

ESTIMACION DE FACTORES DE EMISION DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Roberto Parra Z., Grover Apaza M., Afnan Agramont A.

Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos – IIDEPROQ de la Universidad Mayor de San Andrés – Programa Nacional de Cambios Climáticos – PNCC - La Paz – Bolivia

Keywords: Greenhouse effect, gas emission, residual waters, emission factors

ABSTRACT

An estimation of factors of gas emission due to greenhouse effect in a plant for treatment of residual waters has been accomplished by means of water and gas analyses.

RESUMEN

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Puchukollo Bajo – PTARPB consta de dos series de lagunas (II y III), cada una con seis, la laguna 1 es anaeróbica, la 2, 3, 4 y 5 son facultativas y la 6 es aeróbica. En las primeras lagunas de ambas series se produce la mayor cantidad de gases de CH₄ y CO₂ principales causantes del efecto invernadero. Se ha determinado las tasas (TEM) y factores de emisión (FE) de gases de efecto invernadero (GEI) usando el método de cámaras estáticas que permiten capturar los gases en periodos de tiempo definidos. Se obtuvieron los siguientes resultados de emisiones de GEI en la laguna II-1 de “Puchukollo”: TEM CH₄ = 14,51 g/s, FE CH₄ = 97 272,34 g/[mg/L de DBO]; 457,61 TM/año de CH₄ y TEM CO₂ = 2,91 g/s, FE CO₂ = 19 537,19 g/[mg/L de DBO]; 91,91 TM/año de CO₂, el flujo másico total de CH₄ en la PTAR “Puchukollo” es de 1 416,17 TM/año y el flujo másico total de CO₂ es de 2 635,45 TM/año. La PTARPB emite 35.207,36 TM/año de CO₂ equivalente, de los que 1 052,07 TM/año de CH₄ son emitidas en las lagunas 1 de las series II y III, que corresponde a 24 197,61 TM/año de CO₂ (GWP = 23), o sea es el 67 % del total de CO₂ emitido. Por captación de GEI en las primeras lagunas de ambas series y combustión para convertirlas en CO₂, H₂O y calor, la venta de bonos de carbono sería un proyecto prometedor, enmarcado en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) aplicado a la PTARPB.

Corresponding author:

INTRODUCCION

Durante los últimos 200 años las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero: CO₂, CH₄ y N₂O se han incrementado debido a actividades antropogénicas tales como producción y uso de combustibles fósiles y otras actividades agrícolas e industriales. Para comparar el efecto entre diferentes gases, sus potenciales globales de calentamiento (GMP) son estimados y referenciados al CO₂, que se le da un valor de 1, al CH₄ un valor de 23 y al N₂O un valor de 310¹. Procesos de tratamiento de aguas residuales pueden contribuir a generar gases de efecto invernadero a través de la producción de CO₂ y CH₄ desde los procesos en sí o desde la producción de CO₂ a partir de la energía requerida para el tratamiento. El CH₄ producido desde Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR, se ha encontrado que constituye cerca de 5 % de las fuentes de metano global².

Para la depuración de las aguas residuales generadas en la ciudad de El Alto del Departamento de La Paz-Bolivia se construyeron Lagunas de Estabilización emplazadas en la localidad de Puchukollo Bajo. La operación y mantenimiento de estas lagunas de estabilización que constituyen la Planta de tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puchukollo, está a cargo de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento - EPSAS. La PTAR Puchukollo entró en funcionamiento el 9 de noviembre de 1998 y está ubicada al Oeste de la ciudad de El Alto, a una

¹ Resumen general del inventario de emisiones de GEI de Bolivia del año 2002 y 2004 en términos de CO₂-eq.

² El-Fadel, M. Massoud, 2001. Methane emissions from wastewater management. Environmental Pollution

altura de 3,918 msnm. La Planta Puchukollo tiene una superficie total de 127 Ha, en 48 Ha, fueron construidas 13 lagunas de estabilización, la superficie restante será utilizada para la ampliación de la Planta, ver Figura 1

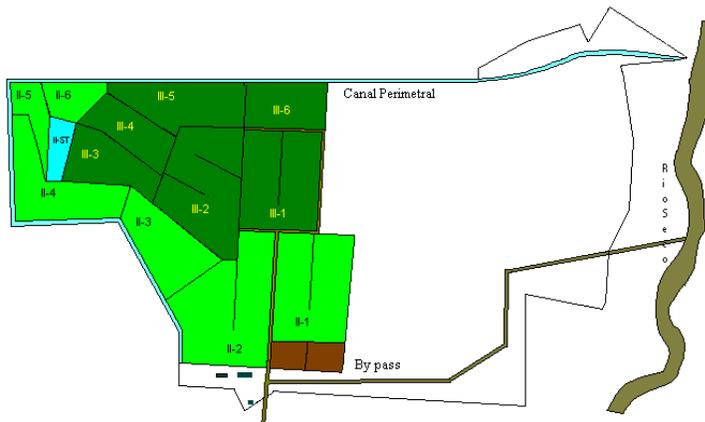


Figura 1. Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Puchukollo"

Tabla 1. Características de la PTAR "Puchukollo"

Lagunas	Profundidad M	Área m ²	Volumen m ³
SERIE II			
II-1 Anaerobia-facultativa	4,82	54 873,00	190 818,09
II-2 Facultativa	3,95	52 943,80	120 251,60
II-3 Facultativa	2,80	29 898,00	64 653,43
II-4 Maduración	1,60	36 304,40	34 342,51
II-5T Totoras	1,67	9 723,75	9 456,94
II-5 Maduración	1,44	17 950,00	16 590,98
II-6 Acabado	2,56	13 411,50	23 730,40
T O T A L Serie II		215 104,45	459 843,95
SERIE III			
III-1 Anaerobia-facultativa	4,66	71 282,50	224 418,95
III-2 Facultativa	4,20	59 788,75	154 361,00
III-3 Facultativa	1,76	34 987,50	39 085,27
III-4 Maduración	1,75	25 772,50	27 463,63
III-5 Maduración	1,80	24 043,25	28 225,98
III-6 Acabado	2,55	20 794,25	39 342,49
T O T A L Serie III		236 668,75	512 897,32
T O T A L II + III		451 773,20	972 741,27

FUENTE: Gerencia Técnica de "Puchukollo"

La PTAR - "Puchukollo" funciona con el propósito de reducir el contenido de DBO, bacterias/parásitos, contenidos de nitrógeno y fósforo de los efluentes acuosos de uso domiciliario e industrial provenientes de la ciudad de El Alto de La Paz. La planta funciona con dos series (II y III) paralelas formadas por seis lagunas cada una. En la serie II adicionalmente existe una laguna experimental con pequeñas plantaciones de totora. El tiempo de retención del agua es de 9 días, para un caudal medio de 317 L/s. La primera laguna de cada serie es anaeróbica, la segunda y tercera

facultativa, la cuarta y quinta de maduración y la sexta de pulimento. La serie de lagunas funciona como un reactor de flujo en pistón, con interconexiones tubulares entre cada laguna de geometría de forma rectangular. Para mejorar la eficiencia y minimizar las zonas muertas en las primeras dos lagunas se tienen instalados diques intermedios para un flujo en chicanas. En la tabla 1 (arriba), se muestran algunas características geométricas de las lagunas de "Puchukollo" En la tabla 2, se aprecia la calidad del agua que ingresa a la PTAR "Puchukollo" y la que sale después del proceso de purificación.

Tabla 2 Parámetros de las aguas residuales de "Puchukollo"

PARAMETROS		PROMEDIO/2008		
Descripción	Unidad	Afluente a planta	Efluente II-6	Efluente III-6
DBO	mg/l O ₂	502,5	100,0	114,0
DQO	mg/l O ₂	1335,8	399,6	403,0
TOTAL DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/l	563,6	88,9	79,5
FÓSFORO	mg/l P	14,4	9,2	8,6
NITRÓGENO TOTAL	mg/l N	99,6	88,8	93,5
TEMPERATURA	°C	13,6	14,5	14,6
pH	Unidades de pH	8,2	7,9	7,9
AMONIACO TOTAL	mg/l N	98,1	80,6	86,9
CAUDAL	l/s	317,1	132,9	168,9
OXÍGENO DISUELTO	mg/l	0,0	3,6	3,5

Fuente: Gerencia Técnica de "Puchukollo"

En el presente estudio se miden experimentalmente los factores de emisión de GEI: CH₄ y CO₂ entre los meses de noviembre a diciembre del año 2,008 y se estiman las contribuciones netas anuales de la PTAR – Puchukollo

PARTE EXPERIMENTAL Y METODOLOGIA

Sitios de muestreo

El muestreo tanto de aguas residuales como de gases emitidos por las lagunas de la PTAR – Puchukollo, se ha realizado entre el 4 noviembre al 15 de diciembre del año 2008, con frecuencias de 1 a 3 días. Las muestras en las lagunas 1 a la 4 de la serie II se han tomado al inicio y al final de cada laguna, en las lagunas 5 y 6 la toma de muestra solo se ha realizado en el punto medio de la laguna. En el primer caso se ha visualizado una variación importante en los flujos y composición de la entrada con respecto a la salida, en el segundo caso la variación ha sido mínima, por esto solo se muestreo en el punto medio de estas lagunas.

Muestreo y Análisis de Aguas y Gases

Para tomar muestras de agua de las lagunas, se ha usado un tomador de muestras de nombre Rutner y del tipo Kemmerer, el cual toma muestras a la profundidad requerida. Los análisis de aguas necesarios se han realizado en el laboratorio del IIDEPROQ.

Las muestras de gases tomadas en las lagunas han sido realizadas con ayuda de cámaras estáticas, bombas succionadoras y bolsas Tedlar. Los gases han sido inyectados al cromatógrafo usando jeringa hipodérmica de 1 cm³ de capacidad. Para el análisis de los gases, el cromatógrafo de gases usado fue de marca SHIMADZU - MOD: GC – 14B, Columna capilar: Carboxen: N°: 18950 – 02A approved by ARDY, 30 (m) x 0.53 (mm) x 0.5 µm film thickness. Detector: TCD. El gas de arrastre empleado es helio a 100 KPa de presión.

Medición de flujos de GEI

Al emitirse los GEI a la atmósfera por las lagunas de estabilización, estos son diluidos por las corrientes de aire atmosférico convirtiéndose en inmisiones, por esto es necesario contar con dispositivos capaces de atrapar los GEI

emitidos. Para esto se utiliza una cámara estática, que funciona sin entrada ni salida de aire, de tal manera que se permitió la acumulación de GEI con el tiempo y con esto las concentraciones de los GEI, especialmente CH_4 y CO_2 , subieron a niveles que garantizan resultados con poca incertidumbre.

En la figura 2, se muestra un esquema de la cámara estática que ha sido usada en este proyecto, consiste de una plataforma flotante de dimensiones aproximadas 48 cm x 48 cm x 50 cm construida con lámina de acrílico transparente, la cámara cúbica no tiene base y en la parte superior se instala un agitador, para lograr la uniformidad del gas dentro de la cámara antes de la toma de muestra. Después de un tiempo – 2 o más días- de acumulación de gases emitidos, del tubo lateral se toma muestras de gas para su análisis químico.

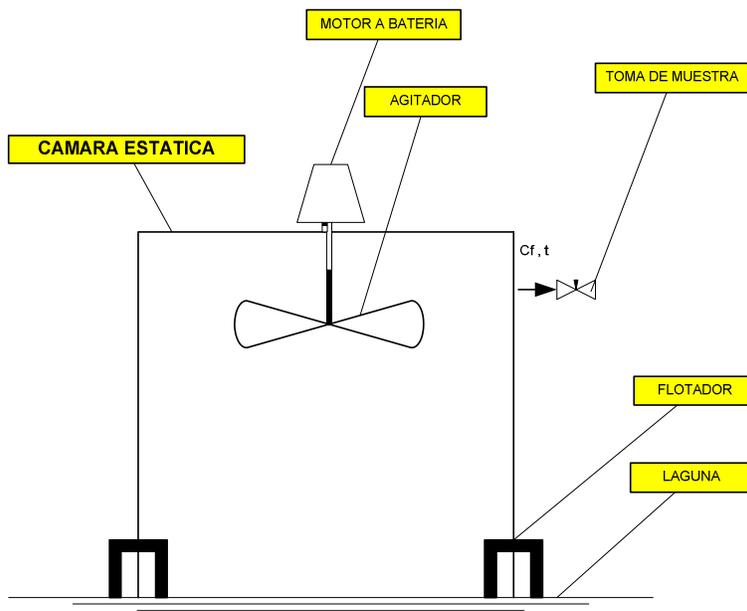


Figura 2. Esquema del Sistema de Cámara Estática Flotante

El flujo de gas másico de emisión del gas C, se calcula según la siguiente ecuación³:

$$J = \frac{dc}{dt} \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H \quad (1)$$

Donde:

J = El flujo másico de emisión del gas C, $\text{g/cm}^2 \text{ s}$

$\frac{dc}{dt}$ = variación con el tiempo de la concentración de la especie gaseosa C a la salida de la cámara, $\text{g/cm}^3 \text{ s}$

M = peso molecular del GEI, g/mol

P = presión atmosférica en el sitio de muestreo, mm Hg

T = Temperatura absoluta durante el muestreo, K

H = altura de la cámara estática por encima de la superficie del agua

V_0 , P_0 , T_0 = volumen del gas, presión atmosférica, temperatura absoluta del aire bajo condiciones estándar.

Entonces, para medir el flujo másico de GEI en un punto determinado de la laguna, primero en $t = 0$ se instala la cámara estática anclándola para evitar que esta sea trasladada por el viento, se toma la primera muestra con jeringa y también se toman muestras de agua, se miden las temperaturas ambiental y temperatura del agua de la laguna (T) y el oxígeno disuelto (OD). Estas medidas se realizan periódicamente durante varios días ($t = 2, 4, 7, 9$ días), la muestra de gas se toma con jeringa, pinchando la silicona, luego sellándola con el cuidado de que el gas captado en la

³ Song, Wang, Zhao. 2005. Emission of CO_2 , CH_4 and N_2O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China. Atmospheric Environment 40 (2006) 6879-6885

cámara estática no salga, la última muestra es colocada en una bolsa TEDLAR, con ayuda de la bomba succionadora. Finalmente las muestras son trasladadas a los laboratorios del IIDEPROQ donde son analizadas por cromatografía de gases.

Cálculo de Factores de Emisión

Usando la ecuación 1, se calculan valores de flujo másico (J) para obtener las emisiones de GEI en las lagunas de estabilización de aguas residuales, considerando que los valores han sido obtenidos en condiciones representativas de la operación normal de la planta. Las emisiones de cada GEI se pueden expresar en cualquiera de los siguientes términos:

- Tasa de emisión, masa de contaminante emitida por unidad de tiempo:
Se calcula para cada GEI, a partir del flujo másico de gas emitido por el área del espejo de agua de cada laguna, o sea:

$$TEM = J * A_T \quad (2)$$

Donde:

TEM = Tasa de emisión, g/s

J = Flujo másico de GEI, g/cm² s

A_T = Área del espejo de agua de la laguna, cm²

- Factor de emisión, masa de contaminante emitida por unidad de actividad del proceso:
La actividad del proceso es la purificación de aguas residuales, que puede expresarse como variación del valor de DBO, es decir, Δ DBO definida como la diferencia entre el DBO al inicio y al final.
Conociendo el tiempo de residencia del agua en la laguna Tr, se puede calcular el factor de emisión FE para una laguna específica, con la siguiente ecuación:

$$FE = TEM \left[\frac{T_r}{\Delta DBO} \right] \quad (6) \quad (3)$$

Donde:

FE = Factor de emisión, g/[mg/L de DBO]

Tr = Tiempo de residencia, s

ΔDBO = variación de DBO, mg/L

RESULTADOS, DISCUSION

Resultado de la Serie II de la PTAR "Puchukollo"

La primera campaña de medición de GEI se inició la segunda quincena del mes de octubre y finalizó a fines del mismo mes. La segunda campaña se efectivizó desde inicios del mes de noviembre al 15 de diciembre del año 2008. Para la medición de flujo de GEI en las lagunas de la serie II, se han instalado cámaras estáticas, ubicando una cámara al ingreso y otra a la salida de las lagunas 1-2-3-4, en las lagunas 5 y 6 sólo se instaló una cámara en el centro de cada una. Reemplazando valores en la Ec. 1, se obtiene el flujo másico de emisión del CH₄ y del CO₂ (J), luego se calcula la TEM según la ecuación 2 y finalmente se calcula el factor de emisión (FE) con la ecuación 3. Sin embargo, para el cálculo del FE es necesario la variación del DBO en cada laguna, la misma fue obtenida por muestreo y análisis químico de las aguas residuales tratadas a la entrada y salida de cada laguna, los valores obtenidos del DBO y DQO se resumen en la tabla 3. En cada laguna, se observa una baja eficiencia de la remoción del DBO, resultando una eficiencia global de 66,08 %. En base a estos datos, en la tabla 4 se muestran los resultados del cálculo del J, de la TEM, del FE para cada laguna y las emisiones totales por año. Según la tabla 4, con referencia a las emisiones del CO₂, se evidencia que en las lagunas II-2-3 y 4 se efectúan preponderantemente procesos fermentativos aeróbicos. En cuanto a las cantidades globales emitidas de CH₄ y CO₂, la relación es de 1 a 2 respectivamente, esto debido a que principalmente en "Puchukollo" los procesos fermentativos aeróbicos, son los más importantes para la depuración de aguas residuales; sin embargo, debemos siempre considerar los bajos porcentajes de remoción de la DBO que probablemente se deban a las bajas temperaturas u otros aspectos técnicos de diseño y de operación. Entonces, la mayoría de las emisiones de CH₄ son principalmente en la laguna II-1, este gas tiene un potencial global de calentamiento (GWP) de 23 veces más que el CO₂, por lo que de la tabla 4 se deduce que el 72,7 % de las emisiones de metano corresponden a la laguna II-1, y que las emisiones totales para el año 2008 en CO₂ equivalente son de 15 840,7 TM (=633,41*23+1 272,27). Por estas consideraciones, sería

pertinente realizar estudios para captar el CH₄ de la laguna II-1 y convertirlo a CO₂ por combustión y de esta forma disminuir efectivamente el efecto invernadero del CH₄ sobre el cambio climático.

Tabla 3. DQO y DBO de las lagunas de "Puchukollo"

PARAMETRO	LAGUNA II-1	LAGUNA II-2	LAGUNA II-3
Tiempo de residencia, s =	777 600	777 600	777 600
DBO i, mg/L =	401	312	249
DQO i, mg/L =	1 270	879	805
DQO/DBO i =	3,17	2,82	3,23
DBO f, mg/L =	285	256	200
DQO f, mg/L =	893	796	698
DQO/DBO f =	3,13	3,11	3,49
% DE REMOCIÓN DEL DQO =	29,69	9,44	13,29
% DE REMOCIÓN DEL DBO =	28,93	17,95	19,68

PARAMETRO	LAGUNA II-4	LAGUNA II-5	LAGUNA II-6
Tiempo de residencia, s =	777 600	777 600	777 600
DBO i, mg/L =	205	177	172
DQO i, mg/L =	715	619	543
DQO/DBO i =	3,49	3,50	3,16
DBO f, mg/L =	175	165	136
DQO f, mg/L =	625	513	476
DQO/DBO f =	3,57	3,11	3,50
% DE REMOCIÓN DEL DQO =	12,59	17,12	12,34
% DE REMOCIÓN DEL DBO =	14,63	6,78	20,93

Tabla 4. Resultados de Emisiones por Laguna

GEI	LAGUNA	J, g/cm ² s	TEM, g/s	FE, g/(mg/L DBO)	TM / AÑO
CH ₄	II - 1	2,64E-08	14,51	97 272,34	457,61
	II - 2	5,77E-09	3,05	42 402,30	96,30
	II - 3	3,20E-09	0,96	15 173,24	30,15
	II - 4	3,19E-09	1,16	30 020,94	36,53
	II - 5	1,29E-09	0,23	15 053,38	7,33
	II - 6	1,30E-09	0,17	3 764,70	5,50
				TOTAL	633,41
CO ₂	II - 1	5,31E-09	2,91	19 537,19	91,91
	II - 2	2,12E-08	11,21	155 653,41	353,51
	II - 3	4,22E-08	12,61	200 046,38	397,54
	II - 4	2,80E-08	10,17	263 640,72	320,76
	II - 5	1,39E-08	2,50	162 207,80	78,94
	II - 6	7,00E-09	0,94	20 283,30	29,61
				TOTAL	1 272,27

Resultados totales de las Lagunas de la PTAR "Puchukollo"

A partir de los resultados obtenidos para la Serie II y considerando semejanzas en el diseño y funcionamiento asumimos que las seis lagunas de la serie III tienen un comportamiento semejante. A partir de estas premisas, en la tabla siguiente se muestran resultados del cálculo de masas emitidas de GEI en las lagunas de la Serie III de

“Puchukollo”. En los cálculos sólo se considera un factor de corrección igual a la relación de áreas de lagunas semejantes de la serie III y la serie II multiplicado por el flujo másico de la serie II.

Tabla 5. Estimación de Masa Emitida de GEI en PTAR "Puchukollo"

GEI	LAGUNA	AREA, m ²	TM/AÑO
CH ₄	III-1	71 282,50	594,46
	III-2	59 788,75	108,75
	III-3	34 987,50	35,29
	III-4	25 772,50	25,93
	III-5	24 043,25	9,81
	III-6	20 794,25	8,52
TOTAL			782,76
TOTAL CH₄ - LAGUNAS "PUCHUKOLLO"			1 416,17
CO ₂	III-1	71 282,50	119,40
	III-2	59 788,75	399,21
	III-3	34 987,50	465,21
	III-4	25 772,50	227,71
	III-5	24 043,25	105,74
	III-6	20 794,25	45,92
TOTAL			1 363,18
TOTAL CO₂ - LAGUNAS "PUCHUKOLLO"			2,635,45

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 5, la PTAR de “Puchukollo” emite **35 207,36 TM/año** de CO₂ equivalente (=1 416,17*23+2 635,45), de los que 1 052,07 TM/año de CH₄ son emitidas en las lagunas 1 de ambas series II y III, que multiplicado por el potencial de calentamiento global (GWP = 23) corresponde a 24 197,61 TM/año de CO₂, o sea el 68,7 % del total de CO₂ emitido que se constituyen en un aporte principal al cambio climático por el efecto invernadero que produce. Por captación de GEI en las lagunas 1 de ambas series y combustión para convertirlas en CO₂, H₂O y calor, la venta de bonos de carbono sería un proyecto prometedor, enmarcado en el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) aplicado a “Puchukollo”.

CONCLUSIONES

- El método de cámaras estáticas para la medición de flujos de GEI, resultó ser el mejor.
- Se obtuvieron los siguientes resultado de emisiones de GEI en la laguna II-1 de “Puchukollo”:
 - Emisiones de CH₄
 - TEM CH₄ = 14,51 g/s
 - FE CH₄ = 97 272,34 g/[mg/L de DBO]
 - 457,61 TM/año de CH₄
 - Emisiones de CO₂
 - TEM CO₂ = 2,91 g/s
 - FE CO₂ = 19 537,19 g/[mg/L de DBO]
 - 91,91 TM/año de CO₂
- El flujo másico de CH₄ en la PTAR “Puchukollo” es de 1 416,17 TM/año y el flujo másico de CO₂ es de 2 635,45 TM/año.

REFERENCIAS

1. Moscoso, J., León, G., Gil, E.; 1991 Reuso en Acuicultura de las Aguas Residuales Tratadas en Lagunas de San Juan, Sección II: Tratamiento de las Aguas Residuales y Aspectos Sanitarios. CEPIS, Lima
2. Crites, Tchobanoglous. Tratamiento de Aguas Residuales. Ed. Mc Graw Hill. Año 2,000
3. Metcalf & Eddy. Ingeniería de Aguas Residuales. Ed. Mc Graw Hill 3ra. Edición. Año 1,995
4. El-Fadel, M. Massound, 2001. Methane emissions from wastewater management. Environmental Pollution
5. Hill and Barth. A fundamental approach to anaerobic lagoon analysis. Processing and management of agricultural waste - 1974
6. IPCC - 2001
7. Liu, Yang, Wu, Peng, Shang, Zhou. 2006. N₂O emissions from different biological nitrogen removal processes and factors affecting N₂O production. Acta Scientiae Circumstantiae
8. Park, Inamori, Mizuochi, Ahn. 2000. Emission and control of nitrous oxide from a biological wastewater treatment system with intermittent aeration. Journal of Bioscience and Bioengineering

9. Itokawa, Hanaki, Matsuo. 2001. Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low DQO/NT ratio condition. *Water Research*
10. Aneja, Bunton, Walker, Malik, 2000. Measurement and analysis of atmospheric ammonia emissions from anaerobic lagoons. *Atmospheric Environment* 35 (2001) 1949-1958
11. Song, Wang, Zhao. 2005. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China. *Atmospheric Environment* 40 (2006) 6879-6885