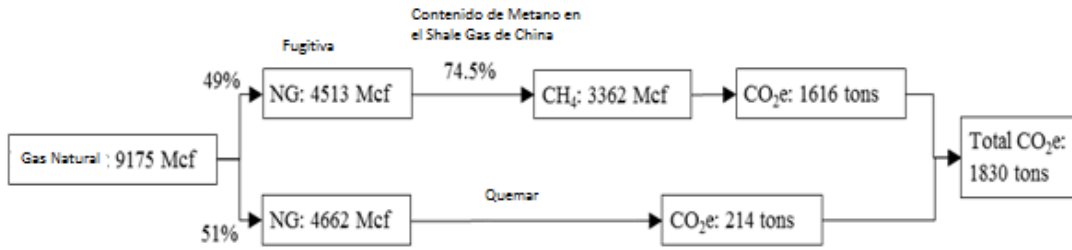
Equipo	Tipo de energía	Consumo(kg)	SO₂ (kg)	NO_x (kg)	CO₂ (kg)
Camión	Diésel	2730	13	220	8200

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Completamiento

Las emisiones debidas al completamiento se estimaron en 9175 Mcf y el 51% de las emisiones (4,662 Mcf) es quemado. En China, el contenido de metano se estima en el 74,5%. Se supone que el metano liberado durante completamiento del pozo se quema, ya sea con una eficiencia de combustión de 98% o ventilado sin recuperación. La proporción promedio de venteo: quema en EEUU es 51% a 49% como se observa en la figura 6. No se consideraron reacondicionamientos probable en el futuro, lo que significa que una producción existente no será estimulada para el propósito de restaurar, prolongar o aumentar la producción de gas de esquisto.

Figura 6: Especificaciones de la quema de las emisiones metodología 2



Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

Emisiones por transporte de diésel

Se requiere transportar el diésel al lugar. Éste incluye el usado en los lodos base aceite, en total 790 toneladas, se supuso que un tanque de 45000 litros (38 toneladas diesel) fue utilizado para transportarlo, las especificaciones y emisiones se muestran en la tabla 19.

Tabla 19: Emisiones debidas al transporte de diésel metodología 2

Equipo	Tipo de energía	Consumo(kg)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	CO ₂ (kg)
Camión	Diésel	64	0,3	5	190

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

En resumen la tabla 20 muestra las emisiones totales que se tuvieron al implementar la metodología propuesta por Yuan Chang et al, 2014.

Tabla 20: Resumen de las emisiones metodología 2

Procesos en el pozo	Diésel (ton)	SO ₂ (ton)	NO _x (kg)	CO ₂ (ton)	CH ₄ (ton)	CO ₂ e (ton)	Agua usada (ton)
Preparación del "well pad"	10	0,05	0,8	30	-	30	85
Perforación	644,1	1,02	17,1	640	-	640	1240
			5				
Cementación	1	0,00	0,08	3	-	3	30
		5					

Fracturamiento hidráulico y completamiento	145,8	0,7	11,7	640	70	239	23650
Total^a	800,9	1,78	29,8	130	70	306	25000
				0		0	

Fuente: Yuan Chang et al, 2014.

2.2.3 ANALISIS DE METODOLOGIA 3 / 4

GENERALIDADES

Esta metodología describe un inventario de emisiones atmosféricas, que incluye estimaciones de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), y las partículas finas primarias (diámetro aerodinámico ≤2.5 micra PM 2,5). Para la incertidumbre en los datos de actividad y de emisión, el autor utilizó un método de Monte Carlo para desarrollar distribuciones de estimaciones de emisiones. El proceso lo repitió 20000 veces para calcular una distribución de las estimaciones de emisión para una fuente o actividad determinadas.

Las emisiones asociadas con el desarrollo del pozo (por ejemplo, los equipos de perforación) dependen del número de pozos perforados. Las emisiones asociadas a la producción de gas dependen de la cantidad acumulada de los pozos productores, y las emisiones de la etapa intermedia dependen del volumen total de gas producido.

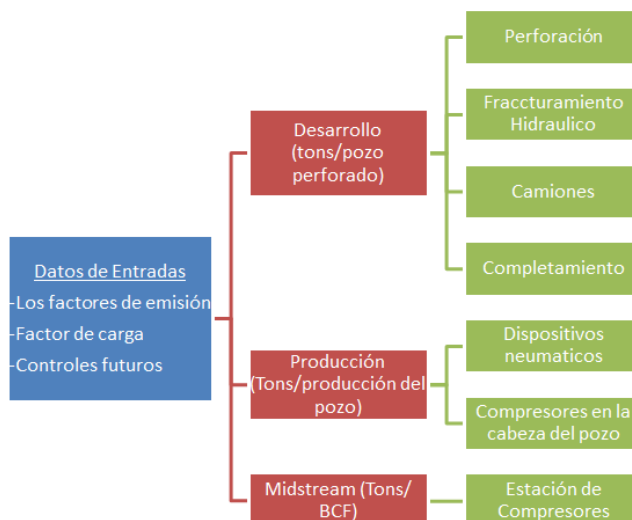
LÍMITES DE ESTUDIO

El inventario de emisiones atmosféricas fue desarrollado para el shale de Marcellus para estimar las emisiones de NO_x, COV y PM_{2,5} en Pennsylvania, Nueva York y Virginia Occidental, que abarca un área de la cuenca de 95000 kilómetros cuadrados. Se calcula que contiene entre 1,2 y 4,1 billones m³ de gas natural técnicamente recuperable (US Geological Survey [USGS], 2008).

La figura 7 muestra el esquema de los límites de estudio considerados en esta metodología, abarcando durante el desarrollo la perforación, el fracturamiento

hidráulico, camiones y completamiento, en la producción, los dispositivos neumáticos y los compresores en la cabeza de pozo y, finalmente, durante el midstream, se analizó la estación de compresores.

Figura 7: Límites de estudio para la metodología 3



Fuente: Anirban A. Roy et al 2013.

A continuación se muestra las etapas que se consideraron para la estimación de las emisiones en este estudio.

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES POR ETAPA

Para calcular los contaminantes en cada una de las etapas planteada por esta metodología se debe tener en cuenta la información de la Tabla 21 que hace referencia a los factores de emisión para las principales fuentes para el año 2009, y la Tabla 22 contiene los valores de los parámetros de entrada de las principales fuentes y los factores de emisión proyección para el año 2020.

El autor plantea ecuaciones lineales para calcular los contaminantes en cada una de las etapas. Para determinar los valores de los parámetros se basó en datos de la literatura, entrevistas con expertos, e inventarios de emisión de la EPA.

Adicionalmente, realizó distribuciones triangulares para aquellos valores en los que no disponía de mucha información.

Tabla 21: Factores de emisión utilizados en la metodología 3.

Source	Pollutant	Mean	Range (Min–Max)	Comments
Drill rigs (g bhp ⁻¹ hr ⁻¹)	NO _x	5.8	2.5–10	Heavy-duty diesel engines of similar rating (500–1500 hp) (locomotives and generators) ^a
	PM _{2.5}	0.35	0.07–1	
	VOCs	0.6	0.25–1.6	
Frac pumps (g bhp ⁻¹ hr ⁻¹)	NO _x	5.7	2.5–10	Heavy-duty diesel engines of similar rating (1000–1500 hp) (locomotives and generators) ^b
	PM _{2.5}	0.4	0.09–0.9	
	VOCs	0.67	0.3–1.6	
Trucks (g mile ⁻¹)	NO _x	50	9–90	Heavy-duty truck emission factors from literature ^c
	PM _{2.5}	0.32	7 × 10 ⁻⁴ to 1.3	
	VOCs	1.7	0.2–10	
Compressor stations (g bhp ⁻¹ hr ⁻¹)	NO _x	1.5	0.5–2.0	Data from PADEP ^d
	PM _{2.5}	0.014	2.5 × 10 ⁻⁴ to 4 × 10 ⁻²	
	VOCs	0.46	0.1–1.8	
Condensate tanks (lb bbl ⁻¹)	NO _x	n/a	n/a	Data from Barnett Shale and CENRAP basins used as surrogate (Armendariz, 2009; Bar-Ilan et al., 2008; Hendler et al., 2009)
	PM _{2.5}	n/a	n/a	
	VOCs	29	0.7–215	

Notes: ^aEPA's AP-42, Shah et al. (2006), Chen et al. (2003). ^bShah et al. (2006), Chen et al. (2003), Sawant et al. (2007), Comer et al. (2010). ^cFHWA (2011), Ban-Weiss et al. (2008), Prucz et al. (2001), Zhu et al. (2011), Shah et al. (2006), Johnson et al. (2009), Mazzoleni et al. (2007), Clagget and Houk (2008), Choi and Frey (2010). ^dPersonal communication with Naishadh Bhatt, nabhatt@pa.gov.

Tabla 22: Parámetros de entrada para la metodología 3.

Source	Parameter	Range (Min–Max)	Mean	Comments
Drill rig	Horsepower (hp)	2000–7000	4260	Personal communication with PADEP (Chris Tersine, NYDEC (Leon Sedefian), and EQT Corporation (Andrew Place) ^f
	Load factor	0.25–0.9	0.57	Texas drill rigs used as surrogate (Baker and Pring, 2009)
	Engine on-time	0.2–1	0.5	CENRAP values as surrogate (Bar-Ilan et al., 2008)
	Drilling time (days)	14–35	26	PADEP (Chris Tersine), NYDEC (Leon Sedefian), and WVGES (Megan Murphy) ^b
	Control factors			Ignition timing retard and selective catalytic reduction for NO _x , diesel particulate filters for PM, diesel oxidation catalysts for VOCs (USEPA Tier 4 standards, 2004)
	NO _x	0.1–0.96	0.44	
	PM _{2.5}	0.6–0.97	0.81	
	VOCs	0.6–0.97	0.81	
	Cumulative % fleet turnover	50–100	76	USEPA Tier 4 (2004), Chesapeake Energy Corporation ^c
	Fracing	Number of stages		
2009		4–35	19	
2020		10–35	25	
Horsepower/stage		35000–45000	40000	Chesapeake Energy Corporation
Emission control factors				Same controls as drill rigs
NO _x		0.1–0.96	0.44	
PM _{2.5}		0.6–0.97	0.81	
VOCs		0.6–0.97	0.81	
Trucks	Cumulative % fleet turnover	50–100	76	NONROAD scrappage curve
	Truck trips/well			Jiang et al. (2011).
	Development	295–1215	661	
	Wastewater	200–1125	460	
	Distance per trip (miles)			Jiang et al. (2011), US National Park Service (2009)
	Distribution center to well (development)	0–20	9.9	
	Well to wastewater disposal facility	3–280	119	
	Emission control factors			NO _x adsorber and SCRs for NO _x , DPF for PM, and DOC for VOCs (EPA Clean Diesel Rule)
	NO _x	0.7–0.95	0.85	
	PM _{2.5}	0.6–0.99	0.8	
Completion	VOCs	0.3–0.99	0.8	
	Emission factors (MCF/well)	(18–24) × 10 ³	3700	Bar-Ilan et al. (2008), Armendariz (2009); CENRAP and Barnett Shale data as surrogate
	Mole Fraction of VOCs in gas			Chesapeake Energy Corporation
	Dry gas	5.9 × 10 ⁻³ to	0.034	
	Wet gas	0.064	0.25	
	Control factors (VOCs)	0.17–0.33	0.84	Green completion (Bar-Ilan et al., 2007)
Compressor stations	hp/BCF/day	125–145	135	PADEP, Considine (2010)
	Load factor	0.4–0.8	0.6	Data from DNREC (Robert Clausen), Burdlin and Heaney (2005)
	Emission control factors			Selective and nonselective catalytic reduction
	NO _x	0.15–0.95	0.5	
	VOCs	0.3–0.95	0.6	
Condensate	Control factors (VOCs)	0.6–0.97	0.73	Flaring, vapor recovery units (Bar-Ilan et al., 2007)

Notes: ^actersine@state.pa.us; ^blxsedefi@gw.dec.state.ny.us; ^caplac@eqt.com. ^dhttp://www.chk.com/Affiliates/Chesapeake-Oilfield-Services/Documents/COO_Annual_Report.pdf. ^eE-mail from Grover R. Campbell, Manager Regulatory Affairs, Air Regulations, Chesapeake Energy Corporation, to Michael E. Hopkins, Assistant Chief, Permitting Ohio EPA (May 16, 2011, 11:31 a.m. EST).

Etapas durante el desarrollo

Perforación

Un equipo de perforación tiene de 5 a 7 motores de encendido por compresión diésel independientes, cada uno clasificado entre los 500 y 1500 caballos de fuerza de frenado (CV). Estos motores son fuentes importantes de NOx y PM2,5. Los motores accionan las obras de drenaje, bomba de lodo y generadores de electricidad. La ecuación 27 es propuesta por el autor para realizar el cálculo de las emisiones para el 2009 y la ecuación 28 la proyección para el año 2020.

Para el año 2009

$$E_{drilling} = EF_1 * HP * LF_{average} * t_{drilling} * \% \text{ on - time } \dots (27)$$

EF_1 : Factor de emisión de un motor de equipo de perforación para el contaminante i

HP : Potencia combinada de todos los motores de la plataforma

$LF_{average}$: Factor de carga o fracción de la potencia total que se utiliza

$t_{drilling}$: Tiempo de perforar un pozo

$\% \text{ on - time}$: Tiempo que el equipo de perforación opera en realidad

A continuación a partir de la ecuación 27, y los datos de la tabla 21 y 22 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante, durante la etapa de perforación para el años 2009 y con la ecuación 28, y los datos de la tabla 22 se presenta un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante para el año 2020.

$$E_{drilling} NO_x = \frac{5,8 \text{ g}}{Hp * hora} * 4260 \text{ Hp} * 0,57 * 26 \text{ dias} * 0,5 * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1x10^{-6} \text{ ton}}{g} = \frac{4,39 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{drilling} PM_{2.5} = \frac{0,35 \text{ g}}{Hp * hora} * 4260 \text{ Hp} * 0,57 * 26 \text{ dias} * 0,5 * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1x10^{-6} \text{ ton}}{g} = \frac{0,26 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{drilling} VOC_s = \frac{0,6 \text{ g}}{Hp * hora} * 4260 \text{ Hp} * 0,57 * 26 \text{ dias} * 0,5 * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} * \frac{1x10^{-6} \text{ ton}}{g} = \frac{0,45 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

Para el año 2020

$$EF_i(2020) = EF_i(2009) * [f_{replaced}(1 - f_{control}) + 1 - f_{replaced}] \dots \dots (28)$$

$EF_i(2020)$: Es la proyección de distribución de los factores de emisión para el 2020

$EF_i(2009)$: Es la distribución de los factores de emisión para el 2009

$f_{replaced}$: Representa la fracción acumulativa de los equipos que han sido remplazados

$f_{control}$: Representa la fracción de reducción de emisiones debido al cambio de los equipos

$$E_{drilling} NO_x = \frac{4,39 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,44) + 1 - 0,76] = \frac{2,92 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{drilling} PM_{2.5} = \frac{0,26 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,81) + 1 - 0,76] = \frac{0,1 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{drilling} VOC_s = \frac{0,45 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,81) + 1 - 0,76] = \frac{0,172 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

Fracturamiento Hidráulico

La potencia de las Bombas accionadas por los motores se encuentra entre 1000-1500 hp diésel. Por lo general, hay de 8-10 bombas por pozo. Aproximadamente cada 100 metros se realizan las líneas laterales, a través del cual se bombea fluido de fracturamiento. Típicamente, hay de 5-35 etapas por pozo.

Para el 2009

$$E_{fracing} = EF_1 * HP * LF_{average} * N_{stages} \dots (29)$$

EF_1 : Factor de emisión del motor de la bomba

HP : Potencia – hora combinada necesaria para la etapa de fractura

$LF_{average}$: Factor de carga media del motor de la bomba

N_{stages} : Número total de etapas

A continuación, a partir de la ecuación 29, y los datos de la tabla 21 y 22 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones para el año 2009. Con la ecuación 28 y los datos de la tabla 22 se presenta un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante para el año 2020.

$$E_{fracingNO_x} = \frac{5,7 \text{ g}}{Hp * hora} * \frac{40000 \text{ Hp} * hora}{etapa} * 0,5 * 19 \text{ etapas} * \frac{1x10^{-6} \text{ ton}}{g}$$

$$= \frac{2,16 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{fracingPM2.5} = \frac{0,4 \text{ g}}{Hp * hora} * \frac{40000 \text{ Hp} * hora}{etapa} * 0,5 * 19 \text{ etapas} * \frac{1x10^{-6} \text{ ton}}{g}$$

$$= \frac{0,152 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{fracingVOC_s} = \frac{0,67 \text{ g}}{Hp * hora} * \frac{40000 \text{ Hp} * hora}{etapa} * 0,5 * 19 \text{ etapas} * \frac{1x10^{-6} \text{ ton}}{g}$$

$$= \frac{0,25 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

Para el 2020

$$E_{fracingNO_x} = \frac{2,85 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,44) + 1 - 0,76] = \frac{1,89 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{fracingPM2.5} = \frac{0,2 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,81) + 1 - 0,76] = \frac{0,0768 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{fracingVOC_s} = \frac{0,335 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,81) + 1 - 0,76] = \frac{0,1287 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

Camiones

Los camiones se usan para transportar equipos de perforación y fracturamiento, productos químicos y agua, durante el desarrollo del pozo, así mismo, transporte de aguas residuales. Estos camiones son típicamente tractor trailers (USDOE 2009).

Para el 2009

$$E_{traffic} = EF_1 * L_{trip} * N_{trip} \dots \dots (30)$$

EF_1 : Factor de emisiones de camiones de un contaminante i

L_{trip} : Distancia por viajes

N_{trip} : Número de viajes

A continuación a partir de la ecuación 30, y los datos de la tabla 21 y 22 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante en el 2009, con la ecuación 28, y los datos de la tabla 22 se presenta un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante para el año 2020.

$$E_{trafficNO_x(Desarrollo)} = \frac{50 \text{ g}}{\text{milla}} * \frac{10 \text{ millas}}{\text{viaje}} * \frac{661 \text{ viaje}}{\text{pozo}} * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{\text{g}} * 2 = \frac{0,661 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{trafficNO_x(Agua residual)} = \frac{50 \text{ g}}{\text{milla}} * \frac{119 \text{ millas}}{\text{viaje}} * \frac{460 \text{ viaje}}{\text{pozo}} * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{\text{g}} * 2 = \frac{5,474 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

- $E_{totales} = E_{trafficNO_x(Desarrollo)} + E_{trafficNO_x(Agua residual)} = \frac{6,13 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$

$$E_{trafficPM_{2,5}(Desarrollo)} = \frac{0,32 \text{ g}}{\text{milla}} * \frac{10 \text{ millas}}{\text{viaje}} * \frac{661 \text{ viaje}}{\text{pozo}} * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{\text{g}} * 2 = \frac{0,0042 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{trafficPM_{2,5}(Agua residual)} = \frac{0,32 \text{ g}}{\text{milla}} * \frac{119 \text{ millas}}{\text{viaje}} * \frac{460 \text{ viaje}}{\text{pozo}} * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{\text{g}} * 2 = \frac{0,035 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

- $E_{totales} = E_{trafficPM_{2,5}(Desarrollo)} + E_{trafficPM_{2,5}(Agua residual)} = \frac{0,039 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$

$$E_{trafficVOC_s(Desarrollo)} = \frac{1,7 \text{ g}}{\text{milla}} * \frac{10 \text{ millas}}{\text{viaje}} * \frac{661 \text{ viaje}}{\text{pozo}} * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{\text{g}} * 2 = \frac{0,022 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{trafficVOC_s(Agua residual)} = \frac{1,7 \text{ g}}{\text{milla}} * \frac{119 \text{ millas}}{\text{viaje}} * \frac{460 \text{ viaje}}{\text{pozo}} * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{\text{g}} * 2 = \frac{0,186 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

- $E_{totales} = E_{trafficVOC_s(Desarrollo)} + E_{trafficVOC_s(Agua residual)} = \frac{0,208 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$

Para el 2020

$$E_{traff\text{ic}} NO_x = \frac{6,13 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,85) + 1 - 0,76] = \frac{2,72 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{traff\text{ic}} PM_{2.5} = \frac{0,039 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,8) + 1 - 0,76] = \frac{0,015 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{traff\text{ic}} VOC_s = \frac{0,208 \text{ ton}}{\text{pozo}} * [0,76 * (1 - 0,8) + 1 - 0,76] = \frac{0,079 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

Completamiento

El pozo se ventila para eliminar los residuos, líquidos y gases inertes utilizados para estimular la producción de gas. Este procedimiento se llama completamiento (también llamado flujo de retorno); puede ser una fuente importante de compuestos orgánicos volátiles, especialmente para pozos de gas húmedo (gas con cantidades significativas de hidrocarburos de alto peso molecular).

Para el 2009

$$E_{\text{Completion}} = \rho_{\text{gas}} * v * f_i \dots (31)$$

ρ_{gas} : Densidad de masa del gas

v : Volumen del gas ventilado por pozo

f_i : Fracción de masa de los COV

A continuación a partir de la ecuación 31, y los datos de la tabla 21 y 22 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de VOC_s , con la ecuación 28, y los datos de la tabla 22 se presenta un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de VOC_s para el año 2020.

$$E_{\text{Completion}} VOC_s(\text{Gas Seco}) = \frac{19,23g}{ft^3} * 3700 \times 10^3 ft^3 * 0,034 * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{g} = \frac{2,41 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

$$E_{\text{Completion}} VOC_s(\text{Gas Húmedo}) = \frac{19,23g}{ft^3} * 3700 \times 10^3 ft^3 * 0,25 * \frac{1 \times 10^{-6} \text{ ton}}{g} = \frac{17,78 \text{ ton}}{\text{pozo perf}}$$

Para el 2020

$$E_{Completion\ VOC_S\ (Gas\ Seco)} = \frac{2,41\ ton}{pozo} * [0,76 * (1 - 0,84) + 1 - 0,76] = \frac{0,87\ ton}{pozo\ perf}$$

$$E_{Completion\ VOC_S\ (Gas\ Húmedo)} = \frac{17,78\ ton}{pozo} * [0,76 * (1 - 0,84) + 1 - 0,76] = \frac{6,42\ ton}{pozo\ perf}$$

Producción

Dispositivos Neumáticos

Debido a que los dispositivos neumáticos operan con gas comprimido, puede ser una fuente de compuestos orgánicos volátiles. Las emisiones típicamente dependen del tipo y número de dispositivos (controladores, válvulas etc).

Para el año 2009

$$E_{pneumatics} = f * \left(\sum V_i * N_i * t_{annual} \right) * \frac{P}{\frac{RT}{MW_{gas}}} \dots \dots (32)$$

f: Fracción de masa de COV

V_i: Tasa de desgaste volumetrico del dispositivo

N_i: Número total de dispositivos

t_{annual}: Número total de horas de actividad

P: Presión

R: Contante universal de los gases

T: Temperatura atmosférica

MW_{gas}: Peso molecular del gas producido

Para realizar los cálculos fue necesario buscar en la literatura la composición del Gas, para posteriormente, calcular el peso molecular del gas producido, ver tabla 23.

Tabla 23: Composición del gas comprimido empleado en los dispositivos neumáticos.

Componentes	Fracción másica (y _i)	Peso Molecular	y _i * PM		
CH ₄	0,783	16	12,528		
N ₂	0,0177	28	0,4956		
CO ₂	0,0151	44	0,6644		
H ₂ S	0,005	34	0,17		
H ₂ O	0,0012	18	0,0216		
VOCs	0,178	C ₂ H ₆	0,1	30	3
		C ₃ H ₈	0,05	44	2,2
		C ₄ H ₁₀	0,02	58	1,16
		C ₅ H ₁₂	0,008	72	0,576
Peso Molecular del Gas				20,81 g/mol	

Fuente: Anjuman shahriar et al, life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas: a probabilistic approach, springer Abril del 2014.

La tabla 24 muestra el número de dispositivos neumáticos y las tasas de desgaste.

Tabla 24: Parámetros de ingreso para el cálculo de los dispositivos neumáticos.

Tipo De Dispositivo	Número de dispositivos	Tasa de desgaste SCF hr ⁻¹
Controlador de nivel de líquido	2	31 (2009)- 6 (2020)
Regulador de presión	1	17 (2009)- 6 (2020)

Fuente: Información complementaria Anirban A. Roy et al 2013.

A continuación a partir de la ecuación 32, y los datos de la tabla 21, 22, 23 y 24 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante para el año 2009, con la ecuación 28, y los datos de la tabla 22, 23 y 24 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de VOC_s para el año 2020.

$$E_{pne-secoVOCs} = 0,034$$

$$* \left(\frac{31scf}{dis * h} * \frac{28,31l}{scf} * 2dis * 8760h + \frac{17scf}{dispo * hora} * \frac{28,31l}{scf} * 1dis * 8760h \right)$$

$$* \frac{1atm}{\frac{0,082L*atm}{mol*k} * 298 K} * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = 0,5 \frac{ton}{producción de pozo}$$

$$\begin{aligned}
E_{pne-Humedo}VOC_S &= 0,25 \\
&* \left(\frac{31scf}{dis * h} * \frac{28,31l}{scf} * 2dis * 8760h + \frac{17scf}{dispo * hora} * \frac{28,31l}{scf} * 1dis * 8760h \right) \\
&* \frac{1atm}{\frac{0,082l*atm/mol*k*298 K}{20^g/mol}} * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = 4,0 \frac{ton}{producción de pozo}
\end{aligned}$$

Para el 2020

$$\begin{aligned}
E_{pne-seco}VOC_S &= 0,034 \\
&* \left(\frac{6scf}{dis * h} * \frac{28,31l}{scf} * 2dis * 8760h + \frac{6scf}{dispo * hora} * \frac{28,31l}{scf} * 1dis * 8760h \right) \\
&* \frac{1atm}{\frac{0,082l*atm/mol*k*298 K}{20^g/mol}} * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = 0,12 \frac{ton}{producción de pozo}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{pne-Humedo}VOC_S &= 0,25 \\
&* \left(\frac{6scf}{dis * h} * \frac{28,31l}{scf} * 2dis * 8760h + \frac{6scf}{dispo * hora} * \frac{28,31l}{scf} * 1dis * 8760h \right) \\
&* \frac{1atm}{\frac{0,082l*atm/mol*k*298 K}{20^g/mol}} * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = 0,91 \frac{ton}{producción de pozo}
\end{aligned}$$

Para el cálculo de los dispositivos neumáticos se tomó la fracción de gas seco y húmedo dada para completamiento.

Compresores en la cabeza del pozo

Los compresores en cabeza son relativamente pequeños de 50- 250 hp. Son utilizados para elevar la producción del gas de producción hasta lo requerido por las líneas de recolección. Aplica a gas seco.

Para el 2009

$$E_{Engine} = EF_1 * HP * LF_{average} * t_{annual} \dots (33)$$

EF_1 : Factor de emisión del contaminante

HP : Potencia del motor

$F_{average}$: Factor de carga media

t_{annual} : Número de horas anuales del funcionamiento del motor

A partir de la ecuación 33, y los datos de la tabla 21 y 22 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante, con la ecuación 28, y los datos de la tabla 22 se presenta un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante para el año 2020.

$$E_{Engine}NO_x = \frac{1,5g}{Hp * hora} * \frac{135 Hp}{BCF} * 0,6 * 8760 hora * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = \frac{1,064ton}{BCF}$$

$$E_{Engine}PM_{2.5} = \frac{0,014g}{Hp * hora} * \frac{135 Hp}{BCF} * 0,6 * 8760 hora * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = \frac{0,01ton}{BCF}$$

$$E_{Engine}VOC_s = \frac{0,46g}{Hp * hora} * \frac{135 Hp}{BCF} * 0,6 * 8760 hora * \frac{1x10^{-6}ton}{g} = \frac{0,32ton}{BCF}$$

Para el 2020

$$E_{Engine}NO_x = \frac{1,064ton}{BCF} * [0,76 * (1 - 0,5) + 1 - 0,76] = \frac{0,65ton}{BCF}$$

$$E_{Engine}VOC_s = \frac{0,32ton}{BCF} * [0,76 * (1 - 0,6) + 1 - 0,76] = \frac{0,17ton}{BCF}$$

Para PM_{2.5} se mantienen los mismos rangos para el 2020.

Midstream

Estación de Compresores

Las estaciones de compresores se emplean para mantener la presión de gas en las líneas de transmisión de gas. Normalmente contienen de 3- 15 compresores con una potencia de 1000-2000hp y operan a gas natural y por lo tanto emiten NO_x, COV y PM_{2,5}.

Para el 2009

$$E_{station} = EF_1 * HP * t * LF_{average} \dots (34)$$

EF_1 : Factor de emisión del contaminante

HP : Potencia requerida para bombear mil millones de pies cubicos de gas por día (mmpcd)

t : Numero de horas al día que el compresor esta en funcionamiento

$LF_{average}$: Fracción de potencia que se utilice realmente en el motor del compresor.

A partir de la ecuación 34, y los datos de la tabla 21 y 22 se muestra un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de cada contaminante, con la ecuación 28, y los datos de la tabla 22 se presenta un ejemplo de cálculo para determinar las emisiones de NO_x y VOC_s para el año 2020.

$$E_{station} NO_x = \frac{1,5 g}{Hp * hora} * \frac{1,5X10^5 Hp}{BCFD} * 24 hora * 0,6 * \frac{1x10^{-6} ton}{g} = \frac{3,24 ton}{BCFD}$$

$$E_{station} PM_{2.5} = \frac{0,014 g}{Hp * hora} * \frac{1,5X10^5 Hp}{BCFD} * 24 hora * 0,6 * \frac{1x10^{-6} ton}{g} = \frac{0,030 ton}{BCFD}$$

$$E_{station} VOC_s = \frac{0,46 g}{Hp * hora} * \frac{1,5X10^5 Hp}{BCFD} * 24 hora * 0,6 * \frac{1x10^{-6} ton}{g} = \frac{0,99 ton}{BCFD}$$

Para el 2020

$$E_{station} NO_x = \frac{3,24 ton}{BCFD} * [0,76 * (1 - 0,5) + 1 - 0,76] = \frac{2,008 ton}{BCFD}$$

$$E_{station} VOC_s = \frac{0,99 ton}{BCFD} * [0,76 * (1 - 0,6) + 1 - 0,76] = \frac{0,538 ton}{BCFD}$$

Para $PM_{2.5}$ se mantienen los mismos rangos para el 2020.

A continuación se muestra la tabla 25 con un resumen para los cálculos anteriores, tanto para el 2009 como para el 2020, por cada una de las etapas.

Tabla 25: Resumen de los resultados obtenidos por cada fuente con la metodología 3

Source	Pollutant					
	NO _x		PM _{2.5}		VOCs	
	2009	2020	2009	2020	2009	2020
Drill rigs (tons/well drilled)	4.4 (0.8–11.5)	2.9 (0.5–8.1)	0.3 (0.03–1)	0.1 (0.01–0.4)	0.5 (0.1–1.8)	0.1 (0.02–0.5)
Frac pumps (tons/well drilled)	2.2 (0.7–4.3)	1.8 (0.6–3.4)	0.16 (0.03–0.4)	0.1 (0.01–0.3)	0.25 (0.07–0.7)	0.14 (0.03–0.5)
Trucks (tons/well drilled)	6.9 (1.4–20)	1.5 (0.2–4.5)	0.07 (4 × 10 ⁻⁴ to 0.3)	0.02 (2 × 10 ⁻⁴ to 0.09)	0.4 (0.02–2.2)	0.2 (0.01–1.2)
Completion (tons/well drilled)						
Dry well	n/a	n/a	n/a	n/a	3.8 (2 × 10 ⁻³ to 29)	1.01 (5 × 10 ⁻⁴ to 8.3)
Wet well	n/a	n/a	n/a	n/a	21 (0.09–145)	5.5 (0.02–37.5)
Pneumatics (tons/producing well)						
Dry gas	n/a	n/a	n/a	n/a	0.5 (0.08–0.8)	0.1 (0.02–0.2)
Wet gas	n/a	n/a	n/a	n/a	3.3 (2.4–4.4)	0.8 (0.5–1)
Compressor stations (tons/BCF)	3.3 (1.0–5.2)	1.5 (0.3–3.0)	0.3 (4 × 10 ⁻⁴ to 0.1)	0.3 (4 × 10 ⁻⁴ to 0.1)	1.0 (0.3–3.0)	0.4 (0.06–1.0)

Note: Numbers presented for 2020 are for the baseline controls scenario.

Fuente: Anirban A. Roy et al 2013.

La tabla 26 agrupa cada uno de los contaminantes de acuerdo a la actividad a la que corresponda. Para el desarrollo se incluyen las fuentes relacionadas tons/ pozo perforado; en producción las relacionadas con relacionadas tons/producción por pozo y, finalmente, en midstreám las asociadas a tons/ BCF. Es de resaltar que el valor para los compuestos orgánicos volátiles varía, ya que el autor incluye otras fuentes de emisión tales como deshidratadores y emisiones fugitivas.

Tabla 26: Resumen de los resultados obtenidos por cada actividad con la metodología 3

Activity	Pollutant					
	NO _x		PM _{2.5}		VOCs	
	2009	2020	2009	2020	2009	2020
Development (tons/well drilled)						
Dry well	12.8 (5.1–28.3)	7.2 (2.6–16)	0.5 (0.1–1.5)	0.2 (0.06–0.5)	5.0 (0.3–30)	1.3 (0.2–5.4)
Wet well	12.8 (5.1–28.3)	7.2 (2.6–16)	0.5 (0.1–1.5)	0.2 (0.06–0.5)	22 (0.4–145)	5.6 (10 ⁻³ to 36)
Production (tons/producing well)						
Dry well	1.2 (0.2–2.5)	0.6 (0.1–1.0)	0.01 (6 × 10 ⁻⁵ to 5 × 10 ⁻²)	0.01 (6 × 10 ⁻⁵ to 5 × 10 ⁻²)	0.9 (0.3–1.9)	0.2 (0.04–0.6)
Wet well	1.2 (0.2–2.5)	0.6 (0.1–1.0)	0.01 (6 × 10 ⁻⁵ to 5 × 10 ⁻²)	0.01 (6 × 10 ⁻⁵ to 5 × 10 ⁻²)	4.0 (2.6–6)	1.0 (0.6–1.5)
Midstream (tons/BCF)	3.3 (1.0–5.2)	1.5 (0.3–3)	0.3 (4 × 10 ⁻⁴ to 0.1)	0.3 (4 × 10 ⁻⁴ to 0.1)	8.1 (2.6–14)	2.2 (0.7–4.5)

Fuente: Anirban A. Roy et al 2013.

2.2.4 ANALISIS DE METODOLOGÍA 4/4

GENERALIDADES

En este trabajo se realizará un modelado de emisiones durante la producción de gas. Para este modelado se dejarán constantes los parámetros comunes entre un yacimiento con gas convencional (YC) y un yacimiento de gas no convencional (YNC), los demás se variarán.

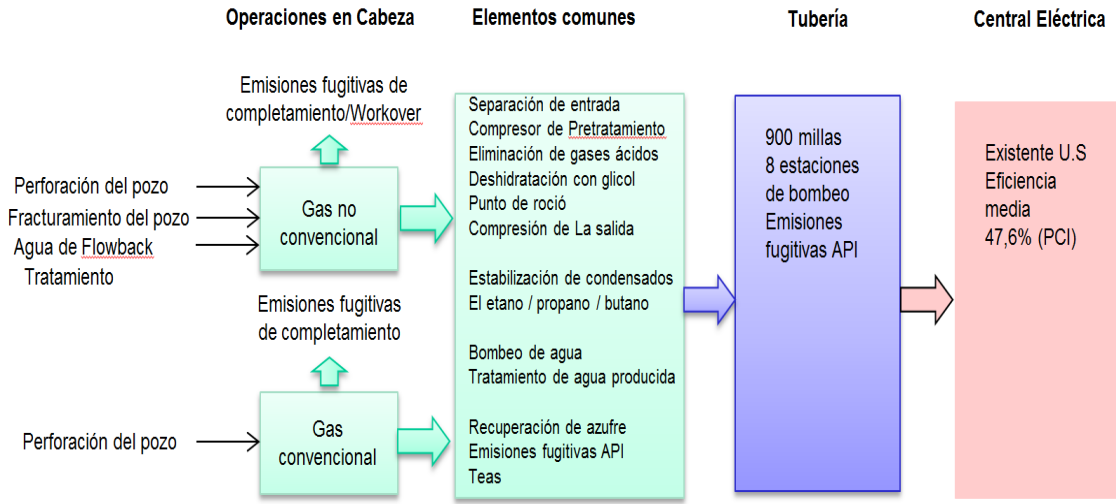
LÍMITES DEL SISTEMA

Esta metodología estima las emisiones de CO₂ y CH₄ asociadas a la combustión en todas las etapas, teniendo en cuenta la ventilación, la quema y emisiones fugitivas de las instalaciones de producción de gas y tuberías de transporte, las emisiones del combustible (diésel) utilizado para el suministro eléctrico, y las emisiones procedentes del transporte y el tratamiento de agua producida y el flujo de retorno.

Para el resultado final las emisiones son repartidas en subproductos, por ejemplo, el GLP. De esta forma se elimina el error que puede generar las diferentes composiciones de los gases al compararlos con otras zonas.

La figura 8 muestra un esquema de los límites de estudio considerados en esta metodología, analizando las operaciones en cabeza que varían para gas convencional y no convencional, los elementos comunes el transporte de gas en tubería y el consumo del gas en la central eléctrica.

Figura 8: Etapas de la metodología propuesta por la metodología 4



Fuente: Trevor Stephenson 2011.

Se estima que las emisiones de un shale gas son aproximadamente un 1,8 a 2,4 % más altas a un gas convencional debido a emisiones fugitivas durante el completamiento. Cabe resaltar que yacimientos no convencionales representan el 50% de la producción de gas y se espera que para el 2020 represente el 64%.

Operaciones en cabeza

Perforación de pozos.

Las emisiones de metano en esta escala ascenderían a 0,46% de la producción de toda la vida en el caso base (recuperación 2 millones de pies cúbicos).

Asumiendo que las emisiones son quemadas, la ecuación 35 y 36 estima las emisiones generadas cuando se queman las emisiones fugitivas con una eficiencia del 98%.

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones} &= 2 \text{ Bscf} * 0,0046 * 0,85 * 0,98(\text{combusti}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{2,75 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} \\
 &= 4,05 * 10^8 \text{ gCO}_2 \dots (35)
 \end{aligned}$$

$$Emisiones = 2 \text{ Bscf} * 0,0046 * 0,85 * 0,02(\text{no quema}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 7,52 * 10^7 \text{ gCO}_2 \dots \dots (36)$$

Fracturamiento hidráulico

Se determinó que el pozo se fractura inmediatamente después de la perforación y, posteriormente, no se lleva a cabo más fracturamiento. Se asume que se necesita un total de 15 operaciones de fracturamiento por pozo, cada uno requiere 2h de la inyección de agua a presión máxima. El fluido de fracturación se supuso para fluir a 50 bbl/min a 10000 psi (8 m³ /min y 689 bar) correspondiente a una "potencia hidráulica" de 12250 HP durante 30 horas (986560,9 MJ- 930,71MMBTU). Los motores operan a 250g combustible/kwh.

La ecuación 37 muestran un cálculo de para convertir la energía en potencia de salida utilizando el factor de conversión de $7000 \frac{BTU}{hp-hr}$ propuesto por la EPA, y la ecuación 38 calcula las emisiones a partir del factor de la EPA $\frac{1,15 \text{ lb}_2}{hp-hr}$.

$$Potencia \text{ de salida} = \frac{930,71 \text{ MMBTU}}{7000 \frac{BTU}{hp-hr}} = 1329596 \text{ hp} - \text{hr} \dots (37)$$

$$Emisiones = \frac{1,15 \text{ lb}}{hp - hr} * 1329596 \text{ hp} - \text{hr} * \frac{453,6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} = 6,93 * 10^8 \text{ gCO}_2 \dots (38)$$

Agua de fractura

Se requiere de 2 a 4 millones de galones de agua, para transportar esta agua se requiere de 15740 a 23040 camiones-milla, y al menos y un 20% adicional para la construcción de un "well pad" de 10 pozos. En total se asume que se gastaron hasta 5000 galones de diésel.

²Documento de internet [Fecha de Consulta 03 de Junio del 2015]Disponible en:<http://www.epa.gov/>

La ecuación 39 muestran un cálculo para hallar la potencia generado por los 5000 galones de diésel, teniendo en cuenta la densidad $\frac{7lb}{gal}$ el poder calorífico $\frac{43 MJ}{Kg}$ ³ y un factor de conversión propuesto por la EPA para convertir la energía utilizada en potencia de salida mientras que la ecuación 40 muestra el cálculo de las emisiones a partir del factor de la EPA $\frac{1.15 lb}{hp-hr}$ y la potencia generada.

$$Potencia = 5000gal * \frac{7lb}{gal} * \frac{1kg}{2,2 lb} * \frac{43 MJ}{Kg} * \frac{1BTU}{1,06*10^{-3}MJ} * \frac{1}{7000 \frac{BTU}{hp-hr}} = 92195,54 hp - hr \dots(39)$$

$$Emisiones = \frac{1,15 lb}{hp-hr} * 92195,54 hp - hr * \frac{453,6g}{1 lb} = 4,81 * 10^7 gCO_2 \dots\dots(40)$$

Tratamiento de agua flowback

En este caso se asume que se usaron 4 millones de galones de los cuales 2 millones de galones retornaron. El tratamiento se supone que constará de camiones de agua para la eliminación a una distancia de ida y vuelta de 150 kilómetros por carretera una carga de 100 bbl usando un galón cada 5 millas y un tratamiento por un método intensivo: la ósmosis inversa y la evaporación o congelación descongelación- evaporación a 2 kWh / bbl. En total se usaron de 15000 galones de diésel para camiones y 100 MWh (360000 MJ) de electricidad para el tratamiento del agua.

La ecuación 41 y 42 muestra un cálculo similar al de la ecuación 39 y 40, respectivamente.

$$Potencia = 15000gal * \frac{7lb}{gal} * \frac{1kg}{2,2 lb} * \frac{43 MJ}{Kg} * \frac{1BTU}{1,06*10^{-3}MJ} * \frac{1}{7000 \frac{BTU}{hp-hr}} = 276586,62 hp - hr \dots(41)$$

$$Emisiones = \frac{1,15 lb}{hp-hr} * 276586,62 hp - hr * \frac{453,6g}{1 lb} = 1,44 * 10^8 gCO_2 \dots(42)$$

³ Documento de internet [Fecha de Consulta 03 de Junio del 2015] Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>

Emisiones debidas a la energía eléctrica usada en el tratamiento del flowback

La ecuación 43 muestra la cantidad de gas necesario para generar la energía utilizada en el tratamiento del flowback con una eficiencia del 47% de la planta. Las ecuaciones 44 y 45 muestran el cálculo de las emisiones debidas a la combustión del gas utilizado para generar los 100 MWh usados en el tratamiento del flowback. El 0,85 representa la fracción de metano en el gas, el 0,98 lo que se quema y el 0,02 lo que no se quema, el factor $\frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3}$ representa la densidad del gas, y el factor $\frac{2,75 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}}$ y $\frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}}$ representa la equivalencia de contaminación entre el CO₂ y el CH₄.

$$\text{Gas Usado (100 MWh)} = \frac{360000 \text{ MJ}}{0,47} * \frac{1 \text{ BTU}}{1,06 * 10^{-3} \text{ MJ}} * \frac{1 \text{ ft}^3}{933,57 \text{ BTU}} = 774019,4 \text{ 1ft}^3 \dots\dots(43)$$

$$\text{Emisiones} = 774019,4 \text{ scf} * 0,85 * 0,98(\text{combustio}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{2,75 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 3,4 * 10^7 \text{ gCO}_2 \dots(44)$$

$$\text{Emisiones} = 774019,4 \text{ scf} * 0,85 * 0,02(\text{no quema}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 6,32 * 10^6 \text{ gCO}_2 \dots(45)$$

Elementos comunes

Cabe resaltar que este modelado se centrará solo en las variables que son diferentes en un yacimiento de gas convencional a un yacimiento de gas no convencional.

Energía generada por el gas

Dado que las composiciones del gas son similares, se usará una sola composición para modelar el gas convencional y no convencional. El contenido de agua se tomó como 0,4 bl/mpc y el contenido de CO₂ va desde 0 a un 7%. Como caudal base se tomó 2 Bscf durante el ciclo de vida del pozo. Para mostrar los resultados de este estudio se dividen en la energía total generada por la producción total del pozo.

La ecuación 46 muestra el cálculo de la energía generada por la planta donde $\frac{933,57 \text{ BTU}}{\text{ft}^3}$ representa el poder calorífico.

$$\text{Energía} = \frac{933,57 \text{ BTU}}{\text{ft}^3} * 2 \text{ Bscf} * 0,47(\text{eficiencia}) * \frac{1,06 * 10^{-3} \text{ MJ}}{\text{BTU}} = 930,21 * 10^6 \text{ MJ} \dots (46)$$

Tratamiento del gas

El tratamiento es igual para YNC y YC se realiza desalinización 0,5 kWh/bbl, se estabilizan los condensados, se comprime en la cabeza del pozo antes de tratamiento, se elimina el H₂S y CO₂, y se extrae etano, butano y propano líquidos. Las emisiones fugitivas se calcularon utilizando los factores a nivel de las instalaciones del Compendio 2009 de la API, el cual indica que el 0,18% se pierde en las emisiones fugitivas de procesamiento de gas. Teniendo la cantidad de gas que se pierde durante el tratamiento, asumiendo una fracción de metano en la composición del gas de 85% y aplicando algunas propiedades del metano tales como densidad (19,23 g/ft³) y su equivalencia en gramos de CO₂ (2,75 gCO₂/g CH₄ cuando hay combustión y 25 gCO₂/g CH₄ cuando se emite a la atmósfera), se realizan los cálculos de la ecuación 47 que determina las emisiones por tratamiento de gas.

$$\text{Emisiones} = 2 \text{ Bscf} * 0,0018 * 0,85 * \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 1,47 * 10^9 \text{ gCO}_2 \dots (47)$$

Transmisión en la tubería

Para este caso, el gas es transportado 900 millas en esta distancia presentando unas emisiones fugitivas de 0,066%, para mantener la presión a lo largo del trayecto se requiere de 8 estaciones de compresión las cuales usan como combustible 1,4% del gas. Teniendo en cuenta que la combustión del metano es del 98%.

La ecuación 48 muestra el cálculo de la contaminación atmosférica debida a las emisiones fugitivas producto del transporte del gas en la tubería, y la ecuación 49 y 50 las emisiones debidas al consumo de gas para las estaciones de compresión.

$$Emisiones = 2 \text{ Bscf} * 0,00066 * 0,85 * \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 5,39 * 10^8 \text{ gCO}_2 \dots (48)$$

$$Emisiones = 2 \text{ Bscf} * 0,014 * 0,85 * 0,98(\text{combustio}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{2,75 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 1,23 * 10^9 \text{ gCO}_2 (49)$$

$$Emisiones = 2 \text{ Bscf} * 0,014 * 0,85 * 0,02(\text{no quema}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 2,29 * 10^8 \text{ gCO}_2 \dots (50)$$

Central Eléctrica - Emisiones por combustión en la planta

Mediante las ecuaciones 51 y 52 se estiman las emisiones generadas por el consumo de gas en la planta generadora asumiendo como en casos anteriores una eficiencia de combustión del 98%.

$$Emisiones = 2 \text{ Bscf} * 0,85 * 0,98(\text{combustio}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{2,75 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 8,8 * 10^{10} \text{ gCO}_2 \dots (51)$$

$$Emisiones = 2 \text{ Bscf} * 0,85 * 0,02(\text{no quema}) \frac{19,23 \text{ g}}{\text{ft}^3} * \frac{25 \text{ gCO}_2}{\text{g metano}} = 1,63 * 10^{10} \text{ gCO}_2 \dots (52)$$

Según datos estadísticos de EEUU en algunos pozos en promedio se queman el 51% de las emisiones fugitivas de metano. En la tabla 27 se relaciona un total de emisiones para las etapas estimadas anteriormente y los diferentes casos, con respecto a la energía generada en la central eléctrica. En la ecuación 53 se observa las emisiones debidas al tratamiento del gas (ecuación 47), divididas en la cantidad de energía generada durante la vida del pozo, cabe recordar que la energía generada por el gas fue estimada en la ecuación 46, de igual forma se realiza para las demás etapas.

$$Emisiones \text{ tratamiento del gas} = \frac{1,47 * 10^9 \text{ gCO}_2}{930,21 * 10^6 \text{ MJ}} = 1,58 \frac{\text{gCO}_2}{\text{MJ}} (53)$$

Tabla 27: Resultados obtenidos con la metodología 4.

Resultados	Emisiones gCO ₂ / MJ
Tratamiento del gas	1,58
Transporte tubería	2,15
Perforación quema	0,52
Se quema 51%	2,24
Se ventea todo	4,04
Fracturamiento	0,07

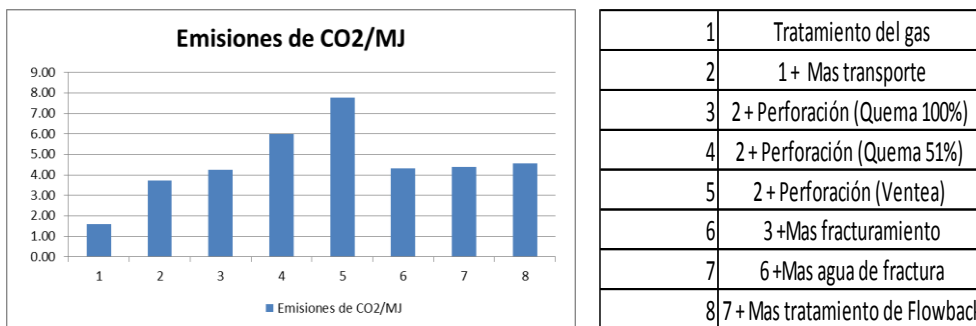
Agua de Factura	0,05
Tratamiento de agua	0,20
Emisiones de la planta	112,28

Fuente: Trevor Stephenson 2011

Las emisiones de la planta generadora de electricidad representa la mayor parte de las emisiones atmosféricas generadas durante el ciclo de vida de un pozo de gas ya que en la planta se quema la totalidad del gas producido generando 112 g CO₂ /MJ. De las etapas de producción de gas, la más crítica es cuando se ventean todas las emisiones fugitivas con un 4,04 g CO₂/MJ.

La figura 9 muestra los resultados obtenidos en las operaciones de cabeza de pozo y la figura 10 hace una comparación de las emisiones con las concebidas durante todo el ciclo de vida del gas para generar electricidad.

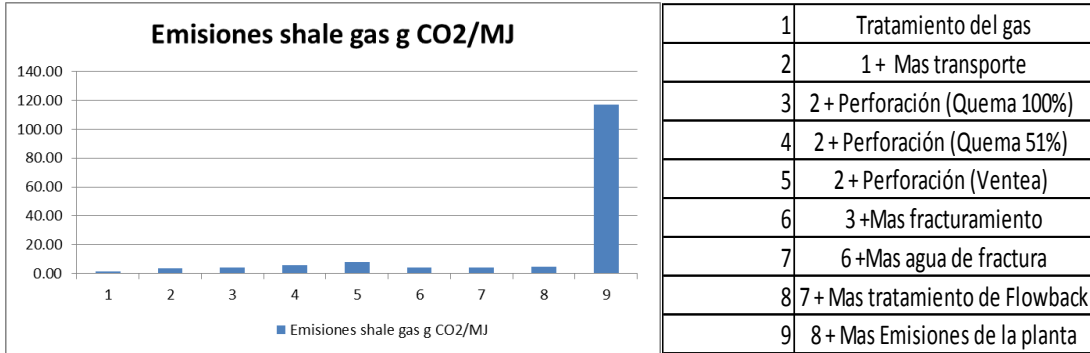
Figura 9: Esquema de los resultados obtenidos en las operaciones de cabeza de pozo.



1	Tratamiento del gas
2	1+ Mas transporte
3	2+ Perforación (Quema 100%)
4	2+ Perforación (Quema 51%)
5	2+ Perforación (Ventea)
6	3+Mas fracturamiento
7	6+Mas agua de fractura
8	7+ Mas tratamiento de Flowback

Fuente: Trevor Stephenson 2011.

Figura 10: Esquema de los resultados obtenidos incluyendo todo el ciclo de vida del gas.



Fuente: Trevor Stephenson 2011.

Como se observa en la metodología anterior, los yacimientos no convencionales tienen unas etapas adicionales como fracturamiento, disposición del agua de fractura y tratamiento de flowback los cuales aumentan las emisiones atmosféricas.

3. CONTAMINANTES SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Hacen referencia a la combinación de Óxido Nítrico (NO) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂). Son promotores de smog fotoquímico y lluvia ácida, así como de partículas secundarias tóxicas y mutagénicas (ej. Nitrosaminas). El NO₂ se forma por la fusión del nitrógeno molecular (N₂) y el oxígeno molecular (O₂) que se encuentran en el aire. Es conocido que los óxidos de nitrógeno se forman durante la combustión de combustible fósil en presencia de aire a temperaturas elevadas.

Óxidos de Azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre se encuentran en la atmósfera en forma de dióxido de azufre (SO₂), trióxido de azufre (SO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄). Son excelentes núcleos de condensación razón por la cual generan problemas de visibilidad en la atmósfera. Corroen metales, son promotores de lluvia ácida y de partículas secundarias que agravan las enfermedades respiratorias y cardíacas (sulfatos). Se forman principalmente durante la combustión de los combustibles que contienen azufre siendo así un contaminante primario. El Dióxido de Azufre una vez inhalado, se disuelve en el fluido de la pared pulmonar formando sulfito o bisulfito, que se distribuye eficazmente por todo el organismo.

Partículas Suspendidas de diámetro menor a diez micras (PM_{2,5})

De acuerdo con la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), el material particulado es una mezcla compuesta por partículas extremadamente pequeñas que se encuentran suspendidas en el aire. Sus impactos en la salud están determinados por la capacidad de penetrar en las vías respiratorias.

La contaminación del aire por partículas se compone principalmente de especies tales como nitratos, sulfatos, carbono orgánico, carbono elemental, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) y metales como el silicio, calcio, zinc, plomo, cadmio, hierro entre otros. En este caso se analizarán las PM_{2,5} las cuales poseen un diámetro igual o menor a 2,5 micrómetros.

Dióxido de carbono equivalente (CO_{2e})

El dióxido de carbono (CO_{2e}) es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Ha estado ingresando en la atmósfera proveniente de diversas fuentes durante millones de años. Una de estas fuentes, es la combustión de combustibles fósiles realizada por los seres humanos. La combustión de combustibles fósiles actualmente libera alrededor de 26 mil millones de toneladas métricas de CO₂ en la atmósfera por año. De todos los gases de efecto invernadero, el CO_{2e} es el que más contribuye al cambio climático y el que más ha aumentado su concentración en la atmósfera.

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Un compuesto orgánico volátil es cualquier sustancia orgánica que contiene carbón y que se evapora a temperatura ambiente. Contribuyen de manera decisiva a la formación del 'smog' fotoquímico (neblina contaminante). Suelen tener olor como la gasolina, el alcohol o los disolventes.

Los COV contaminan el aire y, cuando se mezclan con óxidos de nitrógeno, reaccionan generando ozono, cuya presencia en el aire respirable crea un efecto nocivo proporcional a la concentración. Los compuestos orgánicos volátiles se liberan con la ignición de materiales combustibles, madera, carbón o gas natural. En cuanto a sus consecuencias sobre la salud, pueden tener desde un alto grado de toxicidad hasta ausencia de efectos conocidos, dependiendo del compuesto y el período de exposición al mismo.

Metano (CH₄)

El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente que contribuye al calentamiento global del planeta ya que tiene un potencial de calentamiento global de 23,3 a 25. Esto significa que en una medida de tiempo de 100 años cada kg de CH₄ calienta la tierra de 23 a 25 veces más que la misma cantidad de dióxido de carbono; sin embargo hay aproximadamente 220 veces más dióxido de carbono en la atmósfera de la tierra que metano por lo que contribuye de manera menos importante al efecto invernadero.

La tabla 28 muestra un resumen de los contaminantes que serán objeto de análisis en el presente estudio.

Tabla 28: Contaminantes estudiados

COMPUESTO	
A VOCs	Compuestos orgánicos volátiles
B PM	Material particulado
C CO ₂ -equ	Dióxido de Carbono equivalente
D SO _x	Óxido de Azufre
E NO _x	Oxido de Nitrógeno

4. ETAPAS SELECCIONADAS DE CADA METODOLOGÍA

A continuación se mostrará para cada etapa las formas de estimación sugeridas de acuerdo a lo seleccionado de las 4 metodologías; como se mencionó anteriormente, la elección se realizó en base a la disponibilidad de información y factibilidad de los cálculos. Cabe resaltar que los mapas conceptuales comparativos contienen la etapa seleccionada y la información necesaria para implementarla en cada metodología. Para las estimaciones se necesitó de información adicional mencionada en los artículos, sin embargo el valor numérico no estaba reportado, por lo que fue necesario buscar la información requerida adicionalmente; la tabla 29 muestra algunos datos de entrada para el desarrollo de los cálculos.

Tabla 29: Información adicional

CARACTERISTICAS DEL GAS	
Fracción de CH ₄	0,85
Densidad g/ft ³	19,23
EQUIVALENCIA DE CH ₄ EN CO ₂	
Quema	2,75
Emite	25
FACTORES DE EMISION DE LA EPA-1995	
Contaminante	lb/MMBTU
NO _x	4,41
SO _x	0,29
CO ₂	164

CARACTERÍSTICAS DEL POZO	VALOR	UNIDAD
Área del “ <i>well pad</i> ”	5000	m ²
Distancia para disponer los residuos	5	km
Distancia a las plantas de suministros	50	km
Reparación de carretera	2,8	km
Carretera nueva	65	m
Embalse para agua	7000	m ³
Zona de residuos	2000	m ³
Profundidad	13000	ft
Etapas de fracturamiento	11	Etapas

La figura 11 muestra la comparación de las 4 metodologías seleccionadas en la etapa de preparación del “*well pad*”, resaltando aquellas subetapas que serán tenidas en cuenta en el presente análisis.

La tabla 30 muestra un cálculo estimado de las emisiones para las subetapas seleccionadas en la figura 11.

Sub-etapas seleccionadas durante la construcción del “well pad”.

Figura 11: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante la construcción del “well pad”.

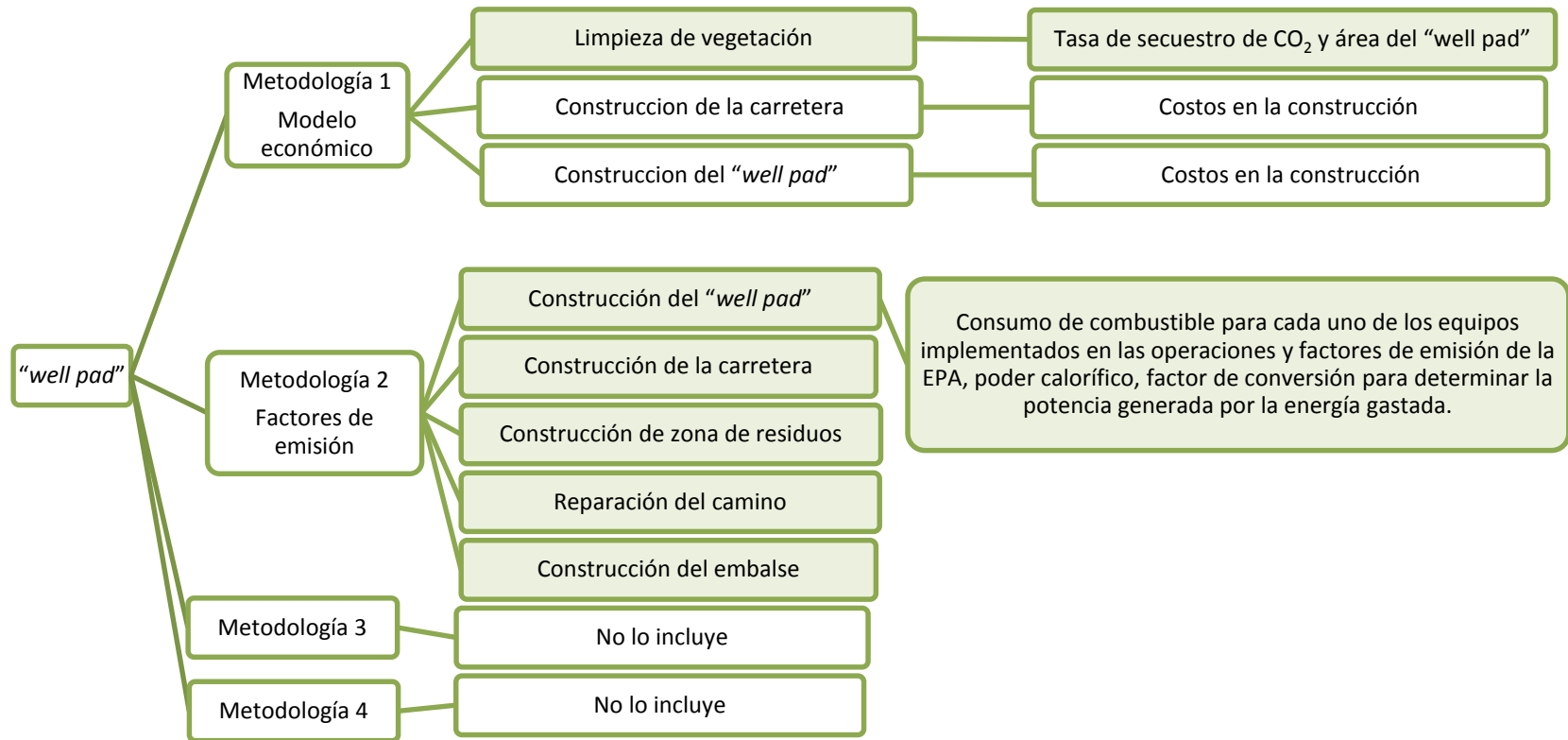
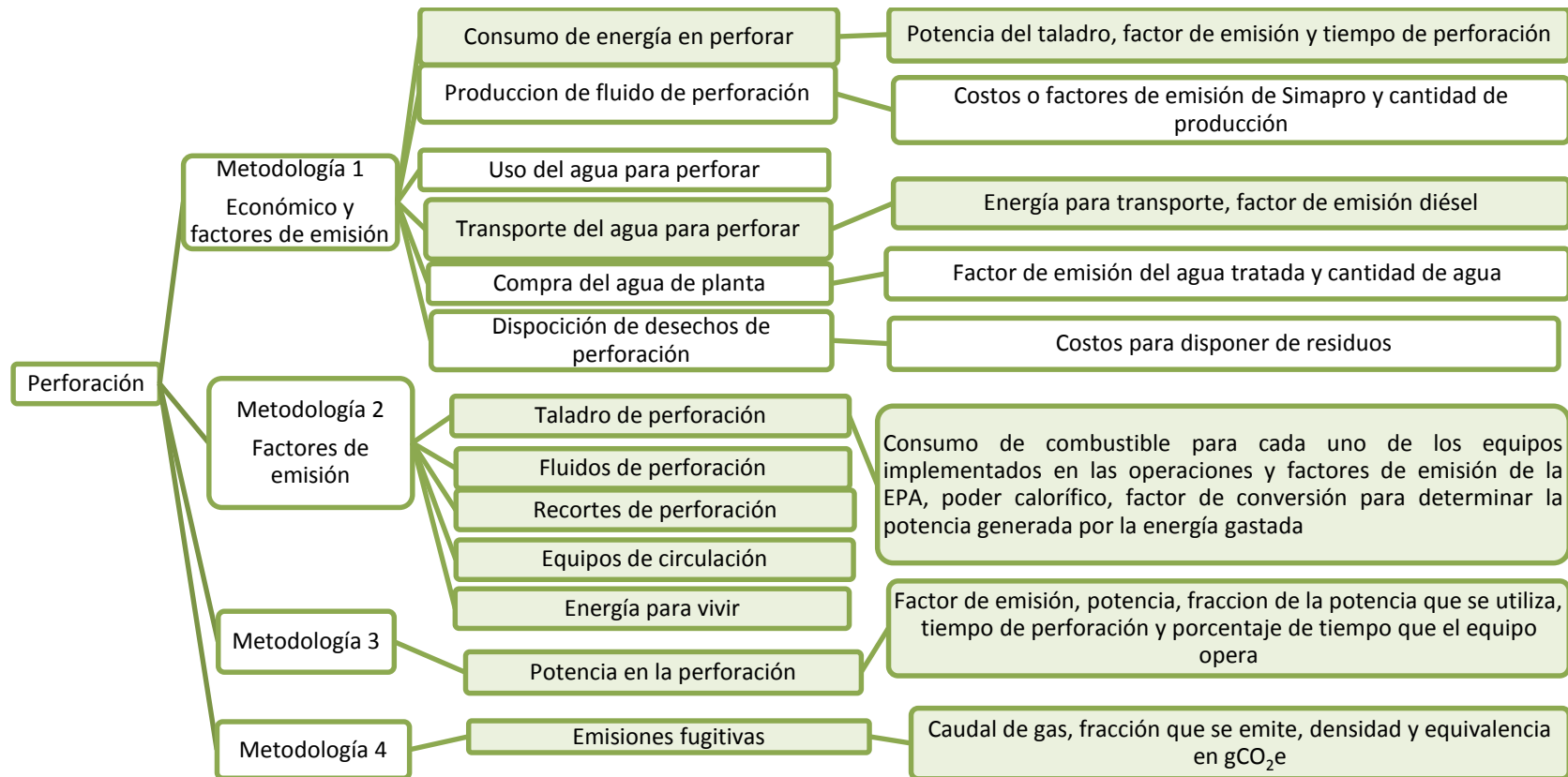


Tabla 30: Cálculo de las emisiones debidas a la construcción del “well pad” para los contaminantes NO_x SO₂ y CO_{2e}.

WELL PAD								
Actividades	Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad	Resultados			Unidad	Referencia
				NO _x	SO ₂	CO ₂ equivalente		
Limpieza de la vegetación	Tasa de secuestro de CO ₂	27,00	gCO ₂ /(ft ² -año)	-	-	1452,60	Kg/pozo	Mohan Jiang et al, 2011
	Área del well pad	53800,00	ft2/well pad	-	-			
	Tiempo estimado de producción	1,00	años	-	-			
	Equipos utilizados	Cantidad de combustible gastada por cada equipo						
Construcción del well pad	Excavadora	76,00	kg	6,18	0,41	229,83	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
	Nivelador	192,44	kg	15,65	1,03	581,94	Kg/pozo	
	Rodillo	30,00	kg	2,44	0,16	90,72	Kg/pozo	
	Camiones	1383,00	kg	112,46	7,40	4182,21	Kg/pozo	
	Cargador	171,05	kg	13,91	0,91	517,26	Kg/pozo	
Construcción de la carretera	Excavadora	6,00	kg	0,49	0,03	18,14	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
	Nivelador	15,00	kg	1,22	0,08	45,36	Kg/pozo	
	Rodillo	2,00	kg	0,16	0,01	6,05	Kg/pozo	
	Camiones	109,00	kg	8,86	0,58	329,62	Kg/pozo	
	Cargador	13,34	kg	1,08	0,07	40,34	Kg/pozo	
Construcción de la zona de residuos	Camiones	2666,29	kg	216,81	14,26	8062,90	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
Reparación del camino	Nivelador	646,60	kg	52,58	3,46	1955,33	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
	Rodillo	101,13	kg	8,22	0,54	305,82	Kg/pozo	
Construcción del embalse	Excavadora	662,00	kg	53,83	3,54	2001,90	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
	Cargador	1197,36	kg	97,37	6,40	3620,83	Kg/pozo	
TOTAL DE EMISIONES				591,27	38,88	23440,84	Kg/pozo	

Sub-etapas seleccionadas durante la Perforación.

Figura 12: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante la perforación.



La figura 12 muestra la comparación de las 4 metodologías seleccionadas en la etapa de perforación, resaltando aquellas subetapas que serán tenidas en cuenta en el presente análisis, cabe mencionar que aquellas subetapas que tienen similitud operación como es el caso de transporte de agua para perforar, fluidos de perforación y recortes de perforación se agruparan como transporte de agua aditivos y residuos; en relación con la perforación se incluye únicamente la relacionada con el taladro de perforación para evitar repetir el cálculo.

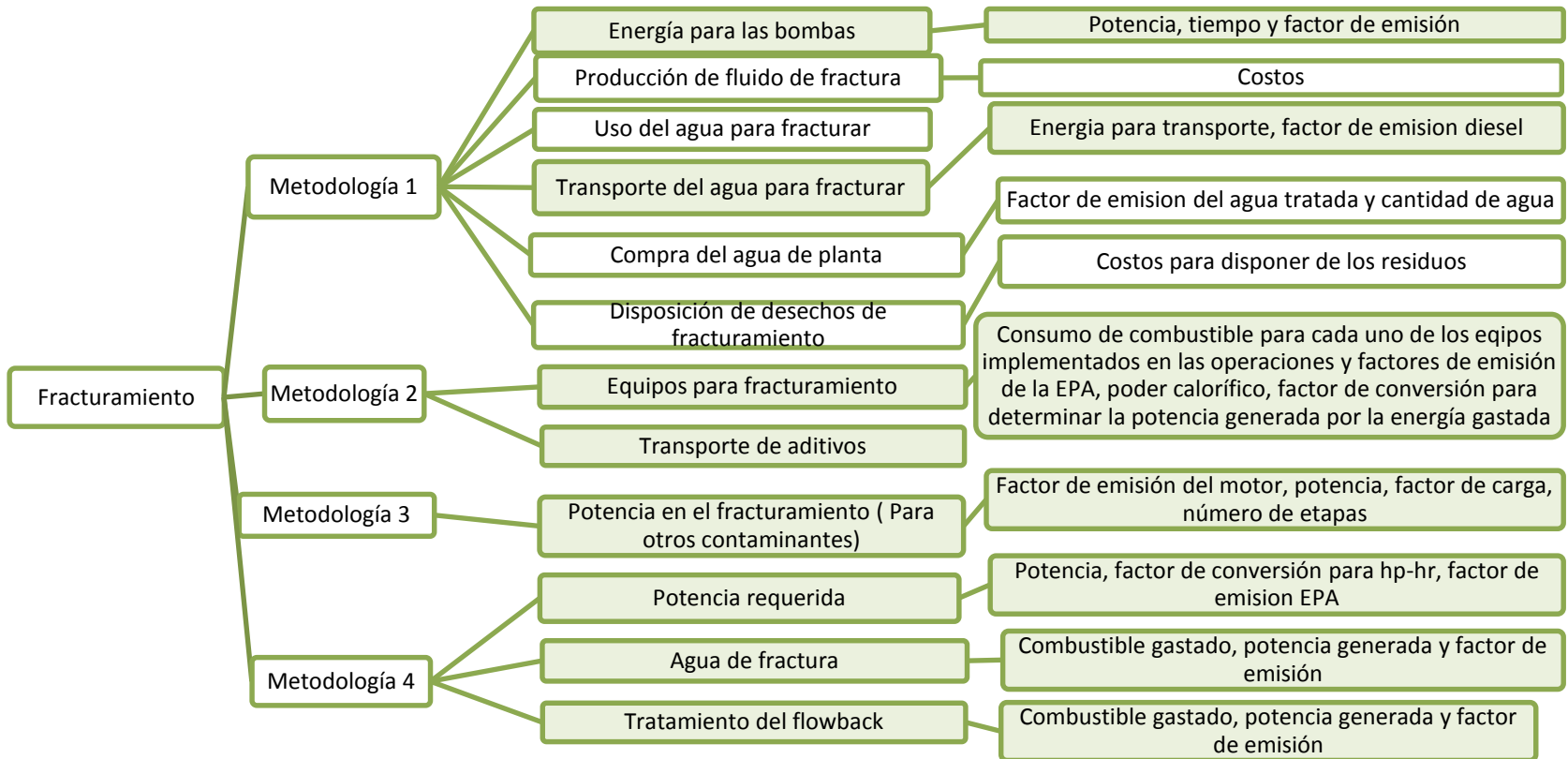
La tabla 31 muestra un cálculo estimado de las emisiones para las subetapas seleccionadas en la perforación.

Tabla 31: Emisiones debidas a la perforación para los contaminantes NO_x SO₂ y CO_{2e}.

PERFORACIÓN								
Actividades	Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad	Resultados			Unidad	Referencia
				NO _x	SO ₂	CO ₂ equivalente		
Perforación	Energía utilizada por el taladro	128300,00	kg	10432,90	686,06	387980,96	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
Equipos de circulación	Shale shaker	18700,00	kg	1520,62	100,00	56549,06	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
	Des-arenador Integrado y des-arenador de lodo							
	Des-gasificador							
	Centrifugas							
	Bombas							
Energía para vivir	Generador eléctrico	300,00	kg	24,39	1,60	907,20	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
Trasporte de agua, aditivos y residuos	Camión (Bentonita)	30,00	kg	2,44	0,16	90,72	Kg/pozo	Yuan Chang et al, 2014
	Camión (Aditivos)	360,00	kg	29,27	1,93	1088,64	Kg/pozo	
	Camión (Residuos)	75,00	kg	6,10	0,40	226,80	Kg/pozo	
Emisiones fugitivas (Queman)	Caudal de gas Quema 98%	300000,00	ft3	-	-	13215,34	Kg/pozo	Mohan Jiang et al (2011), Trevor Stephenson et al 2011
	Caudal de gas Emite el 2%			-	-	2451,83	Kg/pozo	
Emisiones fugitivas (Ventean)	Todo es emitido a la atmósfera	300000,00	ft3			122591,25	Kg/pozo	Mohan Jiang et al (2011), Trevor Stephenson et al 2011
TOTAL DE EMISIONES							Kg/pozo	
				12015,73	790,15	462510,55		
				Caso donde todo se ventea		569434,64		

Sub-etapas seleccionadas durante el Fracturamiento Hidráulico.

Figura 13: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante el fracturamiento hidráulico.



La figura 13 muestra la comparación de las 4 metodologías seleccionadas en la etapa de fracturamiento Hidráulico, resaltando aquellas subetapas que serán tenidas en cuenta en el presente análisis, cabe mencionar que aquellas subetapas que tienen similitud operación se cuantifican solo una vez, a fin de evitar repetir el cálculo.

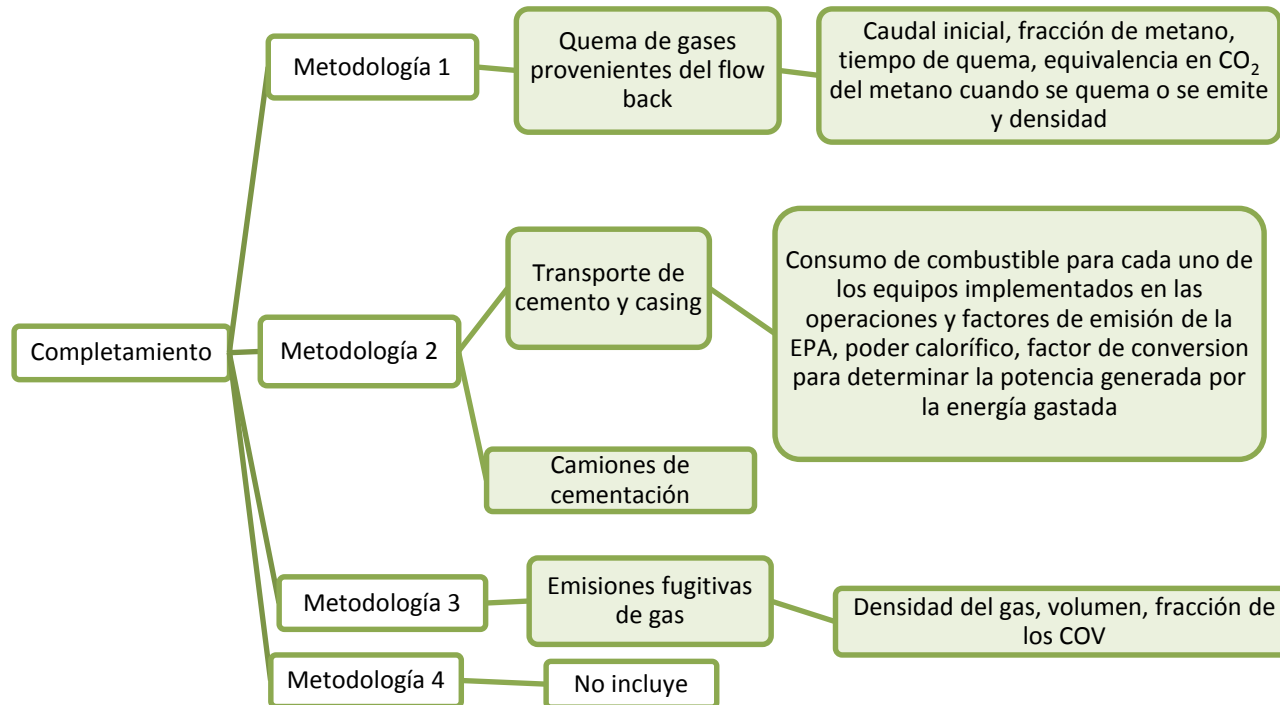
La tabla 32 muestra un cálculo estimado de las emisiones para las subetapas seleccionadas en el fracturamiento Hidráulico

Tabla 32: Emisiones debidas al fracturamiento hidráulico para los contaminantes NO_x SO₂ y CO_{2e}.

FRACTURAMIENTO										
Actividades	Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad	Resultados			Unidad	Referencia		
				NO _x	SO ₂	CO ₂ equivalente				
Fracturamiento	Bomba	139000,00	kg	11302,99	743,28	420337,91	Kg/pozo	Yuan Chang et al (2014)		
	Mezcladora	4000,00	kg	325,27	21,39	12096,05	Kg/pozo			
	Equipo de monitoreo	80,00	kg	6,51	0,43	241,92	Kg/pozo			
Transporte de propano	Camiones	2730,00	Kg	221,99	14,60	8255,56	Kg/pozo	Yuan Chang et al (2014)		
Transporte de agua	Camiones	15000,00		1219,75	80,21	45360,21	Kg/pozo	Trevor Stephenson et al 2011 , Yuan Chang et al (2014)		
Tratamiento y disposición de flowback	Generadores electricidad y camiones	45000,00	kg	3659,24	240,63	136080,62	Kg/pozo	Trevor Stephenson et al 2011 , Yuan Chang et al (2014)		
Emisiones fugitivas (Queman)	Caudal de gas Quema 98%	300000,00	ft3	-	-	13215,34	Kg/pozo	Mohan Jiang et al (2011)		
	Caudal de gas Emite el 2%			-	-	2451,83	Kg/pozo			
Emisiones fugitivas (Ventean)	Todo es emitido a la atmósfera	300000,00	ft3			122591,25	Kg/pozo	Mohan Jiang et al (2011)		
TOTAL DE EMISIONES				16735,74	1100,54	638039,43	Kg/pozo			
				Caso donde todo se ventea		744963,51	Kg/pozo			

Sub-etapas seleccionadas durante el Completamiento.

Figura 14: Comparación de las subetapas de las 4 metodologías analizadas durante el completamiento.



La figura 14 muestra la comparación de las 4 metodologías seleccionadas en la etapa de completamiento, resaltando aquellas subetapas que serán tenidas en cuenta en el presente análisis cabe mencionar que aquellas subetapas que tienen similitud operación se cuantifican solo una vez, a fin de evitar repetir el cálculo.

La tabla 33 muestra un cálculo estimado de las emisiones para las subetapas seleccionadas en el completamiento.

Tabla 33: Emisiones debidas al completamiento para los contaminantes NO_x SO₂ y CO_{2e}.

COMPLETAMIENTO								
Actividades	Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad	Resultados			Unidad	Referencia
				NO _x	SO ₂	CO ₂ equivalente		
Transporte de materiales	Camión para el casing	420,00	kg	34,15	2,25	1270,09	Kg/pozo	Yuan Chang et al (2014)
	Camión para el cemento	600,00	kg	48,79	3,21	1814,41	Kg/pozo	
	Camión para cementar	20,00	kg	1,63	0,11	60,48	Kg/pozo	
Emisiones fugitivas (Queman)	Caudal de gas Quema 98%	300000,00	ft3	-	-	13215,34	Kg/pozo	Mohan Jiang et al (2011)
	Caudal de gas Emite el 2%			-	-	2451,83	Kg/pozo	
Emisiones fugitivas (Ventean)	Todo es emitido a la atmósfera	300000,00	ft3			122591,25	Kg/pozo	Mohan Jiang et al (2011), Anirban A. Roy et al (2013)
TOTAL DE EMISIONES				84,57	5,56	18812,14	Kg/pozo	
				Caso donde todo se ventea		125736,22	Kg/pozo	

Análisis de Otros contaminantes

La tabla 34 muestra el análisis de los contaminantes PM_{2,5} y COV durante la perforación, el fracturamiento hidráulico, los camiones de desarrollo los camiones de residuos y el completamiento. En la suma total no se incluyen los camiones de desarrollo.

Tabla 34: Emisiones de otros contaminantes que sólo fueron incluidos por la metodología 3.

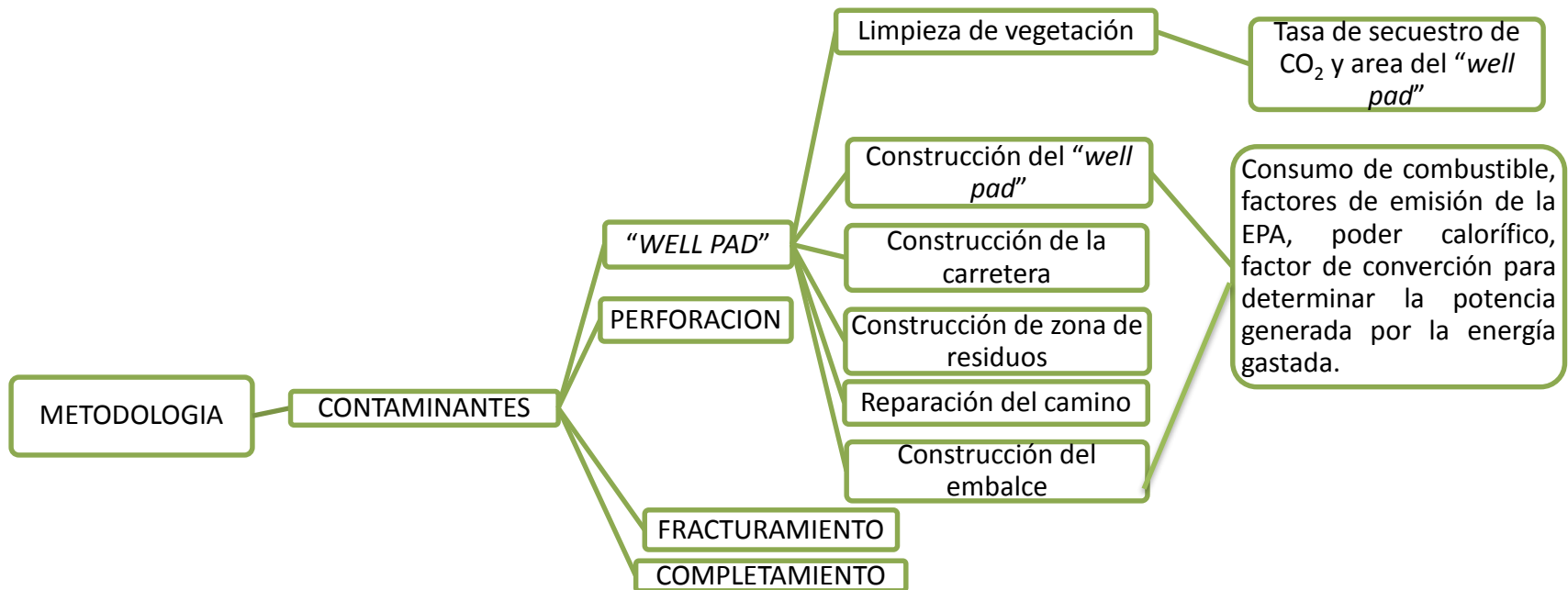
OTROS CONTAMINANTES							
Actividades	Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad	Resultados		UNIDAD	REFERENCIAS
				COVs	PM 2.5		
Perforación	Factor de emisión para COVs	0,60	g/hp-hr	384,13	224,08	kg/pozo	Anirban A. Roy et al (2013)
	Factor de emisión para PM 2.5	0,35	g/hp-hr				
	Potencia de los motores utiliza	3600,00	HP				
		0,57	-				
	Tiempo en perforar	26,00	días				
	Tiempo que en realidad opera el taladro	0,50	-				
Fracturamiento hidráulico	Factor de emisión para COVs	0,67	g/hp-hr	254,60	152,00	kg/pozo	Anirban A. Roy et al (2013)
	Factor de emisión para PM 2.5	0,40	g/hp-hr				
	Potencia - hora para cada etapa	40000,00	hp-hr/etapa				
	Fracción de potencia que se utiliza	0,50	-				
	Número de etapas	19,00	Etapas				
Camiones desarrollo	Factor de emisión para COVs	1,70	g/milla	22,47	4,2304	kg/pozo	Anirban A. Roy et al (2013)
	Factor de emisión para PM 2.5	0,32	g/milla				
	Distancia	10,00	millas/viaje				
	Número de viajes	661,00	Viaje/pozo				
Camiones residuos	Factor de emisión para COVs	1,70	g/milla	186,12	35,0336	kg/pozo	Anirban A. Roy et al (2013)
	Factor de emisión para PM 2.5	0,32	g/milla				
	Distancia	119,00	millas/viaje				
	Número de viajes	460,00	Viaje/pozo				
Completamiento	Densidad del gas	19,23	g/ft3	196,15		kg/pozo	Anirban A. Roy et al (2013)
	Gas venteado por pozo	300000,00	ft3				
	Fracción de COVs	0,03	-				
TOTAL DE EMISIONES				1021,00	411,11		

5. METODOLOGÍA PROPUESTA POR EL AUTOR

Luego de realizar el análisis de cada una de las metodologías seleccionadas, los contaminantes a estudiar y cada una de las sub-etapas tenidas en cuenta a partir de las 4 metodologías iniciales se procede plantear un flujo de trabajo para estimar la contaminación atmosférica generada por la extracción de shale gas.

“WELL PAD”

Figura 15: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para el “well pad”



Contaminantes “well pad”

La figura 16 muestra una representación gráfica de las subetapas seleccionada durante la construcción del “well pad”

Figura 16: Contaminantes presentes en cada operación durante la construcción del “well pad”



Fuente: Modificada de Air emissions from oil and gas development in the Eagle Ford

Información requerida

Para la estimación de las emisiones durante la construcción del “well pad” se requiere el área que se va a utilizar, tasa de secuestro de CO_2 , tiempo de vida útil del pozo y combustible gastado por cada uno de los equipos implementados en cada operación; además, para los respectivos cálculos se requiere los factores de emisión de la EPA – 1995 y del poder calorífico del combustible. En la siguiente tabla se muestra un aproximado de consumo de combustible según el peso del vehículo.

Tabla 35: Consumo de energía de vehículos

Peso neto de vehículo (ton)	Consumo de diésel	
	(L/100km)	(kg/100km)
6-7	16,3	13,9
7-9	18,8	16,0
9-11	21,5	18,3
11-13	23,8	20,2
13-15	25,7	21,8
15-17	27,4	23,3
17-19	28,9	24,6
19-21	30,2	25,7
21-23	31,4	26,7
23-25	32,5	27,6
25-27	33,5	28,5
27-29	34,5	29,3
29-31	35,5	30,2
31-32	36	30,6
>32	36	30,6
Promedio	24,9	21,2

Fuente: Huo et al, 2012.

Teniendo la cantidad de combustible que se consume en función de la distancia recorrida y el peso del vehículo, se podrá estimar la cantidad de diésel gastado cuando se tenga conocimiento de la cantidad de materiales removidas de la zona como tierra, vegetación y materiales implementados en la construcción de la locación además de la distancia de donde deben ser traídos. Para este ejemplo se sacaron datos de literatura en los cuales las zonas de disposición de residuos están a 5 Km, la compra de suministros y materiales están a 50 KM y la distancia al suministro de agua está a 32 km. Luego de tener la respectiva información se realizan los respectivos cálculos. En la tabla 36 se muestran los factores de emisión de la EPA, para el caso de emisiones de SO₂ se usa el 90% del facto de emisión de SO_x (EPA)

Tabla 36: Información adicional, factores de emisión de la EPA – 1995 y poder calorífico del diésel.

FACTORES DE EMISION DE LA EPA-1995	
Contaminante	lb/MMBTU
NOx	4,41
SOx	0,29
CO2	164
PODER CALORÍFICO DEL DIÉSEL	
43	MJ/kg
40566,03774	BTU/kg

Fuente: EPA – 1995

Cálculo de las emisiones

La ecuación 54 muestra el cálculo de emisiones por limpieza de vegetación

$$Emisiones = \frac{27 \text{ gCO}_2}{\text{ft}^2 \cdot \text{año}} * \frac{53800 \text{ ft}^2}{\text{well pad}} * 1 \text{ años} * \frac{\text{Kg}}{1 \cdot 10^3 \text{ g}} = \frac{1452,5 \text{ Kg CO}_2}{\text{pozo}} \quad (54)$$

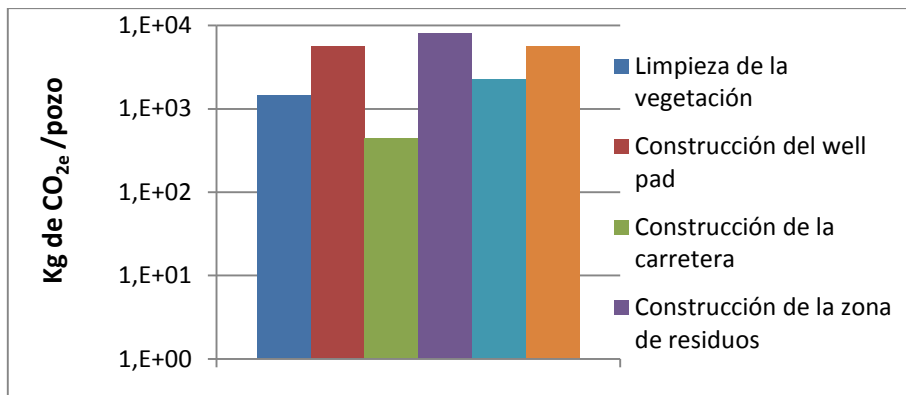
La ecuación 55 y 56 muestran el cálculo de emisiones debidas al consumo de combustible de uno de los equipos para el CO₂

$$\begin{aligned} \text{Energía} &= \frac{43 \text{ MJ}}{\text{Kg}} * 76 \text{ Kg diesel} * \frac{0,943 * 10^{-3} \text{ MMBTU}}{1 \text{ MJ}} \\ &= 3,081 \text{ MMBTU} \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \text{Emisiones CO}_2 &= \frac{164 \text{ lb}}{\text{MMBTU}} * 3,081 \text{ MMBTU} * \frac{1 \text{ kg}}{2,2 \text{ lb}} \\ &= 229,8 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{pozo}} \end{aligned} \quad (56)$$

La ecuación 54 y 55 se implementa para cada uno de los equipos como se mostró anteriormente, en la figura 17 se observan las emisiones estimadas para la construcción del “*well pad*”. (Escala logarítmica)

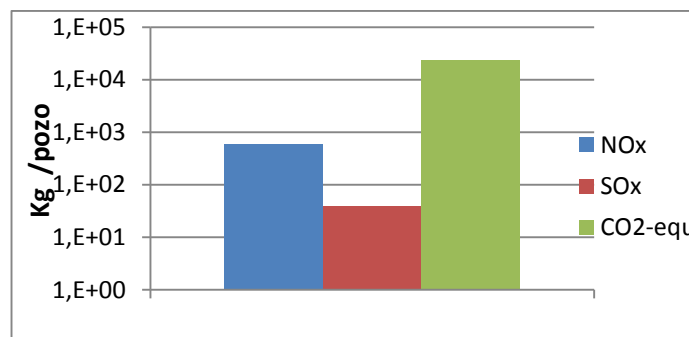
Figura 17: Emisiones debidas a la construcción del “*well pad*”.



En la figura 17 se puede concluir que la construcción de la zona de residuos representa la mayor cantidad emisión a la atmosfera, es de resaltar que la limpieza de la vegetación que corresponde al CO_{2e} que esas plantas dejaron de absorber durante el primer año de operación del pozo, las demás etapas como construcción del “*well pad*”, construcción de la carretera, reparación de caminos y construcción del embalse, son operaciones que se hacen solo una vez.

La figura 18 muestra el análisis de la generación de cada contaminante resaltando el CO_{2e}. (Escala logarítmica)

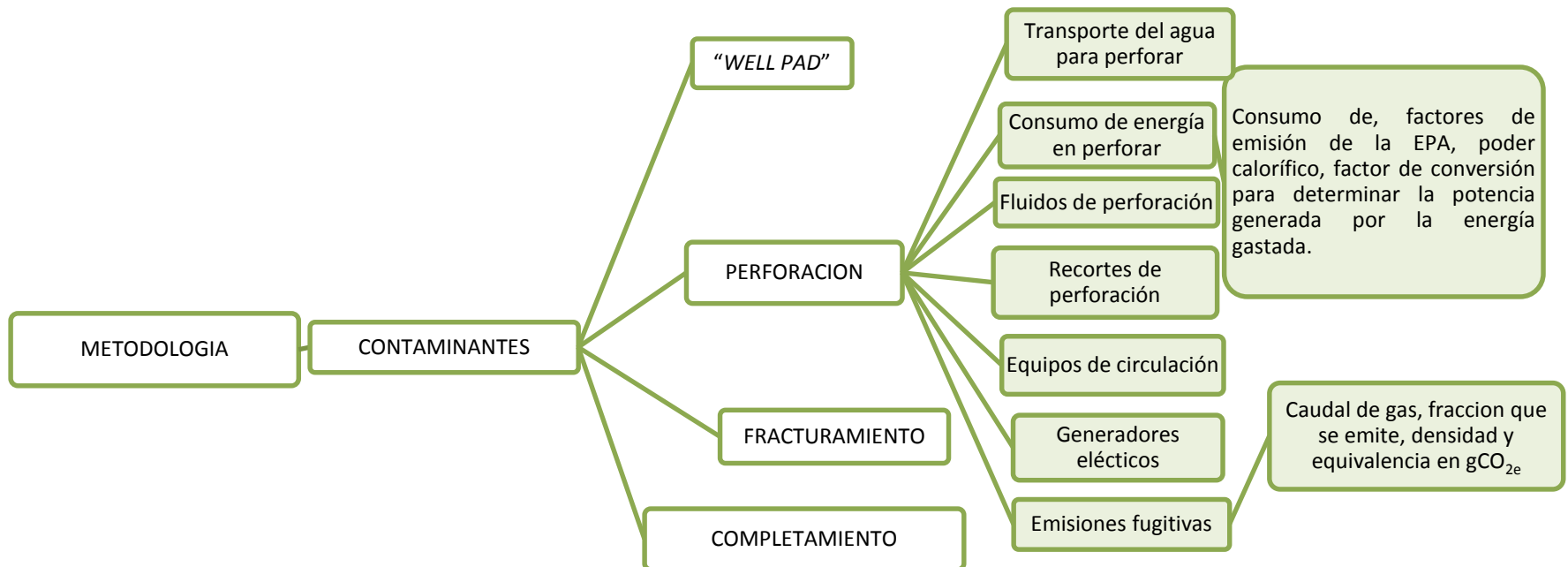
Figura 18: Contaminantes presentes durante la construcción del “*well pad*”



PERFORACIÓN

La figura 19 muestra el flujo de trabajo propuesto durante la perforación. Para estimar las emisiones de perforación se asumió un pozo de 4000 m (13100 ft), en el siguiente diagrama se observan las operaciones consideradas en esta etapa.

Figura 19: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para la perforación.



Contaminantes

La figura 20 muestra una representación gráfica de las subetapas seleccionada y los contaminantes durante la perforación.

Figura 20: Contaminantes presentes en cada operación durante la perforación



Fuente: Modificada de Air emissions from oil and gas development in the Eagle Ford

Información necesaria

La plataforma de perforación es impulsada por 3 generadores de 1200 KW que funcionan con diésel, además de la potencia del taladro, se necesitan los datos del combustible gastado en el transporte de materiales implementados en los lodos de perforación como agua, bentonita entre otros aditivos, combustible utilizado por los equipos de circulación y combustible utilizado en transporte de residuos.

Para las emisiones fugitivas se requiere características del gas tales como densidad, fracción de metano y su equivalencia en gramos de CO₂-equ para cuando este es emitido a la atmósfera o es quemado. En la tabla 37 se observa la información adicional requerida, cabe resaltar que en esta etapa nuevamente se utilizan los factores de la EPA enunciado en la tabla 36.

Tabla 37: Características del gas para las emisiones fugitivas

CARACTERISTICAS DEL GAS	
Fracción de CH4	0,85
Densidad g/ft3	19,23
EQUIVALENCIA DE CH4 EN CO2	
Quema	2,75
Emite	25

En esta etapa, a diferencia de la construcción del “*well pad*” se pueden presentar otros contaminantes como es el caso de compuestos orgánicos volátiles y el material particulado, se requiere de información adicional la cual se observa en la tabla 38.

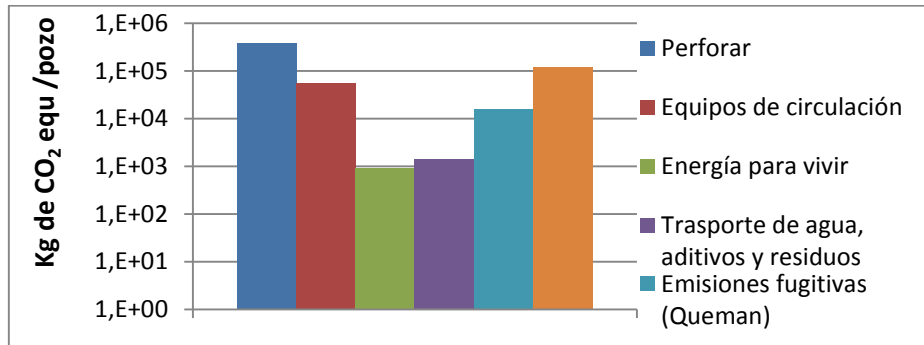
Tabla 38: Información para estimación de emisiones de COVs y PM2,5

Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad
Factor de emisión para COVs	0,60	g/hp-hr
Factor de emisión para PM 2.5	0,35	g/hp-hr
Potencia de los motores	3600	HP
Facción de la potencia que se utiliza	0,57	-
Tiempo en perforar	26,00	días
Tiempo que en realidad opera el taladro	0,50	-

Resultado de las emisiones.

Mediante las ecuaciones 55 y 56 implementadas para cada contaminante ($\text{CO}_2\text{-equ}$, NO_x y SO_x) y la información presentada en la tabla 37 y 38 se obtienen los siguientes resultados.

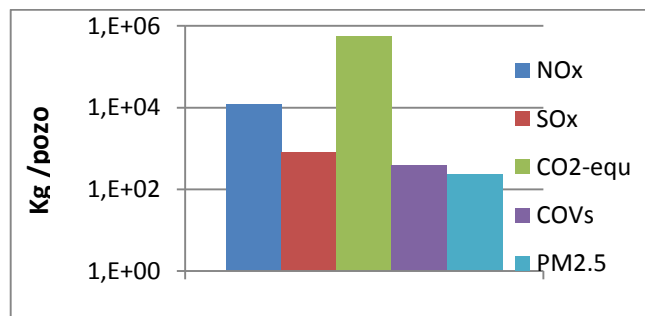
Figura 21: Emisiones debidas a la perforación



Como se observa en la figura 21, (Escala logarítmica) las emisiones debidas al combustible gastado para realizar la perforación representa la mayor causa de emisiones en esta etapa con 387980 kg de CO_2e / pozo, seguida por emisiones fugitivas, cabe resaltar que si estas emisiones superan los 2500 ft^3 de gas y son venteadas a la atmosfera, superarían las emisiones del taladro y serán la mayor fuente de contaminación durante esta etapa.

La figura 22 muestra el análisis de la generación de cada contaminante resaltando el CO_2e (Escala logarítmica).

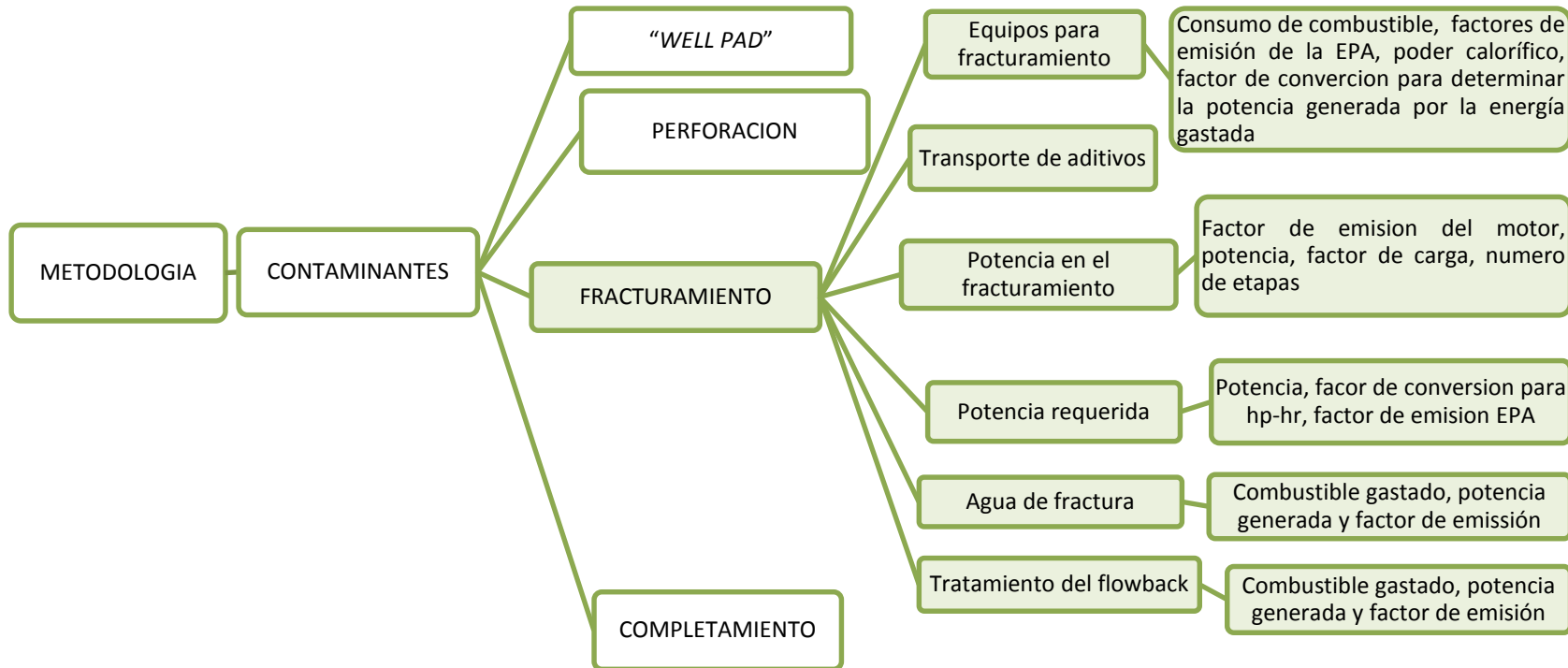
Figura 22: Contaminantes presentes durante la perforación



FRACTURAMIENTO HIDRAULICO

La figura 23 muestra el flujo de trabajo propuesto durante el fracturamiento hidráulico.

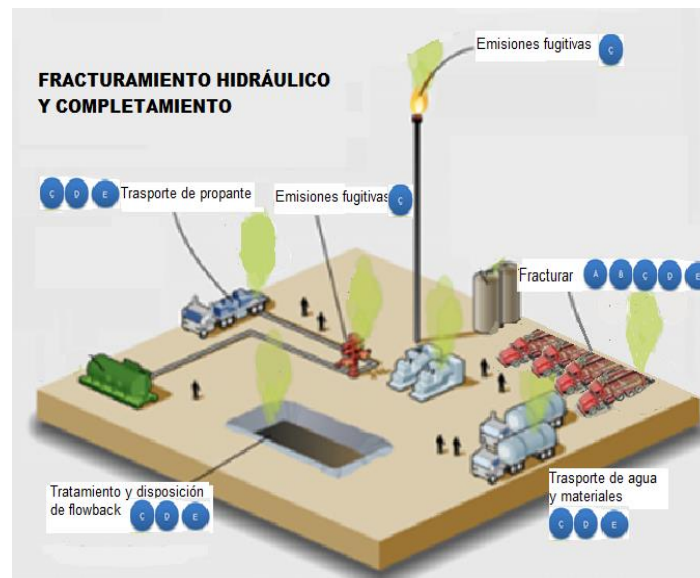
Figura 23: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para el fracturamiento



Contaminantes

La figura 24 muestra una representación gráfica de las subetapas seleccionada y los contaminantes durante la perforación.

Figura 24: Contaminantes presentes en cada operación durante el fracturamiento y completamiento



Fuente: Modificada de Air emissions from oil and gas development in the Eagle Ford

Información necesaria

Similar a las etapas anteriores, también se requiere la cantidad de combustible gastado en cada uno de los equipos implementados en cada operación, además, nuevamente se requieren de los factores de emisión de la EPA y de información adicional para los demás contaminantes (COVs y PM_{2,5}) mostrado en la tabla 39.

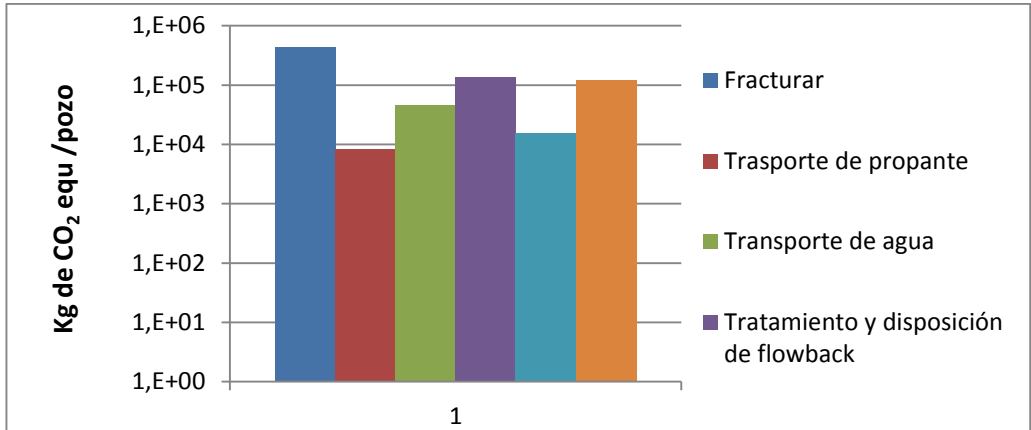
Tabla 39: Información para estimación de emisiones de COVs y PM2,5

Datos de entrada	Valor Numérico	Unidad
Factor de emisión para COVs	0,67	g/hp-hr
Factor de emisión para PM 2.5	0,40	g/hp-hr
Potencia - hora para cada etapa	40000	hp-hr/etapa
Fracción de potencia que se utiliza	0,50	-
Número de etapas	19	Etapas
Datos de camiones para disponer de residuos		
Factor de emisión para COVs	1,70	g/milla
Factor de emisión para PM 2.5	0,32	g/milla
Distancia	119	millas/viaje
Número de viajes	460	Viaje/pozo

Resultado de las emisiones.

Mediante las ecuaciones 55 y 56 implementadas para cada contaminante (CO₂-equi, NOx y SOx) y la información presentada en la tabla 39 (COVs y PM2,5) se obtienen los siguientes resultados.

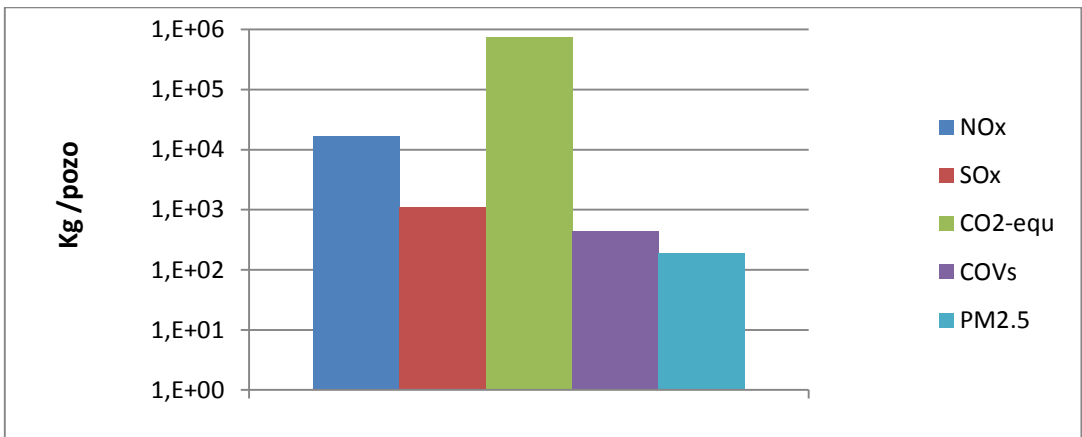
Figura 25: Emisiones debidas Al fracturamiento hidráulico



Similar a la etapa de perforación, de acuerdo con la figura 25 (Escala logarítmica), la mayor contaminación se genera por el combustible gastado para fracturar con aproximadamente 432675 kg de CO_{2e} / pozo, pero si las emisiones fugitivas son altas (alrededor de 2500 ft³ gas) y todas son venteadas, puede convertirse en la mayor fuente de contaminación atmosférica durante el fracturamiento.

La figura 26 (Escala logarítmica) muestra el análisis de la generación de cada contaminante resaltando el CO_{2e}.

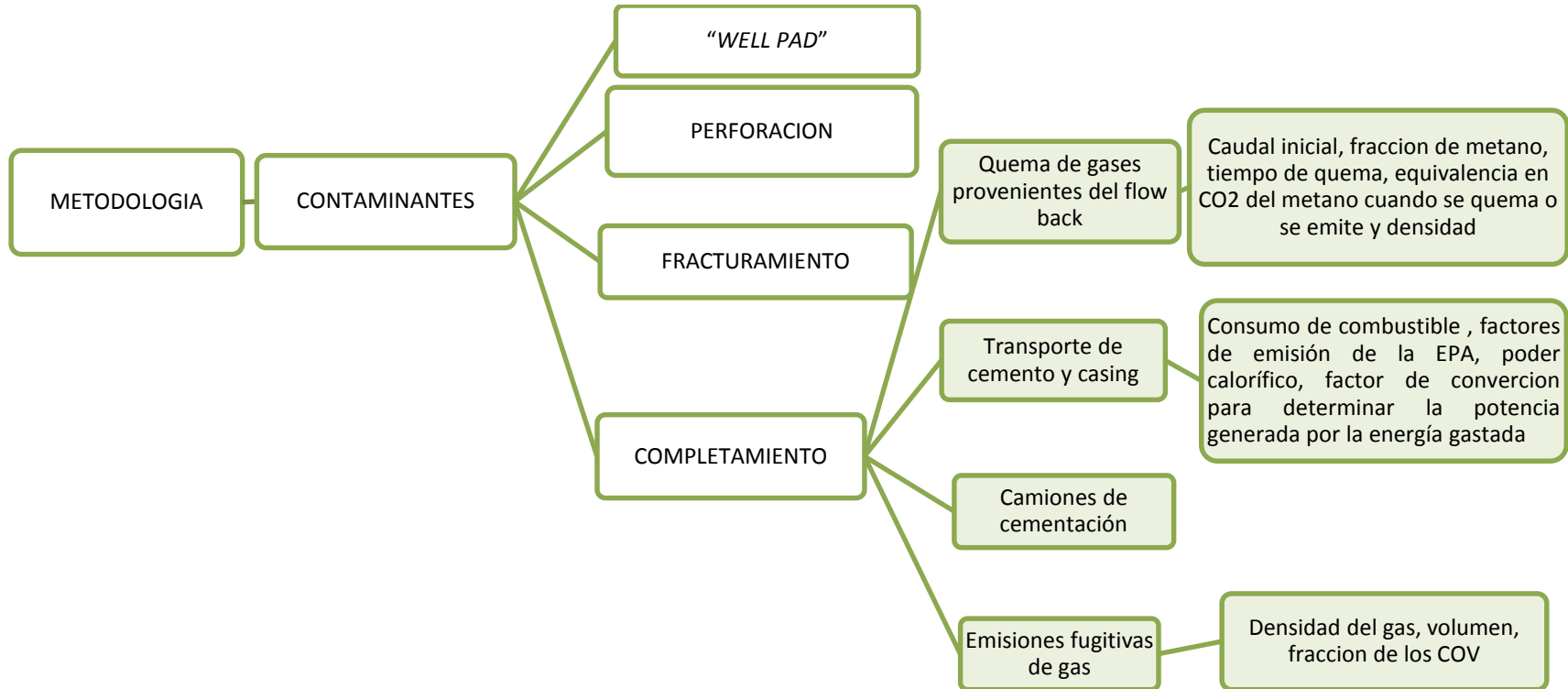
Figura 26: Contaminantes presentes durante el fracturamiento



COMPLETAMIENTO

La figura 27 muestra el flujo de trabajo propuesto durante el completamiento.

Figura 27: Sub – etapas estudiadas en la estimación de emisiones atmosféricas para el completamiento



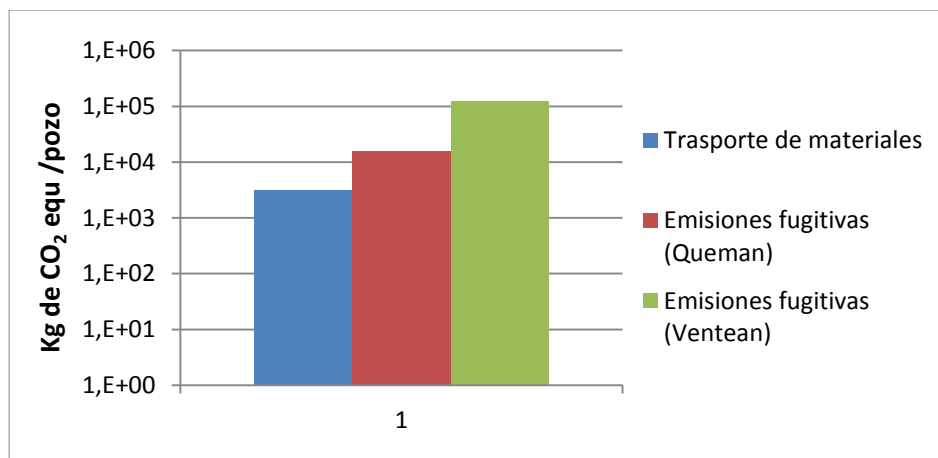
Información necesaria.

En esta etapa la principal fuente de contaminación son las emisiones fugitivas aunque también se tiene en cuenta el combustible gastado por los camiones utilizados en el transporte del casing y demás materiales, en esta etapa como información adicional solo se requiere la fracción de compuestos orgánicos volátiles (0,03).

Los días que dure el completamiento puede variar considerablemente, para este caso se asumió que el gas emitido es el equivalente al caudal de producción inicial durante aproximadamente 2 días.

Resultados de las emisiones.

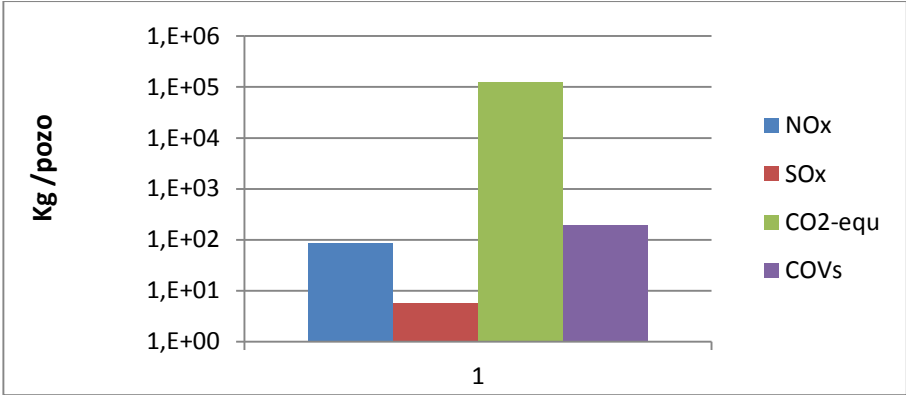
Figura 28: Emisiones debidas al completamiento



En esta etapa, de acuerdo con la figura 28 (Escala logarítmica), las emisiones debidas al transporte de materiales no es significativa, por lo tanto las emisiones fugitivas será la mayor fuente de contaminación, para cuando se ventean se presentan 122591 kg de CO_{2e} / pozo y cuando se queman 15667 kg de CO_{2e} / pozo, evidenciando que un factor determinante en la cantidad de emisiones esta dado en controlar las emisiones fugitivas cuando se ventea el gas.

La figura 29 (Escala logarítmica), muestra el análisis de la generación de cada contaminante resaltando el CO_{2e}

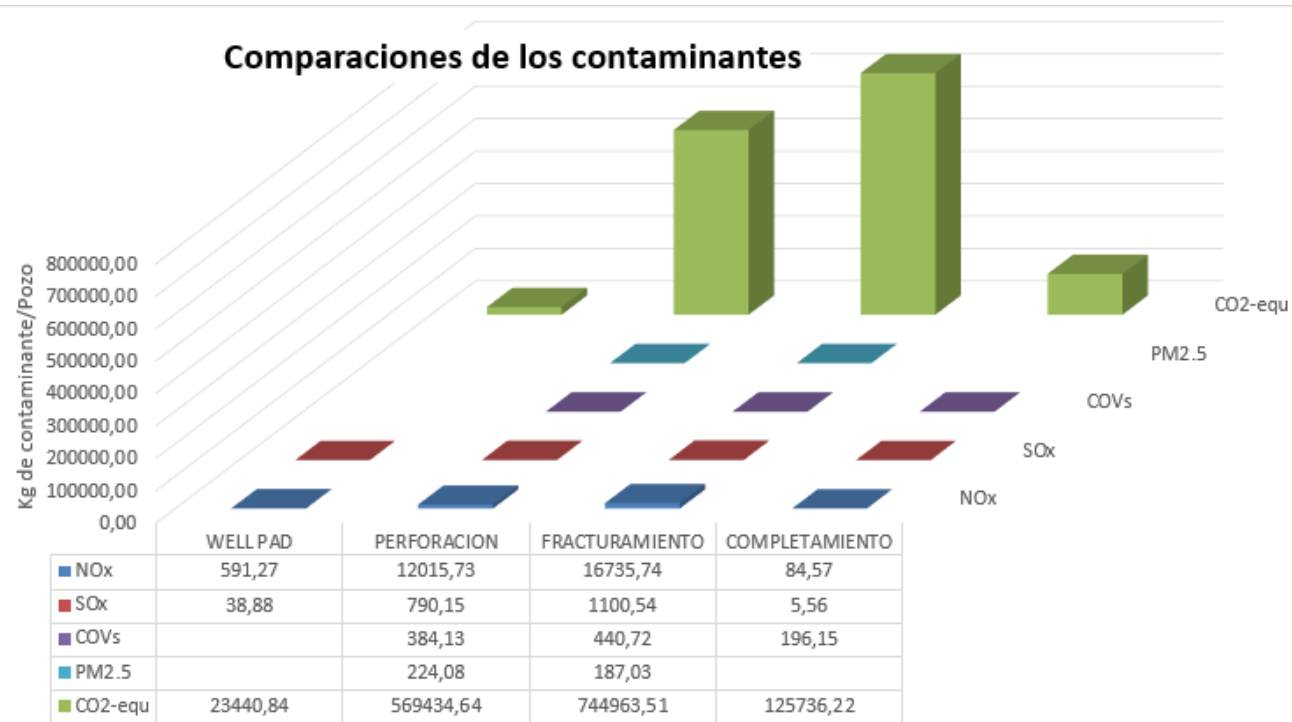
Figura 29: Contaminantes presentes en el completamiento



6. COMPARACION DE RESULTADOS POR ETAPA

La figura 30 muestra una comparación de cada una de las etapas analizadas resaltando la generación de los contaminantes analizados en cada una de ellas, se puede observar que el CO_{2e} es el contaminante con mayor generación, y la etapa más crítica el fracturamiento hidráulico.

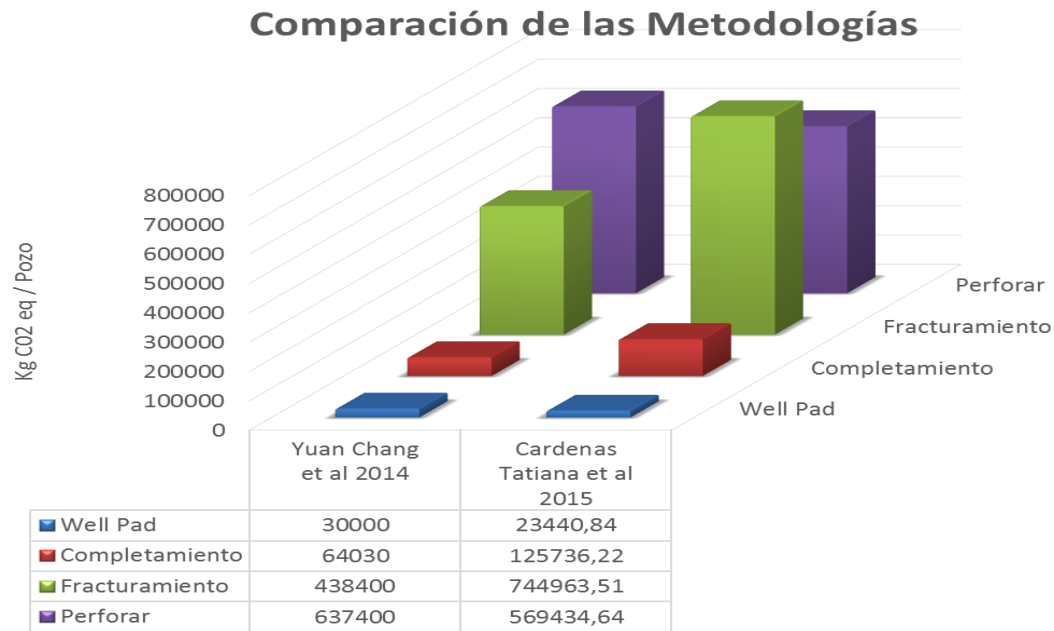
Figura 30: Comparación entre las emisiones generadas para diversos componentes en cada una de las etapas



7. COMPARACIONES DE RESULTADOS CON OTRA METODOLOGÍA (2014)

La figura 31 hace una comparación de la metodología propuesta en el presente informe y la de Yuan Chang (2014).

Figura 31: Comparación de la metodología propuesta con la metodología base realizada en el 2014



8. RESULTADO FINALES EN CADA UNA DE LAS ETAPAS ANALIZADAS

Figura 32: Resultados finales en cada una de las etapas

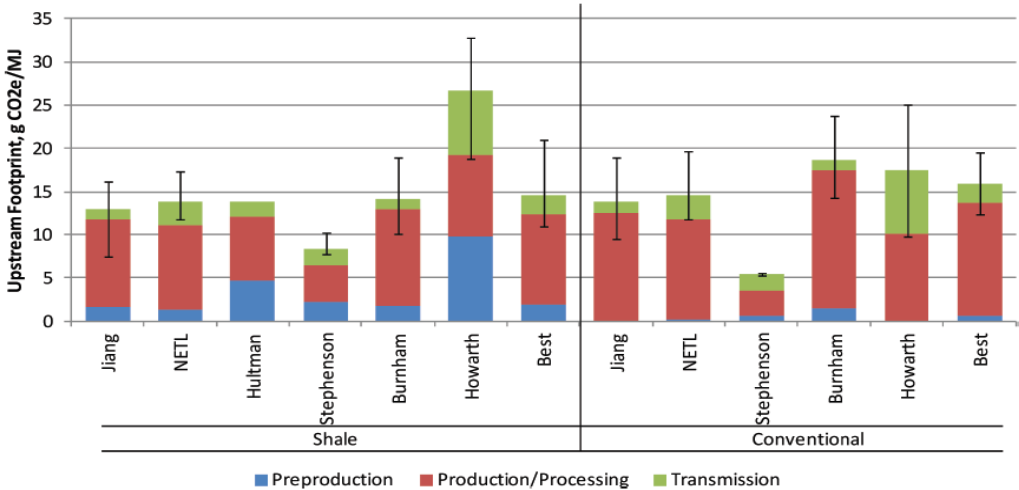
Contaminante	NOx	SOx	CO2-equ	COVs	PM2.5
Etapa					
"well pad"	591,27	38,88	23440,84		
Perforación	12015,73	790,15	569434,64	384,13	224,08
Fracturamiento	16735,74	1100,54	744963,51	440,72	187,03
Completamiento	84,57	5,56	125736,22	196,15	
TOTAL	29427,31	1935,13	1463575,21	1021,00	411,112

La figura 32 muestra los resultados finales obtenidos en el presente estudio, la zona punteada en color rojo representa las etapas analizadas con la metodología propuesta, siendo los valores destacados en verde la generación de cada contaminante durante la preproducción. Las etapas resaltadas de color negro corresponde a aquellas que no se estudiaron en el presente análisis y cuyos resultados se extrajeron del estudio propuesto por Venkatesh A, Jaramillo P, Griffin W M and Matthews H S 2011 Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions from United States natural gas end-uses and its effects on policy.

9. COMPARACIONES ENCONTRADAS EN LA LITERATURA

A continuación se mostraran algunos estudios encontrados en la literatura como es el propuesto por Christopher L. Weber and Christopher Clavin los cual en su investigación afirma que el gas de esquisto podría tener importantes beneficios para el clima si reemplaza más petróleo o al carbón, para este estudio se revisaron seis investigaciones recientes para producir un análisis de incertidumbre Monte Carlo de la huella de carbono de gas shale y producción de gas natural convencional, en la figura 33 se observan las comparaciones de los respectivos estudios.

Figura 33: Comparación entre los estudios realizados para estimar la contaminación atmosférica.



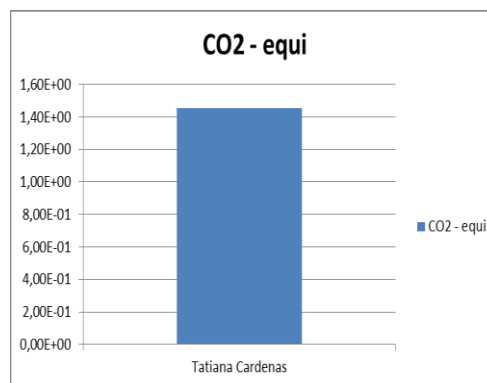
Fuente: Christopher L. Weber*, and Christopher Clavin.

Como se observa en la figura 33 el aumento de las emisiones de un shale gas a un gas convencional es muy leve como lo muestran los resultados propuestos por Jiang (Metodología 1 de este estudio), NETL, Best, stephenson (metodología 4 de este estudio), además se puede observar que el excedente de emisiones se da en la etapa de preproducción debido al fracturamiento hidráulico multi-etapas, emisiones fugitivas y tratamiento de flowback las cuales son etapas adicionales comparadas con un yacimiento convencional; mientras que Howarth presenta un

gran incremento en preproducción que incluso supera las emisiones totales propuestas por stephenson (metodología 4 de este estudio) lo cual se sale de la tendencia mostrada por los otros autores. En la figura 34 y 35 se observa un análisis de los resultados obtenidos en esta investigación con respecto a la energía generada.

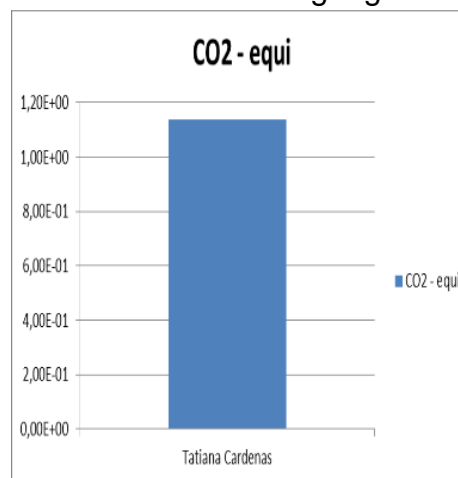
Analizándolo respecto a la energía		Unidad
Producción de gas	1,00E+09	ft3
Poder calorífico	950	BTU/ft3
Energía	9,50E+11	BTU
Energía	1,01E+09	MJ
CO2 - equi/energía	1,45E-03	kg/Mj
CO2 - equi/energía	1,45E+00	g/Mj

Figura 34: Resultados de emisión en función de la energía generada



Analizándolo respecto a la energía		Unidad
Producción de gas	1,00E+09	ft3
Poder calorífico	950	BTU/ft3
Energía	9,50E+11	BTU
Energía	1,01E+09	MJ
CO2 - equi/energía	1,13E-03	kg/Mj
CO2 - equi/energía	1,13E+00	g/Mj

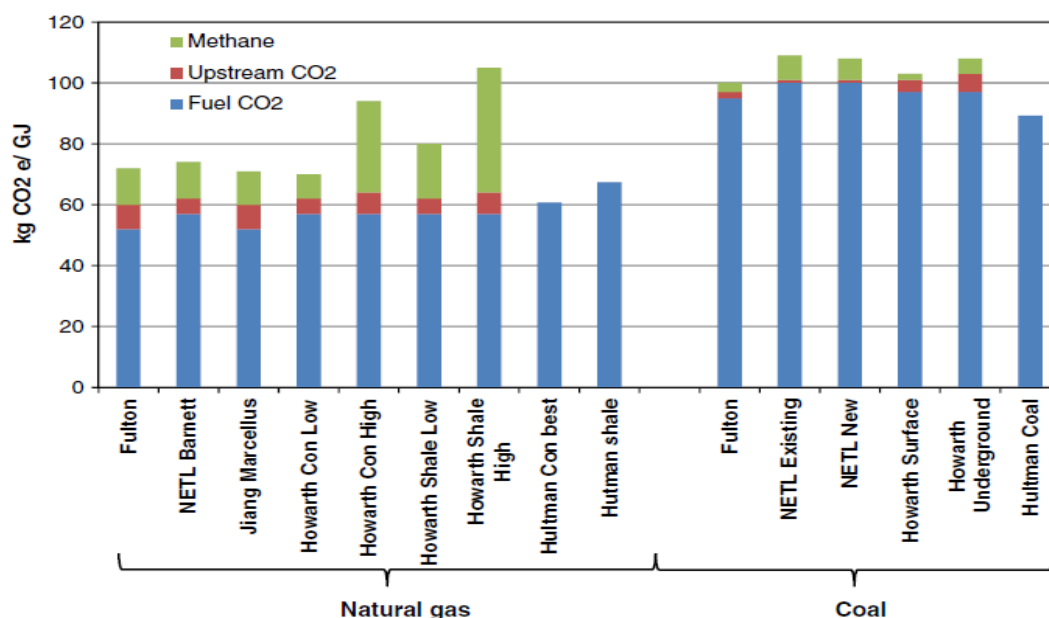
Figura 35: Resultados de emisión en función de la energía generada



El análisis se realiza teniendo en cuenta una producción de 1×10^9 ft³ de gas durante un periodo aproximado de 10 a 15 años de vida útil del pozo, se analizaron 2 escenarios, en la figura 34 se analiza cuando todas las emisiones fugitivas son

venteadas (1,45 g/MJ) y en la figura 35 se asumen que las emisiones son quemadas (1,13 g/MJ)

Figura 36: Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el gas y carbón.



Fuente: Anjuman Shahriar Rehan y Sadiq Solomon Tesfamariam 2014

En la figura 35, Shahriar Rehan y Sadiq Solomon Tesfamariam realizaron una investigación en la cual compararon el gas natural con el carbón resaltando que los gases de efecto invernadero del gas natural es menor que la de carbón, independientemente de las metodologías utilizadas por los investigadores a excepción de los estudios realizados por Howarth et al. (2011). La variabilidad en la estimación de gases de efecto invernadero se debe a las diferencias en los factores de emisión subyacentes y los diferentes factores potenciales de calentamiento atmosférico utilizados para el metano.

10. CONCLUSIONES

La preproducción en los yacimientos no convencionales de shale gas, representa una etapa crítica dado que en su corto periodo de desarrollo aproximadamente de 6 a 12 meses aporta el 13% del total de la contaminación emitida por el pozo durante su vida útil que en promedio se estima de 10 a 15 años.

De acuerdo con la metodología propuesta la construcción del “*well pad*” representa el 1,6% del total de las emisiones generadas, la perforación el 39% debido a la energía consumida en el taladro; el fracturamiento hidráulico el 51% dado el alto consumo de combustible en cada una de las etapas y al manejo de las aguas de retorno del proceso y el completamiento el 8,4%, este valor está directamente influenciado por el tratamiento de las emisiones fugitivas que se presentan.

En lo relacionado con el tratamiento de las emisiones fugitivas se plantearon dos escenarios, cuando se quema y cuando se ventea, durante la perforación ventearlo representa el 21,52% y quemarlo el 3,4%, en el fracturamiento hidráulico ventearlo representa el 16% y quemarlo el 2,5%; durante el completamiento ventearlo representa el 97,5% y quemarlo el 83,28% estos valores se deben a que durante el completamiento la subetapa más representativa está asociada a las emisiones fugitivas, así mismo la relación venteo quema en completamiento es de 6 a 1, a partir de lo anterior se concluye que quemar el gas representa una disminución significativa en la generación de CO_{2e} es de resaltar que lo anterior está sujeto a la relación de CO₂ y metano y no incluye los efectos que se puedan derivar los acción de otros contaminantes durante la quema o el venteo del gas.

Es posible evidenciar que el contaminante que más se produce en todas las etapas seleccionadas es el CO_{2e} que comprende las emisiones de CO₂ y CH₄ con un aporte del 97,8%, el NO_x con un aporte del 1,96%, el SO_x con un 0,12%, los COV_s con un 0,068% y el PM_{2,5} con un 0,027%.

Los estudios encontrados en la literatura por Christopher L. Weber and Christopher Clavin concluyen que la preproducción genera emisiones en un rango de 0 a 2,5 gCO_{2e} / Mj exceptuando los estudios realizados por Howarth y Hultmant; la metodología propuesta se estima en un rango de 1,3 gCO_{2e} / MJ dicho valor varia en virtud del flujo de producción supuesto.

11.RECOMENDACIONES

En el presente estudio la cuantificación de la generación de CO_{2e} asociada a la limpieza de la vegetación solo se tuvo en cuenta para el primer año de operación del pozo; teniendo en cuenta que operaciones como perforación fracturamiento hidráulico y completamiento solo se realizan una vez. Por lo tanto es necesario incluir en etapas posteriores la cantidad de CO_{2e} que esas plantas dejaron de absorber.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 CHANG, Yuan, et al. Shale-to-well energy use and air pollutant emissions of shale gas production in China. *Applied Energy*, 2014, vol. 125, p. 147-157 (Incluye material complementario)
- 2 FACTORES DE LA US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [en línea] [Consultado el 03 de Junio del 2015] Disponible en internet: <http://www.epa.gov/>
- 3 JIANG, Mohan, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas. *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, no 3, p. 034014. (Incluye material complementario)
- 4 PROPIEDADES DEL GAS [en línea] [Consultado el 03 de Junio del 2015] Disponible en internet: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>
- 5 ROY, Anirban A.; ADAMS, Peter J.; ROBINSON, Allen L. Air pollutant emissions from the development, production, and processing of Marcellus Shale natural gas. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, vol. 64, no 1, p. 19-37. (Incluye material complementario)
- 6 SHAHRIAR, Anjuman; SADIQ, Rehan; TEFAMARIAM, Solomon. Life cycle greenhouse gas footprint of shale gas: a probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, vol. 28, no 8, p. 2185-2204.
- 7 STEPHENSON, Trevor; VALLE, Jose Eduardo; RIERA-PALOU, Xavier. Modeling the relative GHG emissions of conventional and shale gas production. *Environmental science & technology*, 2011, vol. 45, no 24, p. 10757-10764. (Incluye material complementario)
- 8 WEBER, Christopher L.; CLAVIN, Christopher. Life cycle carbon footprint of shale gas: Review of evidence and implications. *Environmental science & technology*, 2012, vol. 46, no 11, p. 5688-5695.