

# ESTUDIO DE FLUJOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN CUERPOS DE AGUA DEL ESTADO DE MORELOS

PROYECTO INTERNO HC1817.1  
INFORME FINAL  
COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA  
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA AMBIENTAL

## **AUTORES**

M. Sc. Raúl Medina Mendoza (Jefe de Proyecto)  
Dra. Gabriela Mantilla Morales  
M.I. Ricardo Alvarez Bretón  
Dra. Anne M. Hansen Hansen  
M.I Xóchitl Peñaloza Rueda  
M.C. Rubén I. Huerto Delgadillo  
Dr. Edson Baltazar Estrada Arriaga  
Dr. Javier de Jesús Canto Ríos  
M.I Abel Ruíz Castro  
Ing. Vanessa G. Moreno Ayala

# 1 Tabla de contenido

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Resumen ejecutivo.....  | 1  |
| 2     | Objetivos.....  | 2  |
| 2.1   | Objetivo general.....   | 2  |
| 2.2   | Objetivos Específicos .....   | 2  |
| 3     | Antecedentes.....   | 3  |
| 3.1   | Estado del arte.....  | 3  |
| 4     | Metodología.....  | 13 |
| 4.1   | Desarrollo de prototipo de cámara flotante.....                     | 13 |
| 4.2   | Caracterización del medio físico.....                               | 14 |
| 4.3   | Información de la base de datos G-res.....                          | 19 |
| 4.4   | Aplicación a los cuerpos de agua del estado de Morelos.....         | 22 |
| 4.4.1 | Características de la cuenca.....                                   | 22 |
| 4.4.2 | Ubicación de muestreos.....   | 26 |
| 4.4.3 | Muestreo de los cuerpos de agua.....                                | 29 |
| 4.4.4 | Estudio Batimétrico del sistema lagunar del Rodeo y Coatetelco..... | 31 |
| 4.4.5 | Procesamiento y análisis.....                                       | 34 |
| 4.4.6 | Medición de temperatura y salinidad (CTD).....                      | 37 |
| 4.4.7 | Evaluación de la producción de metano en agua y sedimento .....     | 41 |
| 5     | Resultados.....   | 49 |
| 5.1   | Uso de suelo resultados generales .....                             | 50 |
| 5.2   | Uso de los cuerpos de agua de Morelos.....                          | 56 |
| 5.3   | Climas predominantes de los embalses .....                          | 59 |
| 5.4   | Muestreo de los embalses de Morelos .....                           | 59 |
| 5.5   | Batimetría de la zona de estudio .....                              | 60 |
| 5.6   | Emisión debido al tipo de uso del embalse .....                     | 60 |
| 5.6.1 | Uso contra inundaciones.....  | 67 |
| 5.6.2 | Uso de pesca .....  | 68 |
| 5.6.3 | Uso para Riego .....  | 68 |
| 5.6.4 | Uso de Navegación.....  | 71 |
| 5.6.5 | Uso de Recreación .....   | 71 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.6.6 | Uso de abastecimiento de agua.....              | 72  |
| 5.6.7 | Uso de generación eléctrica.....                | 72  |
| 5.7   | Emisión del embalse .....                       | 74  |
| 5.7.1 | Emisión CO <sub>2</sub> .....                   | 74  |
| 5.7.2 | Emisión de CH <sub>4</sub> .....                | 76  |
| 5.8   | Forma de liberación .....                       | 80  |
| 5.8.1 | Porcentaje difuso .....                         | 80  |
| 5.8.2 | Porcentaje de burbujeo .....                    | 80  |
| 5.8.3 | Porcentaje por desgasificación .....            | 81  |
| 5.9   | Información total de la huella de carbono ..... | 82  |
| 5.9.1 | Emisiones aéreas.....                           | 82  |
| 5.9.2 | Emisiones del embalse .....                     | 85  |
| 5.9.3 | Emisiones acumuladas por tiempo de vida .....   | 88  |
| 5.10  | Modelo GRAT.....                                | 92  |
| 5.11  | Comparación de modelos Gres y GRAT.....         | 95  |
| 6     | Comparación a nivel estatal.....                | 97  |
| 7     | Conclusiones.....                               | 98  |
| 8     | ANEXO .....                                     | 100 |
| 8.1   | Calidad del agua.....                           | 102 |

# 1 Resumen ejecutivo

Con el propósito de evaluar la contribución de los principales cuerpos de agua del Estado de Morelos en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) principalmente bióxido de carbono y metano a la atmósfera, y con ello incidir en el cambio climático global, se realizó la medición en campo de dichas emisiones en las lagunas de El Rodeo, Coatetelco y el lago de Tequesquitengo. Para ello, siguiendo la metodología internacional en la materia, se desarrolló un prototipo de cámara flotante para “atrapar” en la superficie de dichos cuerpos de agua, los gases emitidos a la atmósfera producto del proceso de flujo difusivo desde los sedimentos del fondo pasando por la columna de agua hacia la atmósfera. La medición de los GEI atrapados en la cámara flotante se realizó con el sensor Testo, el cual registra instantáneamente las concentraciones de los GEI en la atmósfera. Asimismo se realizó muestreo con jeringa y se vació su contenido a viales de 10 ml para su posterior lectura en cromatógrafo, siguiendo el protocolo internacional en la materia.

Los resultados alcanzados en las mediciones en los tres cuerpos de agua, mostraron tasas menores de 4 mg de metano por m<sup>2</sup> día, lo que en la escala internacional establecida por UNESCO, se consideran bajos. De igual forma para el bióxido de carbono los resultados variaron de bajos en el caso de Tequesquitengo hasta medio en El Rodeo y Coatetelco con valores entre 100 y 120 mg CO<sub>2</sub> m<sup>2</sup> día. Estos resultados deben interpretarse como de bajo impacto de estos cuerpos de agua hacia la contribución de emisiones a la atmósfera de GEI.

Asimismo se utilizó el modelo G-Res Tool de la UNESCO para aplicarlo en los 52 principales cuerpos de agua del país, entre los que se encuentran embalses e hidroeléctricas. Se realizó la modelación utilizando la base de datos mundial precargado en el modelo, alimentándolo con información específica local como el uso del suelo y una afinación a los límites de las cuencas. Los resultados alcanzados con la modelación mostraron que para condiciones de postinundación, las presas que se encuentran en el clima tropical son las que principalmente generan GEI, con emisiones que van de 20 para la presa Gral. Ramón Corona hasta 190975 tCO<sub>2</sub>e/año para la presa Belisario Domínguez.

Finalmente se realizó la comparación de corridas para emisión de gases GEI entre los modelos G-Res-Tool y el GRAT, encontrando diferencias no significativas en la mayor parte de las presas, concluyendo que ambos modelos predicen de forma similar las tasas de emisión de gases GEI a la atmósfera.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Estimar las emisiones de gases de efecto invernadero de principales cuerpos de agua del país por medio de software de predicción, así como evaluar dichas emisiones en los cuerpos de agua del estado de Morelos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Desarrollar un prototipo de cámara flotante para la captura de gases GEI provenientes de sedimentos en los cuerpos de agua.

Clasificación del porcentaje de tipo de suelo presente en las cuencas de estudio.

Cuantificación de emisión de gases GEI en principales cuerpos de agua del estado de Morelos (3), mediante mediciones in situ.

### **3 Antecedentes**

Los cuerpos de agua interiores juegan un papel muy importante en el suministro del vital líquido tanto para consumo humano, industrial, agrícola, pecuario, etc. Los lagos y embalses presentan una continua presión por su deterioro en la calidad del agua y por su reciente importancia como fuentes generadoras de gases de efecto invernadero-GEI. En los últimos años, se ha debatido con cierta profusión e intensidad, la posible contribución de los embalses al cambio climático a través de la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de procesos de respiración aeróbica o anaeróbica en el interior de la masa de agua y los sedimentos (Tremblay et al., 2005). Actualmente, al debate se le ha añadido también un creciente interés en conocer los efectos del cambio climático sobre los embalses (Marc'e et al.,2009).

Los ambientes naturales como lagos, ríos, bosques y turberas emiten gases de efecto invernadero (GEI). En general, en estos ambientes se produce un rápido aumento de las emisiones netas de gases principalmente debido a la degradación por bacterias de la materia orgánica. Estos gases son emitidos tanto por ecosistemas naturales acuáticos como terrestres, así como por fuentes antropogénicas. Según la UNESCO / IHA (2008), estudios previos indicaron que las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> pueden ser relevantes para los inventarios mundiales de intercambios de GEI. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son potencialmente similares a nivel de la cuenca (antes y después del embalse), pero pueden ser influenciadas en el tiempo y el espacio por la creación de un depósito o presa. Es probable que el CO<sub>2</sub> esté en el ciclo natural del carbono, representando a menudo más del 80% de las emisiones de GEI. Por otro lado, el CH<sub>4</sub> es el componente más importante que evaluar, debido a su alto potencial de calentamiento global (21 a 25 veces más fuerte que el CO<sub>2</sub> por unidad molar). Las emisiones de CH<sub>4</sub> podrían ser debidas a las condiciones prevalecientes después de la construcción de los embalses que no estaban presentes en condiciones naturales.

El IMTA ha llevado a cabo estudios ambientales en diversos lagos y embalses y por lo tanto cuenta con la capacidad técnica para la solución de problemas ambientales específicos.

Con la finalidad de conocer la contribución de los embalses en la generación de GEI se propone evaluar la emisión de estos gases estimando el flujo del carbono en el embalse Valle de Bravo.

#### **3.1 Estado del arte**

Se ha estimado que los embalses absorben el 2.5% de las emisiones antropogénicas de carbono en todo el mundo. Las emisiones globales de carbono de los embalses, sin embargo, se han estimado en un 60%. La capacidad de secuestro de los embalses Tiene una vida útil limitada. El atrapamiento de las aportaciones ribereñas de sedimentos y nutrientes por las represas puede afectar El presupuesto de sílice a largo plazo de los océanos,

disminuyendo la eficacia de la bomba biológica que Secuestra CO<sub>2</sub> en aguas profundas. Se necesitan más estudios para cuantificar el impacto Y cómo las presas afectan el suministro de nutrientes al océano y el ciclo biogeoquímico En las zonas costeras (Parekh, 2004).

Uno de los mayores problemas que contribuyen a la controversia sobre la emisión de GEI en las hidroeléctricas es la falta de un método establecido para la estimación de emisiones futuras (Felipe, et al., 2015). De acuerdo a la revisión bibliográfica de este autor, existen estimaciones de emisiones de carbón de embalses hidroeléctricos y su efecto en la estimación regional y global de carbono (C), pero no presentan un método de estimación futura. Y de acuerdo a la literatura, pese al avance en la predicción de emisión de (C) la estimación futura es un reto debido a la dificultad de representar la variabilidad espaciotemporal de los flujos.

De acuerdo con Gagnon y Van de Vate (1997), al comparar la emisión de los GEI de varias opciones energéticas, un análisis riguroso requiere la consideración de todas las emisiones de GEI existentes, no solamente CO<sub>2</sub> y emisiones de combustible. Se deben incluir todos los usos energéticos de las actividades que se realicen. En las hidroeléctricas esto es esencial debido a que gran parte de las emisiones son indirectas y no están relacionadas con un proceso de combustión.

Gunkel, G. (2009), menciona que, nuevas investigaciones señalan que los embalses tropicales y tropicales tienen altas tasas de emisión de los gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Las emisiones de metano contribuyen fuertemente al cambio climático porque el CH<sub>4</sub> tiene un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub>. Los caminos para su producción incluyen ebullición, emisión difusa a través de la interfase agua-aire y desgasificación en turbinas y aguas abajo del reservorio en el vertedero y el estiramiento inicial del río. Las emisiones de gases de efecto invernadero son promovidas por un estado eutrófico del yacimiento y, con mayores niveles tróficos, se producen condiciones anaeróbicas con la emisión de CH<sub>4</sub>. Esto significa que se produce un salto cualitativo y cuantitativo en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para Palau y Prieto (2009), el procesado del carbono en un embalse depende del estado de conservación, los usos y las actividades de su cuenca tributaria, así como la localización del embalse dentro de la cuenca, lo cual determinará la cantidad y las formas de las entradas de carbono y nutrientes. Concluyen que no se puede generalizar sobre una contribución neta de los embalses al cambio climático, no que emiten mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que los lagos equivalentes. Pero es cierto que la energía hidroeléctrica está entre las de menor emisión de GEI, al compararla con otras fuentes.

Los embalses han sido considerados como sistemas emisores netos de carbono. Si bien es cierto que son sistemas forzados a descomponer toda la materia orgánica que queda cubierta por el agua tras la puesta en carga, esta fase inicial de maduración, remite con los años hasta niveles de emisión de carbono similares a las de lagos de estado trófico equivalente. No todos los embalses tienen un comportamiento similar en el procesado de la materia orgánica carbonatada (Palau, et al., 2010).

Diferentes características de los embalses hidroeléctricos causan una mayor producción y emisión de GEI que los sistemas naturales, principalmente durante los primeros 20 años posteriores a la inundación de la cuenca (Cole, et al., 2011).

De acuerdo con Fearnside P. (2008), el dióxido de carbono proveniente de la descomposición de árboles en el bosque inundado representa otra significativa fuente de GEI durante los primeros años de la inundación.

Finalmente, Vincent et al (2000), menciona que para determinar de manera certera la importancia de los flujos de GEI en los embalses, se requiere aumentar las mediciones en los embalses de todas las regiones a nivel global, prestando énfasis a los embalses tropicales. Así mismo se requiere generar una base de datos de aquellas áreas donde existen o se planea la construcción de un embalse, así como las zonas acuáticas y terrestres en cada embalse, de manera que el flujo neto de GEI pueda ser calculado.

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se forma por la descomposición del carbono orgánico presente en el embalse, por su parte el metano ( $\text{CH}_4$ ), está formado por bacterias que descomponen la materia orgánica de aguas con bajo contenido de oxígeno y de los sedimentos presentes en la parte más profunda del embalse. Finalmente, el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), se forma por la ruptura bacteriana del nitrógeno.

Kelly C. et al (1997), realizaron la inundación experimental de un bosque de humedales, causando que la condición cambiara de ser un pequeño sumidero con respecto a la atmósfera  $-6.6 \text{ g de Cm}^{-2}\text{año}^{-1}$  a una gran fuente para carbono  $+130 \text{ g de Cm}^{-2}\text{año}^{-1}$ . Lo anterior fue causado por la muerte de la vegetación, la cual eliminó el sumidero de  $\text{CO}_2$  por medio de la fotosíntesis y estimuló la producción microbiana de  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  por la descomposición de tejido y turba.

El análisis completo de emisión de GEI en hidroeléctricas debe considerar como fuentes: Actividades relacionadas con la construcción de presas, diques y estaciones de poder, el análisis de estas actividades debe incluir la emisión generada por algunas actividades de uso de energía intensa, como el movimiento de tierras y la construcción de grandes estructuras de concreto.

El decaimiento de la biomasa del terreno inundado: La descomposición de la biomasa produce una cantidad significativa de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

Respaldo energético termal: cuando se compara las opciones de energía, es importante considerar el nivel de servicio de cada una.

La producción de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en los embalses que se libera a la atmósfera, ocurre principalmente de las siguientes formas, (Felipe, et al., 2015): Difusión en el área del reservorio, se refiere a la interacción entre agua y aire en la interface de la superficie, la cual depende de la diferencia de concentración en esta capa. Ebullición en el embalse, resulta de la liberación rápida de GEI de los sedimentos sobresaturados de CH<sub>4</sub> en el fondo del embalse. Desgasificación a la salida, resulta de los cambios de temperatura y presión que ocurren por la descarga justo en los niveles bajos de la salida. Difusión y ebullición aguas debajo de la cortina, que ocurre en el río aguas debajo del embalse, donde se asocia una alta concentración de GEI.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, muestra las fuentes de emisión de carbono en embalses templados y tropicales, en dos tiempos diferentes, durante los primeros años de llenado y luego de 10 años de llenado (Palau, 2016). En cada lámina se puede observar que las fuentes principales están relacionadas con el arrastre por escurrimiento (entrada de otras cuencas), la fotooxidación de materia orgánica en la superficie del agua e intercambio difusivo en la capa de interfaz (agua-aire), la movilización de materia orgánica por erosión, la descomposición de la materia orgánica por actividad bacteriana, la presencia de sedimentos anóxicos y finalmente la desgasificación en la descarga del embalse.

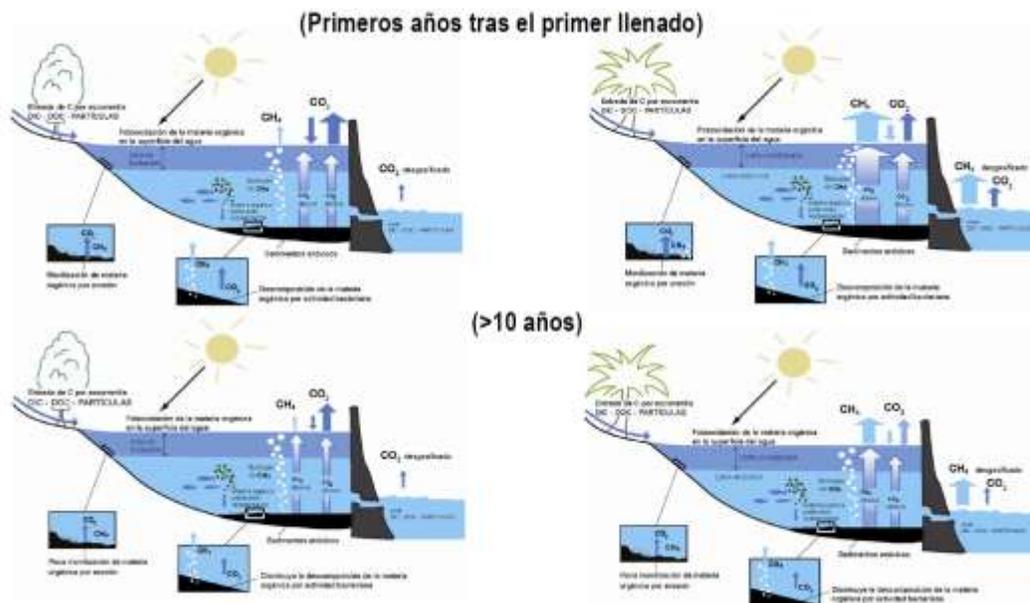


Figura 1. Fuentes de emisión de carbono en embalses templados y tropicales

Como se observa la generación de gas CH<sub>4</sub> es mayor en las zonas tropicales, mientras que el CO<sub>2</sub> tiene mayor presencia en zonas boreales. Ambos gases tienen mayor presencia durante los primeros años de inundación, sin embargo, la concentración de gases disminuye con el tiempo.

Palau A. et al (2010), utiliza un balance de carbono para el embalse de Susqueda, en sus resultados indica que la cantidad de carbono neta que retiene el embalse es algo superior a la que podría retener la vegetación mediterránea del ecosistema terrestre original que fue inundado con la construcción del embalse. La mayor parte del carbono que interviene en el balance procede de su cuenca tributaria. Al analizar la contribución de los embalses al cambio climático no puede obviarse que todo el carbono que interviene en el balance es actual;" es decir, carbono recientemente fijado y por tanto no supone un incremento cuantitativo neto de los gases invernadero en la atmósfera.

De acuerdo a los estudios presentados, las variables de impacto en el fenómeno de generación de GEI, se puede agrupar en tres rubros: Atmósfera, Superficie y Sub-superficial. Al primer rubro pertenecen todas las variables referidas a las condiciones atmosféricas presentes en la zona de inundación, como pueden ser la temperatura (°C), la radiación solar (W/m<sup>2</sup>/día), la precipitación (mm) y la velocidad del viento (m/s), por mencionar solo algunos. Para la superficie, se pueden considerar, pero no limitar a: los caudales de aportación, la obra y su descarga, el área inundada, los porcentajes de uso de suelo (antes

y después de la captación), los niveles de tratamiento de las aguas vertidas, los usos del embalse, la interacción agua-aire y la presencia de vegetación en el espejo de agua. Finalmente, en el nivel subsuperficial, se requiere conocer todos los parámetros posibles de la columna de agua, sedimentos, la profundidad termo clínica, la batimetría del embalse y las líneas de corriente. Es importante que la información referente a todas las variables se tenga en diferentes épocas del año, de manera que se pueda analizar la variabilidad espacio temporal de la emisión de GEI.

Bridget et al (2016), realizaron una síntesis sobre la emisión de GEI, en la cual menciona que identificaron diversas áreas relacionadas con los GEI, que están lejos de su alcance pero que requieren tener atención de los investigadores para su revisión y análisis.

De acuerdo a las variables mencionadas anteriormente, distintos autores presentan modelos de balance o estimación, así como de proyección de GEI en los embalses. Algunos de estos modelos se presentan a continuación.

La ilustración 2 muestra el balance de carbono para un embalse, el cual se compone de los siguientes elementos:

$$CT_{EN} + CT_{ED} = CT_{SAL} + CT_{SED} + \Delta CT_{ALM} + \Delta CO_2$$

Donde  $CT_{EN}$  carbono total del agua superficial entrada al embalse (m),  $CT_{ED}$  carbono total de las entradas difusas de la cuenca directa al embalse (e),  $CT_{SAL}$  carbono total del agua de salida del embalse (m),  $CT_{SED}$  carbono acumulado en el sedimento del embalse (m),  $\Delta CT_{ALM}$  carbono total almacenado en el agua del embalse (m) y  $\Delta CO_2$  intercambio neto de  $CO_2$  entre

el agua y el aire (m).

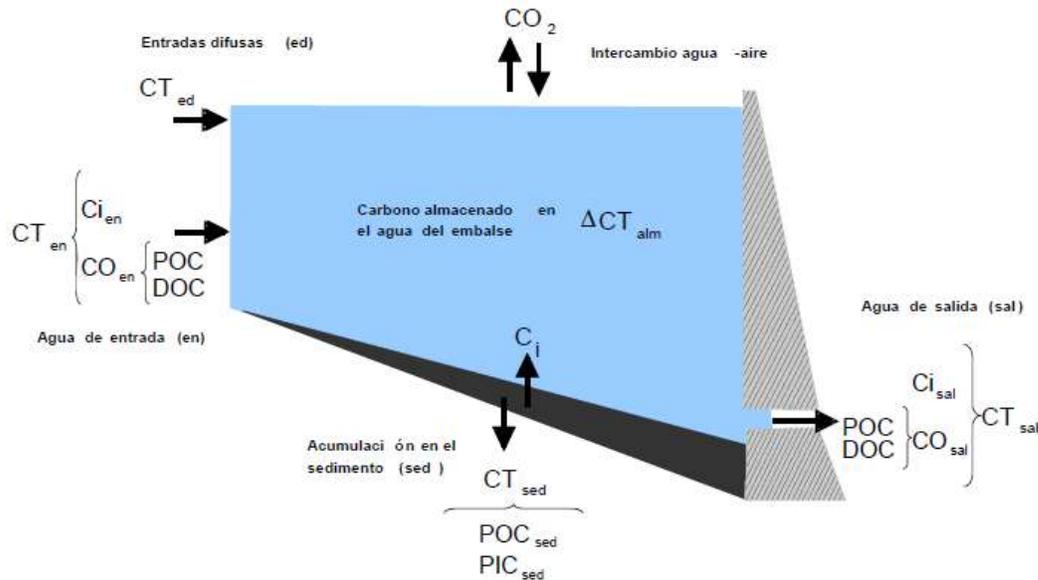


Figura 2. Flujos considerados para propuesta inicial del balance

De las guías para el inventario nacional de Gases de efecto invernadero, se obtuvieron las ecuaciones para aproximar la estimación de emisiones de  $CO_2$  y  $CH_4$  en suelos [a permanentemente inundados.

$$CO_2 = PE(CO_2)A_{inundada}f_A 10^{-6}$$

Donde,  $CO_2$  corresponde a la emisión de gases por el cambio de suelo a zona inundada,  $P$  es el número de días sin cobertura de hielo durante un año,  $E(CO_2)$  corresponde al promedio diario de emisiones por difusión,  $A_{inundada}$  corresponde al área superficial de la subcuenca, incluyendo el área inundada, lagos y ríos y finalmente  $f_A$  la fracción de la cuenca que fue inundada en los últimos 10 años.

La expresión anterior puede extenderse para distinguir entre periodos donde la cuenca esté libre de cubiertas de hielo y con presencia de hielo.

$$CO_2 = [P_i E(CO_2) + P_f E(CO_2)]A_{inundada}f_A 10^{-6}$$

Donde,  $CO_2$  corresponde a la emisión de gases por el cambio de suelo a zona inundada,  $P_i$  es el número de días sin cobertura de hielo durante un año y  $P_f$  es el número de días con

cobertura de hielo durante un año,  $E(CO_2)$  corresponde al promedio diario de emisiones por difusión,  $A_{inundada}$  corresponde al área superficial de la subcuenca, incluyendo el área inundada, lagos y ríos y finalmente  $f_A$  la fracción de la cuenca que fue inundada en los últimos 10 años.

Para el cálculo de las emisiones de  $CH_4$  para períodos en presencia de hielo, se utiliza la expresión:

$$CH_4 = PE(CH_4)A_{inundada}f_A 10^{-6}$$

Donde,  $CH_4$  corresponde a la emisión de gases por el cambio de suelo a zona inundada,  $P$  es el número de días sin cobertura de hielo durante un año,  $E(CH_4)$  corresponde al promedio diario de emisiones por difusión,  $A_{inundada}$  corresponde al área superficial de la subcuenca, incluyendo el área inundada, lagos y ríos y finalmente  $f_A$  la fracción de la cuenca que fue inundada en los últimos 10 años.

$$CH_4 = PE(CH_4)A_{inundada} 10^{-6}$$

$$CH_4 = [P_f\{E_f(CH_4)_d + E_f(CH_4)_b\} + P_i\{E_i(CH_4)_d + E_i(CH_4)_b\}]A_{inundada}$$

La UNESCO junto con la IHA, generaron una herramienta que permite analizar el riesgo presente en cuencas por la emisión de GEI, como parte de la mitigación del cambio climático. Para el modelo se requieren de ciertos parámetros característicos de los embalses: los años que lleva inundado embalse hasta su capacidad máxima, la temperatura media anual del embalse ( $^{\circ}C$ ), el escurrimiento medio anual (mm) y la precipitación media anual (mm) de la cuenca de interés.

$$C - CO_2 = 186.0 + 0.148Q_R + (944.485 + 1.91T + 0.09727T^2)e^{-0.0044|52.339-0.7033T-0.0358T^2|A}$$

De manera similar a la emisión de  $CO_2$ , obtuvieron dos modelos simplificados para el  $CH_4$ , resultando un modelo en función de la temperatura media anual, la precipitación media anual y la edad del embalse, el primero para embalses de 32 años o menos y el segundo para embalses con más de 32 años.

$$C - CH_4 = 10^{(1.46+0.056T-0.00053P-0.0186A+0.000288A^2)}$$

$$C - CH_4 = 10^{(1.16+0.056T-0.00053P)}$$

La IHA junto con la UNESCO desarrolló una herramienta para el cálculo, determinación y proyección neta de las emisiones de GEI en embalses derivados de la inundación de llanuras para la creación del embalse. Las emisiones consideradas posterior a la inundación son de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, este último proveniente de la difusión agua-aire, burbujas y desgasificación. Las emisiones son expresadas por área por año. Las emisiones debidas al balance previo a la contención y las generadas por las actividades antropogénicas, son sustraídas del total, de manera que se obtiene la emisión neta del embalse. Lo adicional de este modelo es la consideración de emisión de GEI al integrar las características previas a la retención, así mismo tiene fuerte influencia de la edad del embalse en el cálculo de las emisiones.

Para el cálculo de las emisiones difusivas integradas en el tiempo de vida de CO<sub>2</sub>, se utiliza la expresión ().

$$CO_2 = \frac{100AB - CD}{100}$$

$$A = \frac{10^{(2.0353+0.03346*\log_{10}(ET_{CO_2})+0.0757*\log_{10}(A_r)+0.00178*RSSCC+0.1063*\log_{10}(TP))}}{1000}$$

$$B = \frac{100^{0.7068} - 0.5^{0.7068}}{70.3266} (1.338) \left(1 - \frac{\%R_{ABI}}{100}\right)$$

$$C = \frac{10^{(2.0353+0.2932*\log_{10}(100)+0.03346*\log_{10}(ET_{CO_2})+0.0757*\log_{10}(A_r)+0.00178*RSSCC+0.1063*\log_{10}(TP))}}{1000}$$

$$D = 133.833 \left(1 - \frac{\%R_{ABI}}{100}\right)$$

La emisión difusiva integrada a 100 años de CH<sub>4</sub>, se obtiene con la expresión:

$$CH_4 = \frac{10^{(0.8804+0.6068*\log_{10}(\frac{\%Area\ Litoral}{100})+0.04828*Te_{CH_4})} (1 - 10^{(-1.16)})}{100(0.0116 * \ln Z(10))} (16.5467)$$

La emisión de CH<sub>4</sub> por burbujas se obtiene con la expresión:

$$CH_4 = 16.5467 * 10^{(-0.98574+1.0075*\log_{10}(\frac{\%Area\ Litoral}{100})+0.04828*(\frac{RCGHR}{30.4}))}$$

Finalmente, la emisión por desgasificación se obtiene con la expresión.

$$CH_4 = \frac{1000 * 10^{(-5.5029+2.2857*\log_{10}(CH_4DEI_{100})+0.9866*\log_{10}(WRT))}}{1000000000} * A_r * 900 * R_{annual}$$

## 4 Metodología

Para la adquisición de datos se compone diversos pasos, primeramente, se obtiene el uso de suelo, la segunda etapa consiste en la obtención de la información referente a las cuencas y características hidrológicas de los cuerpos de estudio y posteriormente el manejo del modelo G-res para la obtención de las huellas de GEI presente en los cuerpos de agua y finalmente la comparación de resultados de los cuerpos de agua de acuerdo con diferentes factores.



### 4.1 Desarrollo de prototipo de cámara flotante

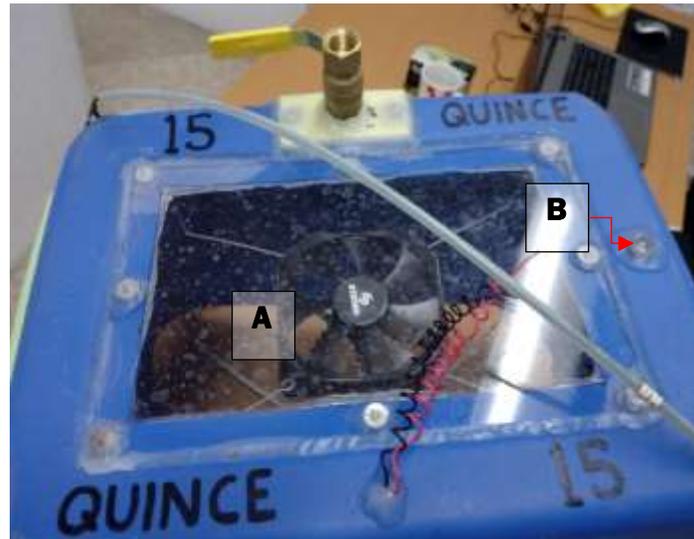
Para la medición de la emisión de gases proveniente de las burbujas generadas por la descomposición de la materia orgánica en el lecho del cuerpo de agua, se generó un muestreador de flujos difusivos flotante. La Ilustración 4-1 muestra una captura isométrica del muestreador de flujos difusivos en él se observan algunas componentes del sistema. Primeramente, se tiene una válvula de depuración para controlar el volumen de atmósfera interno (A), flotadores que le permitan mantenerse en la superficie de agua (B) y pesas (C) que le permitan tener estabilidad una vez colocadas en el cuerpo de agua.



Ilustración 4-1 Prototipo de muestreador de flujos difusivos

Por otro lado, en la Ilustración 4-2 se puede observar que en el interior del prototipo se tiene un ventilador (A), el cual se utilizó para homogenizar la atmósfera interior y obtener

una mejor muestra de gases. Finalmente se contó con una zona de extracción (B), en la cual se introdujo una jeringa para la toma de muestras de la atmósfera interior del prototipo.



**Ilustración 4-2 Prototipo de muestreador de flujos difusivos vista superior**

## 4.2 Caracterización del medio físico

La cobertura terrestre global está disponible a partir de un sofisticado algoritmo de clasificación aplicado a miles de imágenes de satélite y está disponible a través de la Agencia Espacial Europea - Iniciativa de Cambio Climático (ESA-CCI 2014-2017). Esta clasificación produce 36 categorías de cobertura terrestre, un número demasiado alto para el grado de precisión para los diferentes usos de esta información, por lo anterior, las 36 categorías originales de cobertura del suelo se fusionaron en varias subcategorías (nueve categorías más amplias). Resultando las categorías de la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1 Clasificación de uso de suelo**

| ID | Clasificación                |
|----|------------------------------|
| 1  | Tierras de cultivo           |
| 2  | Bosque                       |
| 3  | Pastizales/Matorrales        |
| 4  | Humedales                    |
| 5  | Asentamientos                |
| 6  | Zonas sin cobertura forestal |
| 7  | Cuerpos de agua              |
| 8  | Hielo o nieve permanente     |

De manera general los usos de suelo tienen gran diversidad (Tabla 4-2), sin embargo, para facilitar la clasificación general, se agruparon de acuerdo con la clasificación de la Tabla 4-1.



**Ilustración 4-3 Zonas de cultivo irrigado y seco**

En la Tabla 4-2, se presentan los suelos correspondientes a cultivos, siendo las clasificaciones principales cultivo seco y tierras regadas.

**Tabla 4-2 Equivalencias de usos de suelo para su clasificación para tierras de cultivo**

| <b>Agencia Espacial Europea (ESA) y la iniciativa por el cambio climático (CCI)</b> | <b>Categorías IHA</b> |
|---|-----------------------|
| Tierras de cultivo seco   | Tierras de cultivo    |
| Tierras de cultivo, regadas o después de una inundación.                            |                       |

La subcategoría bosque, proviene de 12 tipos de suelo relacionados con la cobertura de árboles, principalmente las categorías más detalladas incluyen el tipo y porcentaje de hoja, como se muestra en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3 Equivalencias de usos de suelo para su clasificación para bosque**

| <b>Agencia Espacial Europea (ESA) y la iniciativa por el cambio climático (CCI)</b> | <b>Categorías IHA</b> |
|---|-----------------------|
| Cubierta de árbol o arbusto   | Bosque                |
| Cubierta de árbol, de hoja ancha, perenne, cerrada para abrir (> 15%)               |                       |
| Cubierta de árbol, de hoja ancha, decidua, cerrada para abrir (> 15%)               |                       |
| Cobertura de árbol, de hoja ancha, decidua, cerrada (> 40%)                         |                       |

|  |  |
|--|--|
| Cubierta de árbol, de hoja ancha, decidua, abierta (15-40%)        |  |
| Cubierta de árbol, acolchada, perenne, cerrada para abrir (> 15%)  |  |
| Cubierta de árbol, acolchada, perenne, cerrada (> 40%)             |  |
| Cubierta de árbol, acolchada, perenne, abierta (15-40%)            |  |
| Cubierta de árbol, acolchada, decidua, cerrada para abrir (> 15%)  |  |
| Cubierta de árbol, acolchada, decidua, cerrada (> 40%)             |  |
| Cubierta de árbol, acolchada, decidua, abierta (15-40%)            |  |
| Cobertura de árbol, tipo de hoja mixta (de hoja ancha y acolchada) |  |



**Ilustración 4-4 Zonas de bosque, cobertura variada**

Para la subclasificación de pastizales y matorrales se consideraron 13 tipos de suelo que van desde ciertos tipos de árbol, hasta cubiertas herbáceas (Ilustración 4-5), como se observa en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-4 Equivalencias de usos de suelo para su clasificación para pastizales/matorrales**

| Agencia Espacial Europea (ESA) y la iniciativa por el cambio climático (CCI)                   | Categorías IHA                 |
|--|--------------------------------|
| Árbol de mosaico y arbusto (> 50%) / cubierta herbácea (<50%)                                  | <b>Pastizales / Matorrales</b> |
| Tapa herbácea de mosaico (> 50%) / árbol y arbusto (<50%)                                      |                                |
| Matorral   |                                |
| Matorral de hoja perenne   |                                |
| Matorral de hoja caduca  |                                |
| Pradera  |                                |
| Líquenes y musgos  |                                |
| Vegetación escasa (árbol, arbusto, cubierta herbácea) (<15%)                                   |                                |
| Arbusto escaso (<15%)  |                                |
| Cubierta herbácea escasa (<15%)  |                                |
| Tierras de cultivo de mosaico (> 50%) / vegetación natural (árbol, arbusto, cubierta herbácea) |                                |
| Vegetación natural mosaica (árbol, arbusto, cubierta herbácea (> 50%) / tierras de cultivo     |                                |
| Cubierta herbácea  |                                |



**Ilustración 4-5 Ejemplo para zonas matorral y pradera**

Aquellas zonas inundadas por cualquier tipo de agua se consideraron dentro de la clasificación de Humedales, como se muestra en la Tabla 4-5, ejemplos de las zonas se pueden observar en la Ilustración 4-6.

**Tabla 4-5 Equivalencias de usos de suelo para su clasificación para humedales**

| <b>Agencia Espacial Europea (ESA) y la iniciativa por el cambio climático (CCI)</b> | <b>Categorías IHA</b> |
|---|-----------------------|
| Cubierta de árbol, inundada, agua dulce / salina / agua salobre                     | Humedales             |
| Cubierta de árbol, agua salina inundada   |                       |
| Cubierta de arbustos o herbáceas, inundada, agua dulce / salina / agua salobre      |                       |



**Ilustración 4-6 Ejemplo para zonas de humedal**

Dentro de los tipos de suelo, se considera también los asentamientos urbanos, los cuerpos de agua y las zonas de llamadas de tipo permanente, donde se puede encontrar en cualquier época del año hielo o nieve, la Tabla 4-6 contiene las equivalencias de estos tipos d suelo.

**Tabla 4-6 Equivalencias de usos de suelo para su clasificación para asentamientos, cuerpos de agua y permanentes**

| <b>Agencia Espacial Europea (ESA) y la iniciativa por el cambio climático (CCI)</b> | <b>Categorías IHA</b> |
|---|-----------------------|
| Áreas Urbanas   | Asentamientos         |
| Cuerpos de agua   | Cuerpos de agua       |
| Hielo o nieve permanente  | Permanentes           |



**Ilustración 4-7 Ejemplo para zonas de asentamientos, cuerpos de agua y permanentes**

Finalmente, se consideran las zonas desnudas aquellas donde no se encuentra cobertura vegetal o donde se ha realizado el ingreso de construcciones que no afecten en gran medida la característica original del medio, la

Tabla 4-7 contiene los tipos que suelo considerados en esta subclasificación.

**Tabla 4-7 Equivalencias de usos de suelo para su clasificación para zonas desnudas**

| Agencia Espacial Europea (ESA) y la iniciativa por el cambio climático (CCI) | Categorías IHA |
|--|----------------|
| Zonas desnudas   | Zonas desnudas |
| Áreas desnudas consolidadas  |                |
| Áreas desnudas no consolidadas   |                |

### 4.3 Información de la base de datos G-res

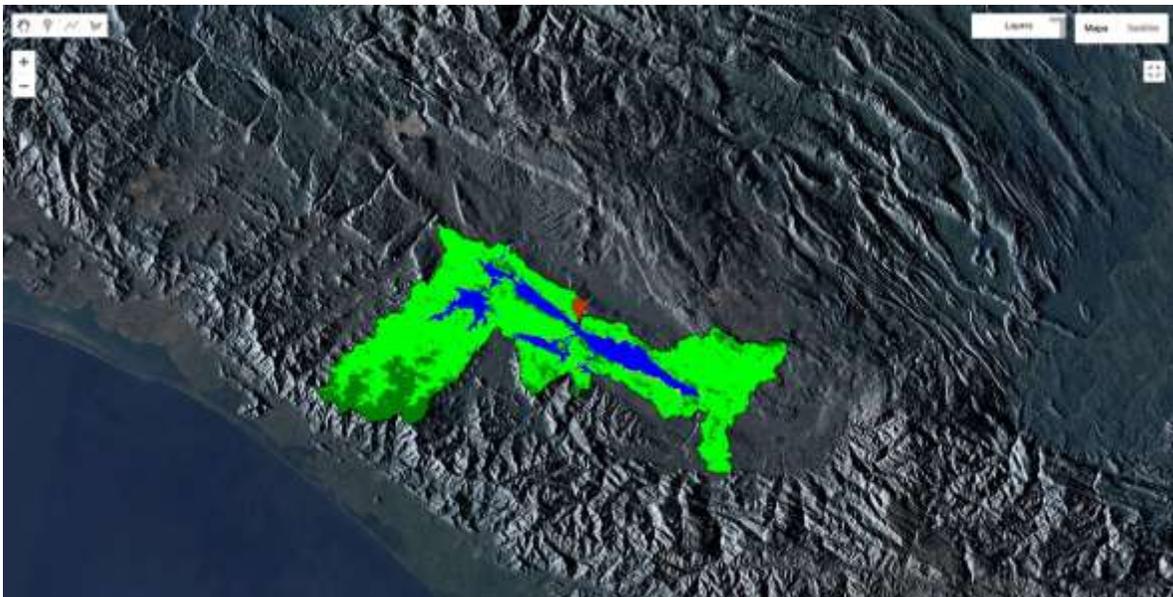
Para obtener la información de la base general de la herramienta G-res, se puede realizar de dos formas. La primera consiste en dibujar directamente dentro de Google Earth Engine (GEE) el polígono correspondiente a la cuenca de estudio e indicar la ubicación del embalse y su altura dentro del código de cálculo. La segunda forma es a través del uso de herramientas GIS y formatos shape de las cuencas de estudio.

Con la finalidad de obtener el mejor resultado posible se trabajó con los archivos shape de las cuencas correspondientes a cada uno de los cuerpos de agua. Una vez generados los polígonos de la cuenca de estudio, se adjuntan a un archivo comprimido los documentos con extensión dbf, prj shp y shx. Posteriormente se hace uso de la página [www.shpescape.com](http://www.shpescape.com) para generar de manera directa las tablas fusión en Google mismas que se alojan en el Googledrive del usuario. Partiendo del código programad de GEE se procede a llamar al archivo con la clave asignada en la tabla de fusión, con lo que se obtiene una máscara sobre el mapa de propiedades de tipo de suelo (Ilustración 4-8).



**Ilustración 4-8 Geometría de la cuenca de estudio y ubicación de la cortina.**

Una vez alojadas las máscaras de las cencas de estudio, se procede a colocarlas en dentro del GEE y con la información de la altura de la cortina dentro del código de cálculo se obtiene la información relacionada al tipo de suelo presente en la cuenca en forma porcentual, la cual puede salvarse en archivos que se alojan en el drive del usuario en cuestión. Al correr el código de cálculo se observa en el mapa el cambio de colores dentro de la máscara utilizada, como se puede observar en la Ilustración 4-9.



**Ilustración 4-9 Máscara calculada presa Belisario Domínguez**

Del código en GEE se obtiene para la cuenca la información mostrada en la Tabla 4-8 y para el embalse la información presentada en la Tabla 4-9. Ambas corresponden a las características propias de la cuenca y del embalse previo y posterior al embalsamiento de la zona.

**Tabla 4-8 Información de la base de datos GEE para la cuenca**

| <b>Información de la cuenca</b>                 | <b>Unidades</b>          |
|---|--------------------------|
| Área de la cuenca                               | km <sup>2</sup>          |
| Perímetro de la cuenca                          | km                       |
| Escurrimiento medio de la cuenca                | mm/año                   |
| Pendiente media de la cuenca                    | °                        |
| Densidad de población de la cuenca              | Personas/km <sup>2</sup> |
| Población de la cuenca                          | personas                 |
| Porcentaje y tipo de recubrimiento de la cuenca | %                        |
| Precipitación media anual                       | mm/año                   |

La información faltante para el uso de la herramienta se encuentra en la página oficial de la CONAGUA, Sistema de Seguridad de Presas, en la página: [www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sistema-de-seguridad-de-presas](http://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sistema-de-seguridad-de-presas).

**Tabla 4-9 Información de la base de datos GEE para embalse**

| <b>Información del embalse</b>                    | <b>Unidades</b>         |
|---|-------------------------|
| Latitud del embalse                               | °                       |
| Longitud del embalse                              | °                       |
| Área del embalse                                  | km <sup>2</sup>         |
| Perímetro del embalse                             | km                      |
| Profundidad máxima del embalse                    | m                       |
| Profundidad media del embalse                     | m                       |
| Clima   |                         |
| Temperatura media del embalse por mes             | °C                      |
| Radiación media anual                             | kWh/m <sup>2</sup> /día |
| Porcentaje de recubrimiento del suelo del embalse | %                       |
| Carbono presente en el suelo                      | kgC/m <sup>2</sup>      |
| Velocidad del viento a 50 metros                  | m/s                     |

## 4.4 Aplicación a los cuerpos de agua del estado de Morelos

### 4.4.1 Características de la cuenca

Los cuerpos de agua de estudio a nivel estatal son el Rodeo, Coatetelco y Tequesquitengo, en el presente apartado se presenta un esquema general de los cuerpos de agua. La superficie total de la cuenca del río Tembembe es de 424.7 km<sup>2</sup>. Por otro lado, la microcuenca de la laguna del Rodeo cuenta con un área de 6.2 km<sup>2</sup>, mientras que la microcuenca de la laguna de Coatetelco es de 33.2 km<sup>2</sup>

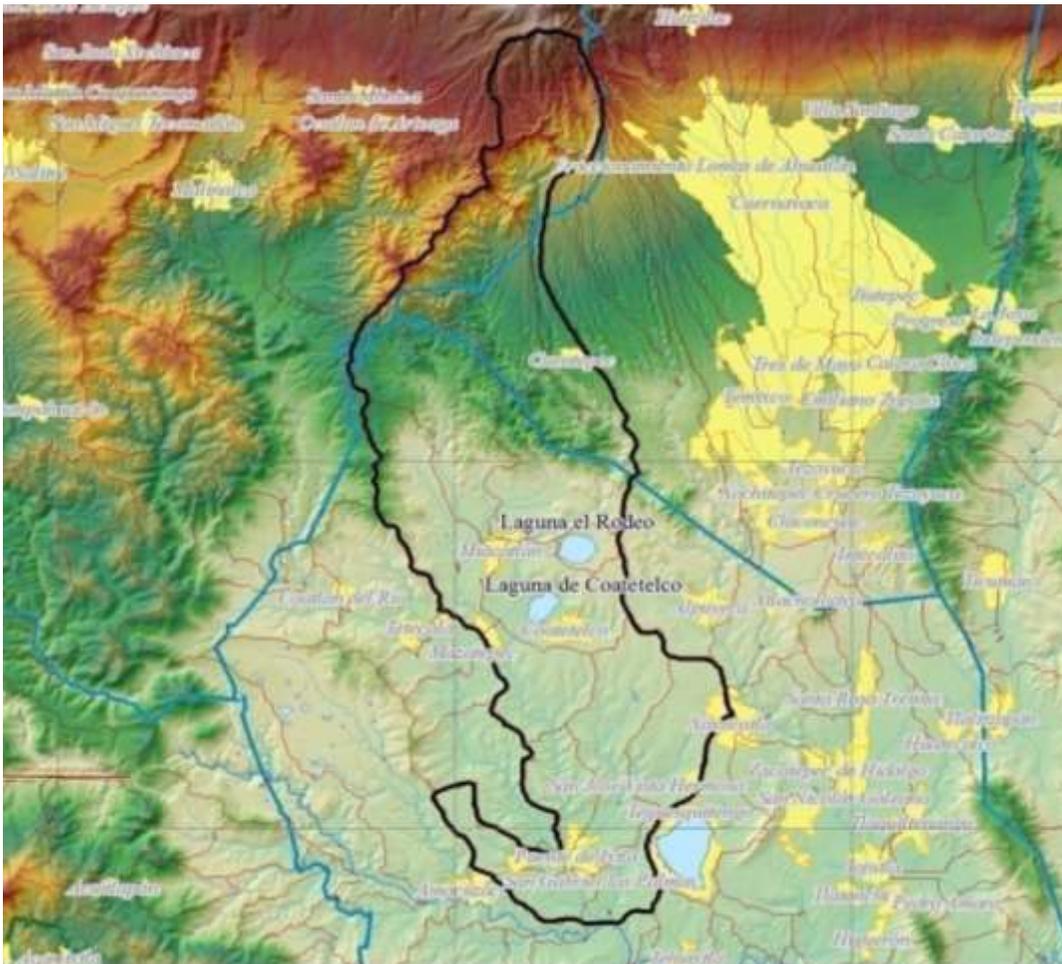
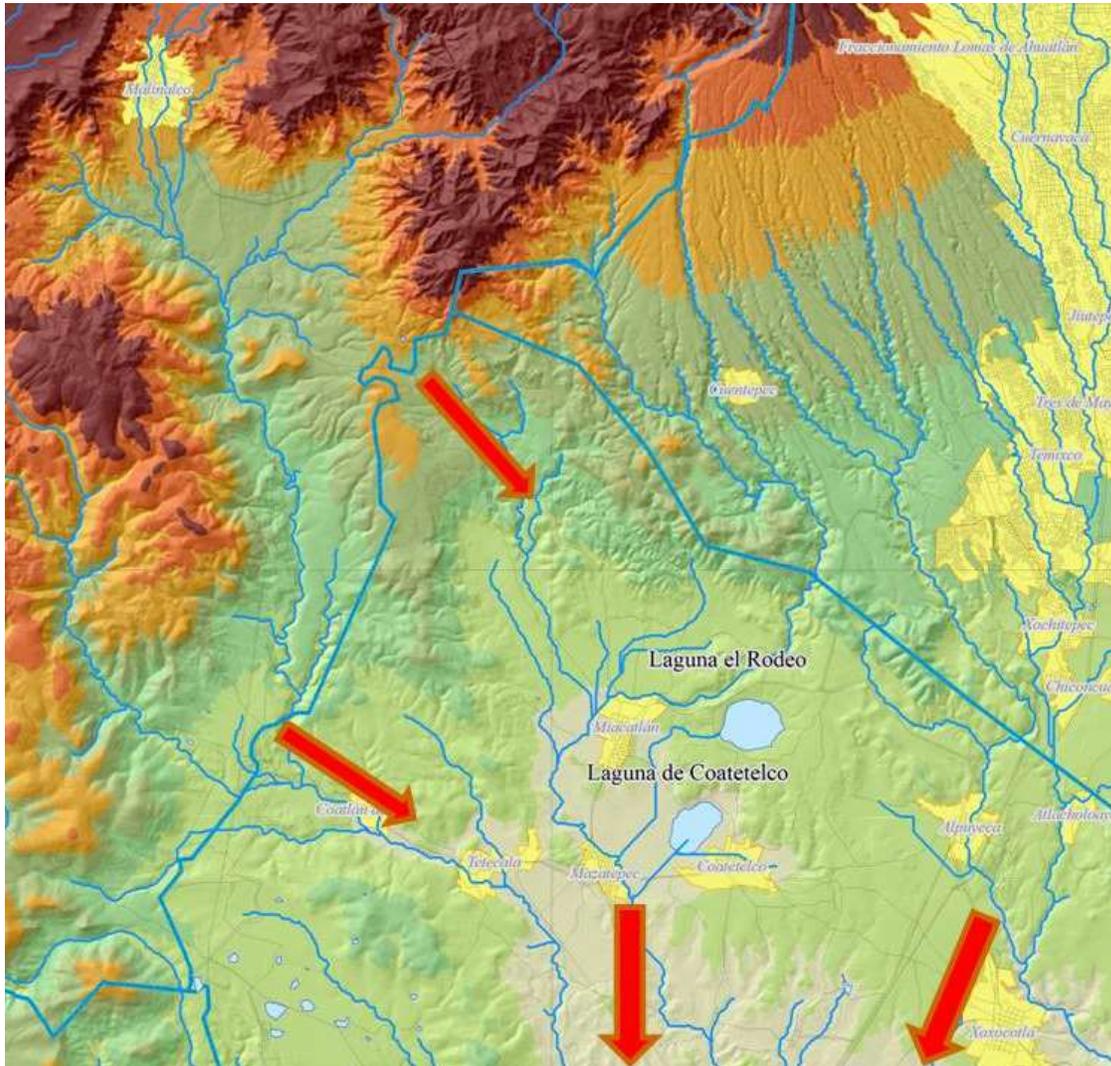


Ilustración 4-10 Cuenca y subcuencas de aportación

El agua fluye a través de la formación granular superior (Formación Cuernavaca) el cual representa un acuífero libre y termina su recorrido confluyendo con el Amacuzac en la frontera suroeste del Estado de Morelos (misma dirección que siguen las corrientes superficiales).



**Ilustración 4-11 Dirección del flujo de la cuenca**

La hidrogeología de la región se encuentra compuesta principalmente por:

**Andesita No-diferenciada (Tma).** La extensión de este tipo de rocas es de carácter local y en la zona de estudio sólo se aprecia en los alrededores de la laguna del Rodeo con un espesor de alrededor de 100 metros y representa una barrera poco permeable.

**Conglomerado Cuernavaca (Tpc).** Formada por una unidad granular con buena permeabilidad, que se extiende sobre una amplia zona y posee un espesor considerable.

**Depósito Aluvial (Qal).** Sobre el que descansa la laguna de Coatetelco, es un acuífero continuo de extensión variable, libre. Constituido por sedimentos clásticos no consolidados. Permeabilidades variables.

La cuenca propia de aportación de la laguna El Rodeo es muy pequeña, con un área total de  $6.5 \text{ km}^2$ , mientras que el área del vaso de la laguna es de aproximadamente  $2.3 \text{ km}^2$ . De la cuenca del río Tembembe se realiza una exportación de volumen de agua a la laguna El Rodeo, que se deriva de la presa Perritos y se conduce por medio de un canal trapezoidal revestido, como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El área e la cuenca de la presa Perritos, es de  $121.04 \text{ km}^2$ . La capacidad total del vaso a la elevación es de  $28,000,000 \text{ m}^3$ , aunque no es posible alcanzar este nivel de almacenamiento debido a la presencia de sumideros, los cuales limitan el almacenamiento a  $18,000,000 \text{ m}^3$ .

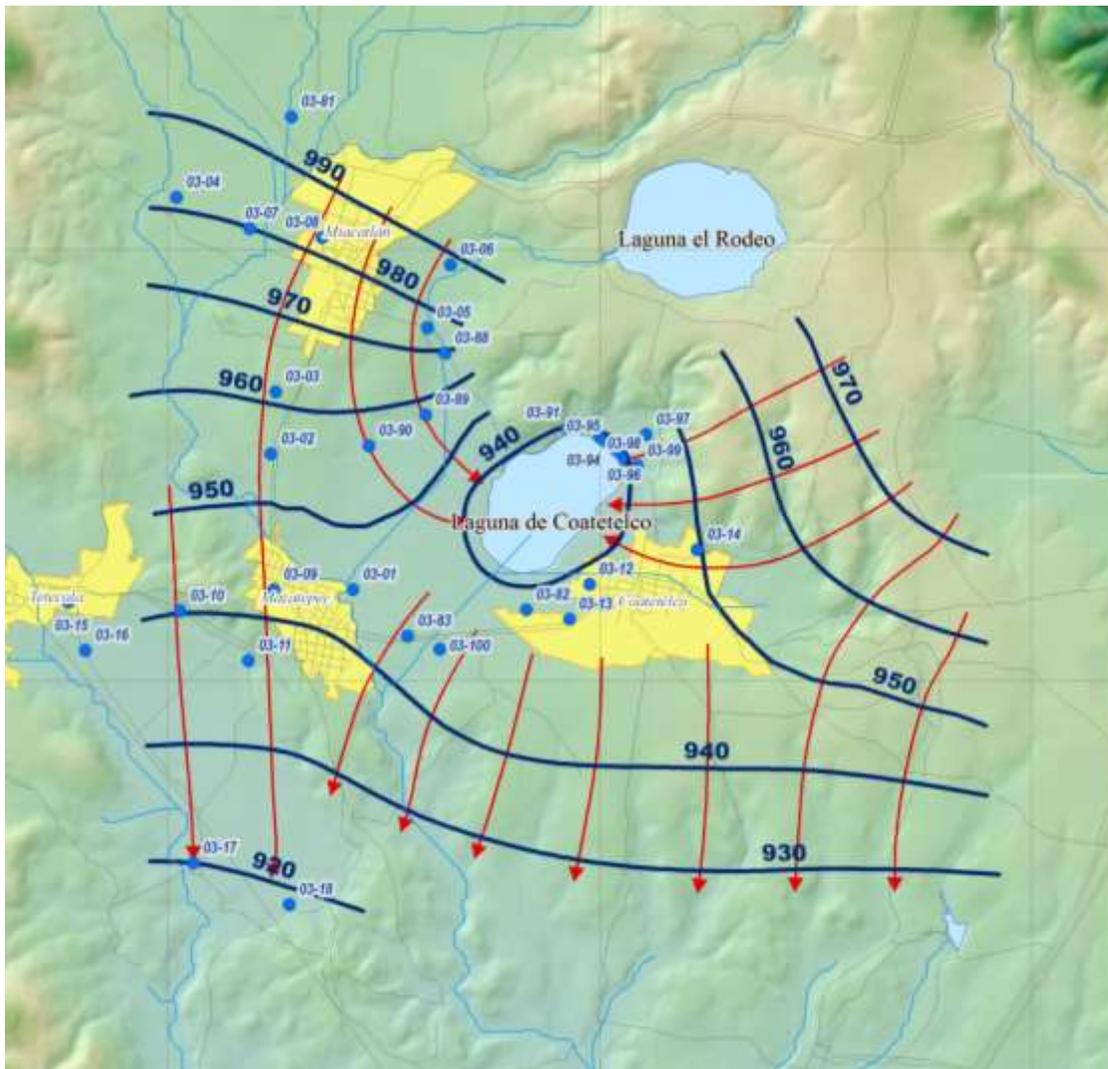
Las lagunas de Coatetelco y El Rodeo, se localizan en la zona sur del estado de Morelos y son utilizadas para diversos usos, como riego, vaso de almacenamiento (El Rodeo) así como servicios destinados a actividades turísticas-recreativas, estas lagunas se ubican relativamente cercanas entre sí, se ubican en el municipio de Miacatlán, mismas que presentan una cuenca de aportación de aproximadamente  $30.44 \text{ km}^2$  y  $6.25 \text{ km}^2$  respectivamente.



**Ilustración 4-12 Localización de las lagunas de estudio**

La fluctuación del volumen de la laguna de Coatetelco está en concordancia a la época seca. Recibe aguas de escurrimiento de varios arroyos, y existen infiltraciones de agua a mantos subterráneos. Se observan pérdidas considerables del volumen de agua por evaporación.

Algunos de los rasgos morfológicos indicadores de flujo regional de agua son la topografía, la pendiente del terreno, la dirección de los ríos principales y la cobertura vegetal.



**Ilustración 4-13 Piezométrica de la laguna de Coatetelco**

Finalmente, Tequesquitengo cuenta con un clima es cálido subhúmedo. El monitoreo satelital del gobierno del estado muestra 360 días de sol promedio anual. Es uno de los pocos sitios en el país donde se practica el paracaidismo, vuelo en aviones ultraligeros y vuelos en globo aerostático los 365 días del año.

Se aprecia una temperatura media anual de 25.60 °C, siendo la máxima media mensual de 29.2 °C en el mes de mayo y la mínima media mensual de 22 °C. aunque en los meses de diciembre y enero, se llegan a presentar temperaturas mínimas de 18 °C. Con estas ventajas en la temperatura, miles de esquiadores asisten todo el año a practicar diferentes modalidades del deporte, así, Teques es la Capital Mexicana del Esquí Acuático.

Es el principal almacenamiento hídrico del estado, es una cuenca cerrada de 28 Km<sup>2</sup>, con una superficie de inundación de 8 km<sup>2</sup>. Desde el punto de vista geológico es una fosa tectónica de más de 130 metros de profundidad que se formó como consecuencia del colapso del techo de grandes cavernas producidas por la disolución de la roca caliza que se encuentra como basamento. Este lago cuenta con las siguientes dimensiones: el espejo de agua mide 4.2 km de largo, 2.5 km de ancho y 16 km de perímetro, está ubicado a 887.37 msnm. Su capacidad máxima de almacenamiento de 168.9 hm<sup>3</sup>, nivel en el cual se inunda una superficie de ocho Km<sup>2</sup>. Tequesquitengo en la época de lluvias recibe aguas de diversos afluentes, como la barranca de Honda y la barranca del Muerto. El abastecimiento proviene de manantiales que se encuentran distribuidos en diferentes puntos del propio lago.

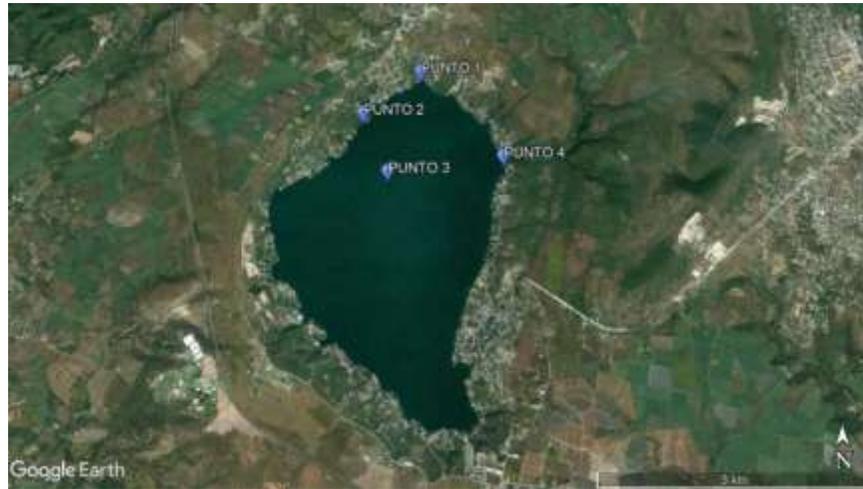
#### 4.4.2 Ubicación de muestreos

En cada uno de los cuerpos de agua del estado de Morelos (Tequesquitengo, Coatetelco y El rodeo), se tomaron muestras en diferentes puntos a dos profundidades distintas. En el embalse de Tequesquitengo se realizaron muestreos en cuatro puntos diferentes del cuerpo de agua de manera que se obtuviera una caracterización general de las condiciones de este, los cuales se muestran en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10 Sitios de muestreo en el lago Tequesquitengo**

| SITIO   | UBICACIÓN             | HORA  |
|---------|-----------------------|-------|
| PUNTO 1 | 18.63876, -99.265653  | 10:40 |
| PUNTO 2 | 18.633821, -99.272407 | 11:10 |
| PUNTO 3 | 18.627023, -99.269568 | 11:40 |
| PUNTO 4 | 18.628587, -99.256341 | 13.00 |

La Ilustración 4-14, muestra la localización de los puntos de muestreo en el cuerpo de agua Tequesquitengo. Las profundidades totales de los puntos numerados del uno al cuatro son de 13.6, 10.0, más de 20 y 5.5 metros respectivamente.



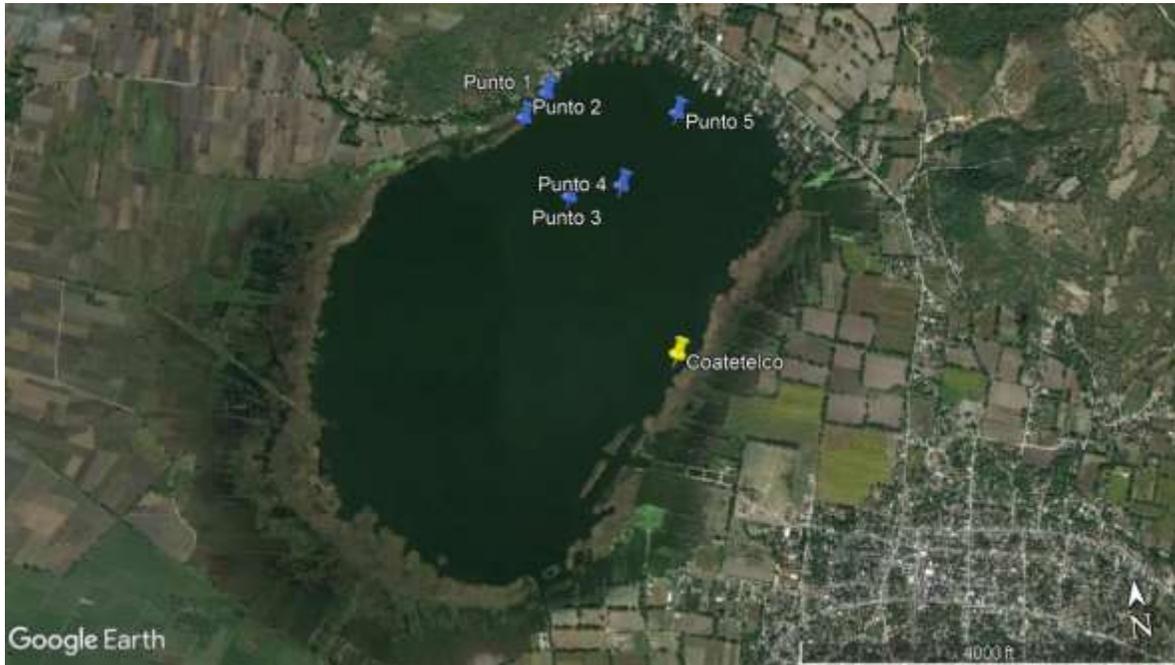
**Ilustración 4-14 Ubicación de los puntos de muestreo**

Por su parte la Tabla 4-11 muestra las coordenadas correspondientes al cuerpo de agua Coatetelco, en el cual se realizaron muestreos en cinco diferentes puntos.

**Tabla 4-11 Coordenadas y hora de muestreo en el cuerpo de agua Coatetelco.**

| <b>SITIO</b> | <b>UBICACIÓN</b>            | <b>HORA</b> |
|--------------|-----------------------------|-------------|
| PUNTO 1      | 18°44'45.5" N 99°20'13.7" W | 13:10       |
| PUNTO 2      | 18°44'43.1" N 99°20'16.6" W | 13:25       |
| PUNTO 3      | 18°44'33.9" N 99°20'12.6" W | 13:40       |
| PUNTO 4      | 18°44'34.4" N 99°20'06.6" W | 13:50       |
| PUNTO 5      | 18°44'41.5" N 95°19'59.2" W | 14:10       |

La Ilustración 4-15 muestra la ubicación de los puntos de muestreo dentro del cuerpo de agua.



**Ilustración 4-15 Ubicación de los puntos de muestreo en el cuerpo de agua Coatetelco**

Finalmente, la Tabla 4-12 tiene la información relacionada con los cinco puntos de muestreo que se realizaron en el cuerpo de agua de El Rodeo. Es importante señalar que, en los tres cuerpos de agua, las mediciones se realizaron en por lo menos dos profundidades.

**Tabla 4-12 Coordenadas y hora de muestreo de los puntos en el rodeo**

| SITIO   | UBICACIÓN                   | HORA  |
|---------|-----------------------------|-------|
| PUNTO 1 | 18°46'19.9" N 99°19'19.6" W | 10:15 |
| PUNTO 2 | 18°46'17.4" N 99°19'27.3" W | 10:25 |
| PUNTO 3 | 18°46'04.3" N 99°19'38.0" W | 10:40 |
| PUNTO 4 | 18°45'54.1" N 99°19'34.4" W | 11:00 |
| PUNTO 5 | 18°45'53.6" N 99°19'16.9" W | 11:30 |

La Ilustración 4-16 muestra la ubicación de los puntos de muestreo realizados en el cuerpo de agua el Rodeo.



**Ilustración 4-16 Ubicación de los puntos de muestreo en el cuerpo de agua Rodeo**

#### 4.4.3 Muestreo de los cuerpos de agua

Las mediciones en cada uno de los cuerpos de agua se realizaron en por lo menos en dos profundidades, de acuerdo con la profundidad máxima presente y en dos meses diferentes. La Tabla 4-13, muestra los parámetros medidos en el cuerpo de agua de Coatetelco, siendo estos: transparencia de Secchi, pH, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos disueltos totales, salinidad, temperatura y presión. Con los anterior se puede conocer sobre el comportamiento de etas características en cada uno de los puntos.

**Tabla 4-13 Parámetros medidos en Coatetelco**

| Estación de monitoreo | hora  | profundidad total (m) | Transparencia Secchi (m) | pH   | O.D  | Conduct. | SDT | PSU         | Temp. del agua °C | PSI    | ORP  |
|-----------------------|-------|-----------------------|--------------------------|------|------|----------|-----|-------------|-------------------|--------|------|
|                       |       |                       |                          |      | ppm  | us/cm    | ppm | (salinidad) |                   |        |      |
| Punto # 1 Superficial | 13:10 | 3.3                   | 0.6                      | 9.07 | 8.84 | 527      | 264 | 0.25        | 29.98             | 13.252 | 30.7 |
| Punto # 1 profundo    | 13:15 | 3.1                   |                          | 9.32 | 6.39 | 533      | 267 | 0.26        | 27.98             | 13.246 | 41.8 |
| Punto # 2 Superficial | 13:25 | 3.3                   | 0.7                      | 8.69 | 8.27 | 520      | 264 | 0.25        | 31.68             | 13.265 | 30.9 |
| Punto # 2 profundo    | 13:30 | 3.1                   |                          | 8.67 | 6.25 | 534      | 267 | 0.26        | 27.91             | 13.257 | 41.7 |

|             |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |
|-------------|-------|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-------|--------|------|
| Punto # 3   | 13:40 | 4.5 | 0.7 | 8.74 | 8.2  | 527 | 263 | 0.25 | 29.46 | 13.252 | 30.7 |
| superficial |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |
| Punto # 3   | 13:45 | 4.3 |     | 8.42 | 3.41 | 599 | 303 | 0.26 | 27.87 | 13.252 | 41.2 |
| profundo    |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |
| Punto # 4   | 13:50 | 4.5 | 0.7 | 8.62 | 8.08 | 530 | 266 | 0.25 | 30.5  | 13.262 | 30.8 |
| superficial |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |
| Punto # 4   | 13:55 | 4.3 |     | 8.46 | 5.64 | 537 | 268 | 0.26 | 27.89 | 13.259 | 41.1 |
| profundo    |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |
| Punto # 5   | 14:05 | 4.4 | 0.8 | 8.7  | 8.8  | 528 | 264 | 0.25 | 31.05 | 13.285 | 30.7 |
| superficial |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |
| Punto # 5   | 14:10 | 4.2 |     | 8.69 | 7.08 | 532 | 266 | 0.25 | 28.2  | 13.278 | 42.6 |
| profundo    |       |     |     |      |      |     |     |      |       |        |      |

Por su parte la Tabla 4-14 muestra los parámetros que corresponden a los puntos de muestreo del cuerpo de agua El rodeo.

**Tabla 4-14 Parámetros medidos en el rodeo**

| Estación de monitoreo | hora   | profundidad total (m) | Transparencia Secchi (m) | pH   | O.D  | Conduct. | SDT | PSU         | Temp. del agua °C | PSI       | ORP  |
|-----------------------|--------|-----------------------|--------------------------|------|------|----------|-----|-------------|-------------------|-----------|------|
|                       |        |                       |                          |      | ppm  | us/cm    | ppm | (salinidad) |                   | (presión) | mV   |
| Punto # 1 Superficial | 10:15  | 2.4                   | 1.3                      | 7.48 | 5.69 | 144      | 72  | 0.07        | 28.19             | 13.02     | 38.7 |
| Punto # 1 profundo    | 10:20  | 2.2                   |                          | 7.34 | 5.43 | 143      | 7.1 | 0.07        | 27.74             | 13.013    | 37.8 |
| Punto # 2 Superficial | 10:25  | 1.7                   | 1.4                      | 7.64 | 5.03 | 144      | 72  | 0.07        | 28.3              | 13.024    | 38.6 |
| Punto # 2 profundo    | 10:30  | 1.5                   |                          | 7.5  | 4.83 | 144      | 72  | 0.07        | 28.2              | 13.022    | 37.6 |
| Punto # 3 superficial | 10.:40 | 4.9                   | 1.7                      | 7.7  | 5.85 | 142      | 71  | 0.07        | 28.68             | 13.056    | 38.9 |
| Punto # 3 profundo    | 10:45  | 4.7                   |                          | 7.2  | 1.48 | 140      | 70  | 0.06        | 27.72             | 13.056    | 37.6 |
| Punto # 4 superficial | 11:00  | 5.1                   | 1.6                      | 7.74 | 4.85 | 142      | 71  | 0.07        | 28.84             | 13.08     | 38.9 |
| Punto # 4 profundo    | 11:10  | 4.9                   |                          | 7.13 | 0.96 | 152      | 76  | 0.07        | 27.4              | 13.072    | 37.7 |
| Punto # 5             | 11:30  | 6                     | 1.5                      | 7.68 | 4.5  | 142      | 71  | 0.07        | 28.77             | 13.084    | 38.7 |

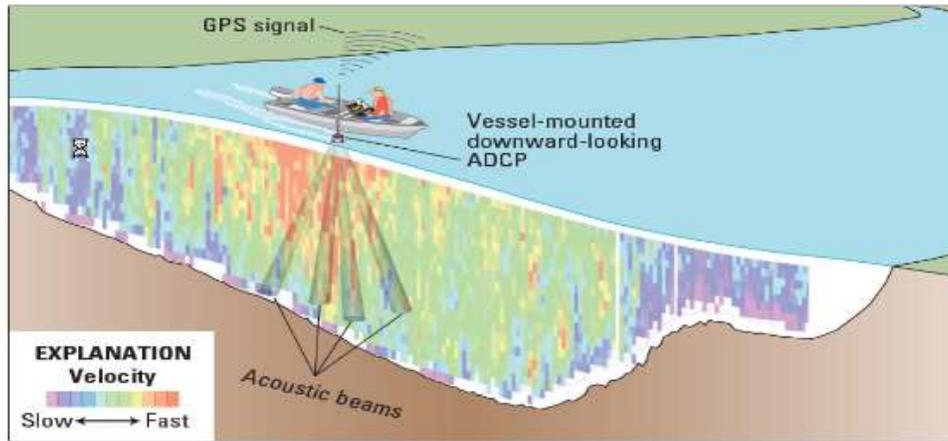
|             |       |     |  |      |      |     |    |      |       |        |      |
|-------------|-------|-----|--|------|------|-----|----|------|-------|--------|------|
| superficial |       |     |  |      |      |     |    |      |       |        |      |
| Punto # 5   | 11:40 | 5.8 |  | 7.13 | 0.51 | 158 | 79 | 0.07 | 26.98 | 13.085 | 37.5 |
| profundo    |       |     |  |      |      |     |    |      |       |        |      |

#### **4.4.4 Estudio Batimétrico del sistema lagunar del Rodeo y Coatetelco**

Con la finalidad de establecer las características geomorfológicas del sistema lagunar del Rodeo y Coatetelco, se llevaron a cabo una serie de mediciones de profundidad durante octubre y noviembre de 2018. La morfología de la laguna de El Rodeo es circular con un diámetro aproximado de 1.7-1.9 km. Mientras que la laguna de Coatetelco presenta una forma más rectangular con lados aproximados de 1.2 y de 1.8 km.

##### **4.4.4.1 Descripción de las mediciones**

Para las mediciones de batimetría se utilizó un perfilador Doppler de la marca Sontek modelo M9 multifrecuencia con GPS integrado (Sontek, 2013). El perfilador Doppler nos permite hacer transectos y medir de forma precisa la posición, profundidad y el perfil vertical de velocidad. Debido a que las velocidades son pequeñas en lagos (aproximadamente 1-2 cm/s), la desviación estándar de los datos medidos durante la perfilación es mucho mayor a la velocidad típica del lago, por lo tanto, estos datos no son de calidad para estimar el campo de velocidad del cuerpo de agua. El esquema de medición para los transectos se describe en la Ilustración 4-17. En este caso el perfilador M9 con GPS integrado fue montado sobre una tabla de surf junto con la fuente de poder y radio (Ilustración 4-18). La configuración, control del equipo y despliegue de los transectos se llevó a cabo a través de una computadora portátil vía radio. Toda la información de las mediciones es registrada en la memoria del M9 la cual es descargada posteriormente a la computadora portátil para su procesamiento.



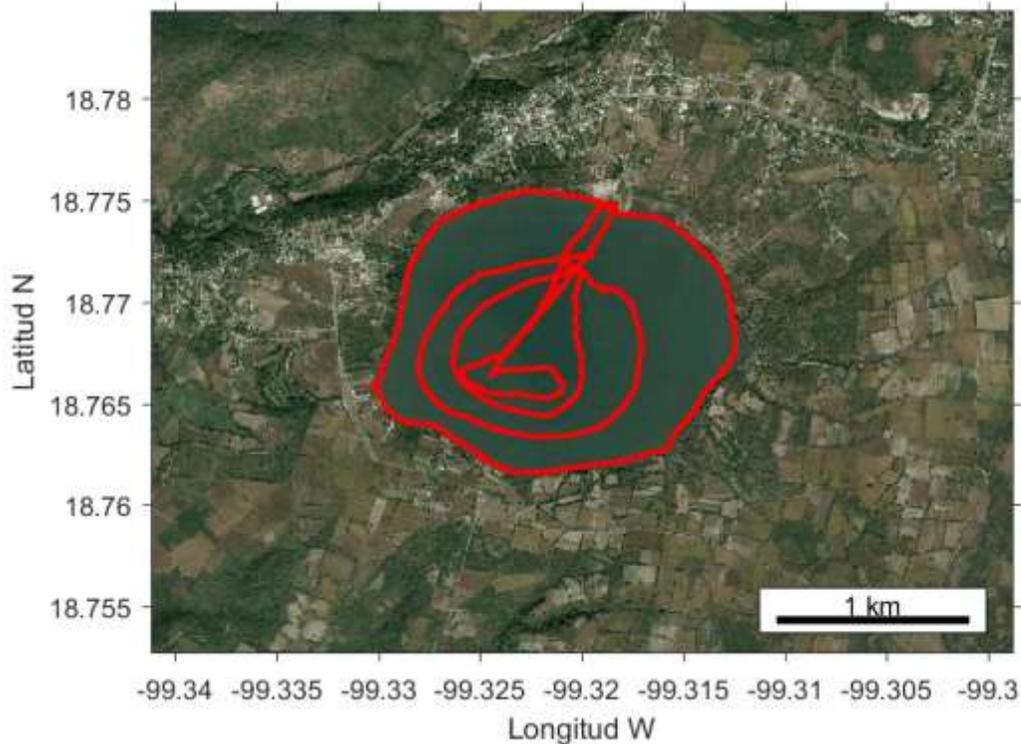
**Ilustración 4-17 Esquema de medición de la estación del gasto con perfilador Doppler M9**



**Ilustración 4-18 Perfilador Doppler M9, montado en una tabla de surf junto con GPS y módulo de energía y comunicación utilizado en la medición.**

Las mediciones en la laguna de El Rodeo se llevaron a cabo el 19 y 24 de octubre de 2018. Para esto se contó con el apoyo de los pescadores de la laguna los cuales facilitaron el bote para hacer los recorridos y se turnaron para remar durante las mediciones, ya que, tanto en el lago de El Rodeo como en el de Coatetelco no están permitidos los motores fuera de borda. La morfología del lago es circular con un diámetro de aproximadamente 1.7 a 1.9 km. Por

lo tanto, el esquema de medición que se siguió en la navegación fue el de hacer círculos concéntricos al interior del lago. En la laguna de El Rodeo se llevaron a cabo 4 círculos concéntricos (Ilustración 4-19). Durante el 19 de octubre de 2018 se llevaron a cabo los dos círculos interiores y durante el 24 de octubre de 2018 el círculo exterior y el interior. El lago no presenta un crecimiento de vegetación excesiva por los recorridos en su interior y en las orillas se hizo sin contratiempos. El nivel del lago de El Rodeo presenta una variación anual que depende de la precipitación y del uso agrícola que se le da al agua del lago. Existe una estación de monitoreo del nivel del lago y el valor en la escala para los días 19 y 24 de octubre correspondió a 1160.15 y 1160.35 m, respectivamente.



**Ilustración 4-19 Trayectoria de las mediciones con perfilador Doppler M9 durante las campañas de medición, en la laguna Rodeo.**

La campaña de mediciones en la laguna de Coatetelco se llevó a cabo el 15 de noviembre de 2018. La laguna de Coatetelco presenta una forma más rectangular con lados aproximados de 1.2 y 1.8 km de ancho y de largo, respectivamente. Gran parte de la margen de la laguna se encuentra rodeada de vegetación, por lo tanto, no fue posible navegar por toda la orilla del espejo de agua. De aquí que el recorrido exterior se hizo hasta donde lo

permitió la vegetación y no hasta la orilla real del lago. De igual forma que en El Rodeo se contó con el apoyo de los pescadores locales para llevar a cabo los recorridos en bote y la navegación a remo.

Durante el día de las mediciones se hicieron dos recorridos alrededor del lago. El primero fue por toda la margen del lago lo más pegado a la orilla hasta donde lo permitió la vegetación. El segundo recorrido se llevó a cabo en la parte interior sin embargo este no se completó debido que la carga de las baterías del equipo de medición se terminó (**¡Error! No e encuentra el origen de la referencia.**).



**Ilustración 4-20 Trayectoria de las mediciones con perfilador DopplerM9 en la laguna de Coatetelco.**

#### **4.4.5 Procesamiento y análisis**

El procesamiento de los datos consistió en revisar la calidad de los datos e integrarlos para formar una base de datos de las variables medidas. El análisis y presentación gráfica de los datos se llevó a cabo utilizando la herramienta MATLAB (Matlab, 2012) Para esto se elaboraron una serie de algoritmos que permitió el manejo de todo el volumen de datos obtenidos durante las campañas de medición. Las mediciones consistieron en transectos

circulares en ambos lagos midiendo la posición y profundidad a cada segundo en cada uno de los puntos. Las mediciones son lo suficientemente densas para establecer de forma clara las características batimétricas del área.

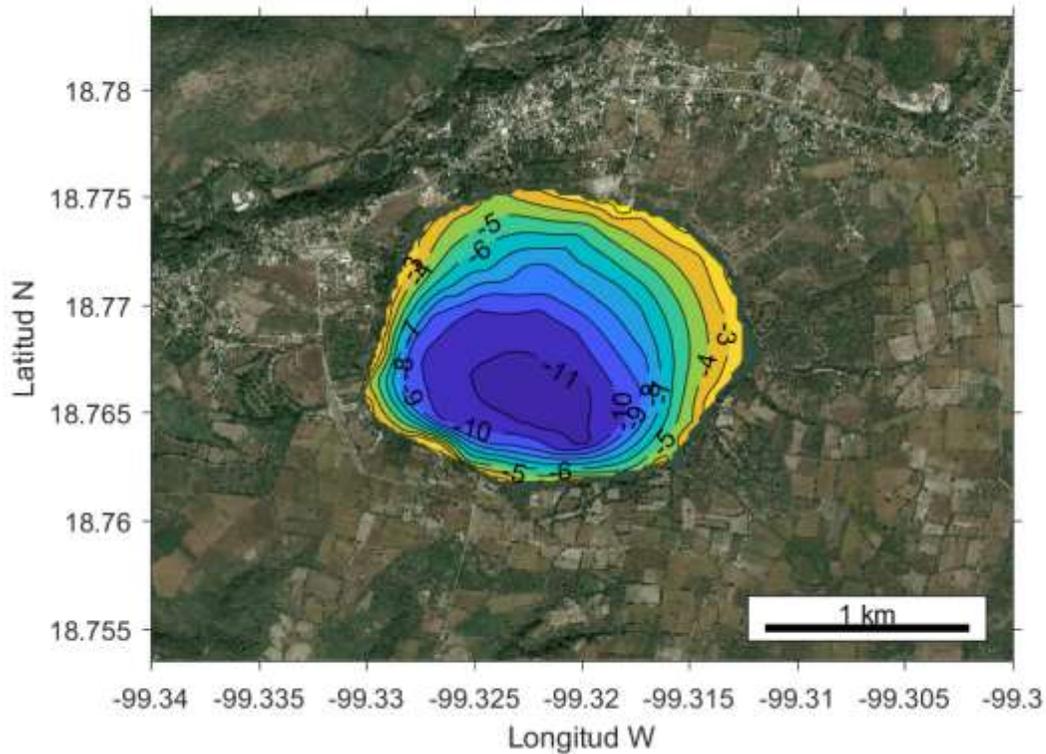
#### **4.4.5.1 Integración de la base de datos**

Los datos del perfilador doppler M9 se almacenan simultáneamente en la computadora con en la memoria de estado sólido del perfilador. Como la comunicación de la computadora con el perfilador es vía radio, en caso de haber alguna pérdida de comunicación, y por lo tanto de datos, los datos pueden ser recuperados posteriormente directamente del perfilador. Los archivos de cada campaña son revisados y se verifica que los parámetros definidos durante el muestreo estén correctos (profundidad del sensor acústico y declinación magnética). Habiendo revisado la calidad de los datos estos son exportados como como archivos MAT (MAT-File), el cual, son archivos en formato binario y que contiene todas las variables medidas durante el muestreo. Como el interés es la batimetría se extrae de los archivos la posición y profundidad para cada uno de los puntos. En el caso de El Rodeo hubo variación de nivel entre los dos nuestros y por lo tanto las profundidades quedaron referidas al nivel del lago del primer muestreo (0 m). Por lo tanto, las batimetrías están referidas al nivel de nuestro. Sin embargo, para el lago de El Rodeo las profundidades al nivel observado en la estación hidrométrica.

Los datos de posición y profundidad (x,y,z) son procesados con Matlab y como se encuentran distribuidos en forma aleatoria se genera una malla de 27x27 m cubriendo toda el área de medición e interpolando datos de profundidad en cada nodo de la malla. Finalmente, estos son los datos que se grafican para cada uno de los sistemas lagunares.

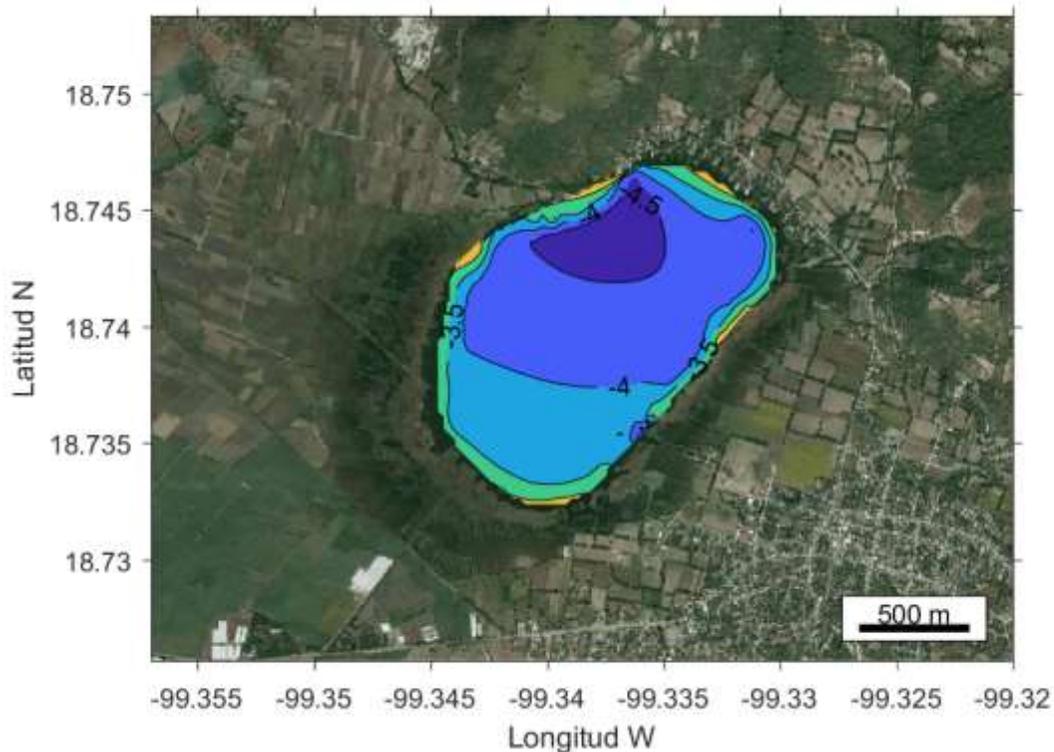
#### **4.4.5.2 Batimetría**

En la Ilustración 4-21, se presenta la batimetría para la laguna del El Rodeo. Los contornos son concéntricos con una profundidad máxima de 11 a 12 m. El gradiente de profundidad es más suave en la parte noreste de la laguna y un gradiente más marcado en la parte en la parte suroeste de la laguna. Los datos de las mediciones cubren la mayor parte de la laguna por lo tanto las características de la batimetría, muestra los principales rasgos morfológicos que caracterizan a la laguna de El Rodeo.



**Ilustración 4-21 Contornos de profundidad en la laguna El Rodeo, derivado de la campaña de medición.**

En la Ilustración 4-22 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la batimetría de la laguna de Coatetelco. Las mediciones consistieron en dos transectos que son representativos del borde de la laguna. La laguna de Coatetelco es más somera y las profundidades medidas no fueron mayores a los 5 m.



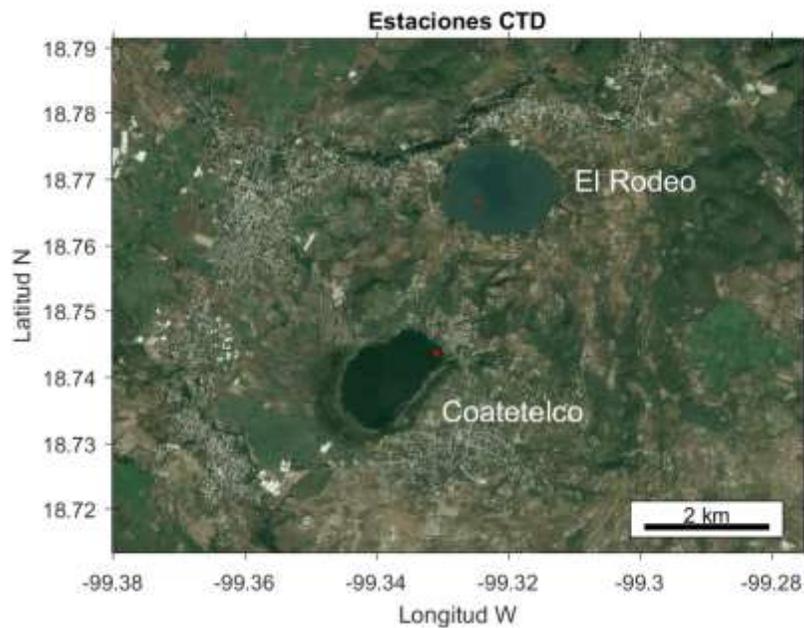
**Ilustración 4-22** Contornos de profundidad en la laguna de Coatetelco, derivado de la campaña de medición.

#### **4.4.6 Medición de temperatura y salinidad (CTD)**

Mediciones de conductividad, temperatura y profundidad (CTD) se llevaron a cabo en cada una de las lagunas para establecer la estructura vertical de la columna de agua. Para esto se utilizó un CTD CastAway de la marca YSI (CastAway CTD, 2010). Los lances de CTD se llevaron a cabo desde la embarcación midiendo hasta el fondo de la columna de agua (Ilustración 4-22). En la Ilustración 4-24 se presenta la ubicación de los lances para las dos lagunas. En cada una de las lagunas se hicieron 2 lances prácticamente en el mismo punto. El lance más profundo correspondió a la laguna de El Rodeo (11.3 m) y se hizo el 24 de octubre de 2018. El más somero para la laguna de Coatetelco (4.3 m) y se hizo el 15 de noviembre de 2018. En la Ilustración 4-25 a la Ilustración 4-27 se presentan los perfiles de temperatura, salinidad y densidad de los lances que se llevaron a cabo en cada una de las lagunas.

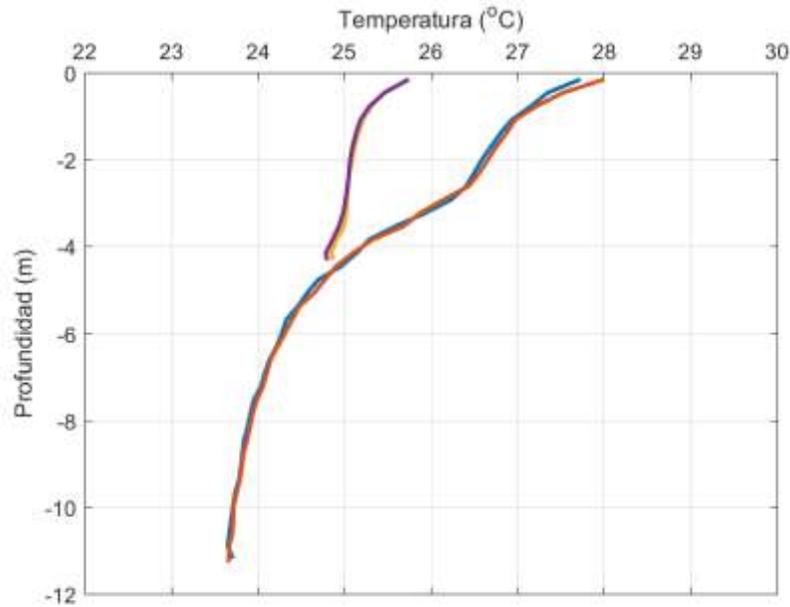


**Ilustración 4-23 CTD utilizado para las mediciones de salinidad, temperatura y profundidad en las bocas de las lagunas costeras y ríos.**



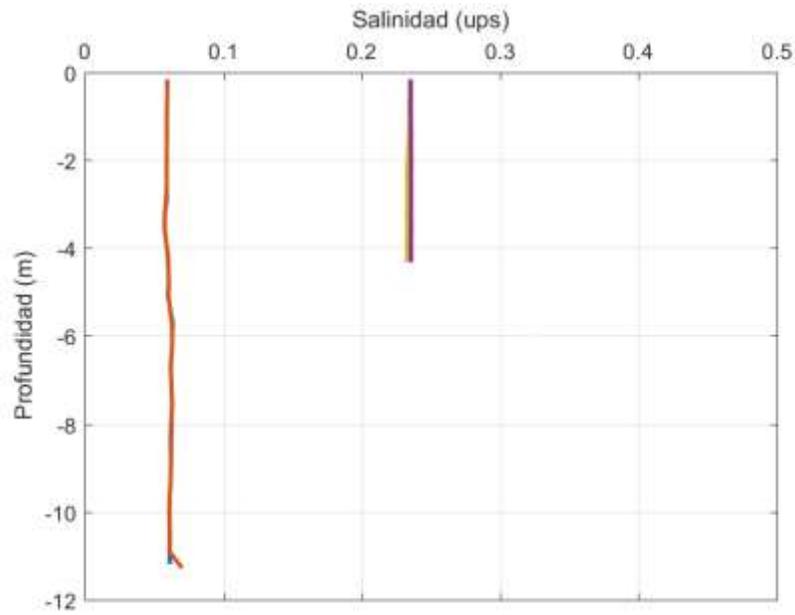
**Ilustración 4-24 Ubicación de los lances del CDT**

El perfil de temperatura en El Rodeo muestra un gradiente uniforme de la superficie al fondo con un máximo en la superficie de 28°C y un mínimo de 23.7°C en el fondo. El perfil de temperatura de la laguna de Coatetelco muestra también un gradiente menos marcado y con temperaturas menores. La temperatura superficial fue de 25.7°C y de 24.8°C en el fondo. La diferencia de temperatura en ambos cuerpos de agua puede ser atribuida a las diferentes fechas de muestreo.

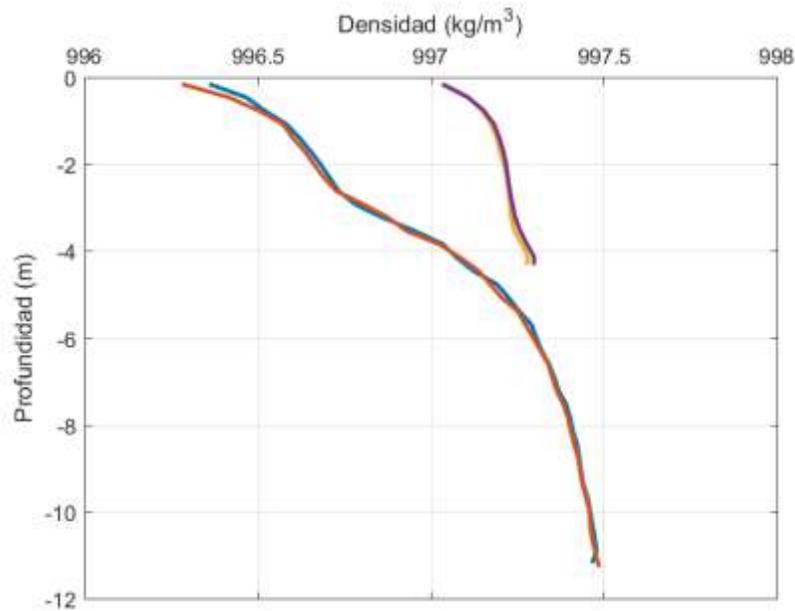


**Ilustración 4-25 Perfil vertical de temperatura (°C) en las lagunas de muestreo.**

Respecto a la salinidad de los cuerpos de agua, esta es uniforme de la superficie al fondo y solo se observa una salinidad mayor en la laguna de Coatetelco de 0.15 ups comparado con la salinidad de la laguna de El Rodeo (Ilustración 4-26). Finalmente, se presenta el perfil de densidad para las dos lagunas el cual es determinado por la temperatura ya que la salinidad es uniforme en ambos cuerpos de agua (Ilustración 4-27; **Error! No se encuentra el origen e la referencia.**).



**Ilustración 4-26 Perfil vertical de salinidad (ups) en los puntos de muestreo.**



**Ilustración 4-27 Perfil vertical de densidad en los puntos de muestreo.**

#### 4.4.7 Evaluación de la producción de metano en agua y sedimento

Se desea evaluar la contribución sobre el impacto ambiental que causa la contaminación generada, particularmente por las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) provenientes de agua y sedimento de las lagunas El Rodeo y Coatetelco.

Pese a que el metano (CH<sub>4</sub>) se produce de manera natural, actualmente el 70% de las emisiones de este gas son ocasionadas por el hombre. El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha calculado que los embalses y lagos son responsables del 22% del total de las emisiones de metano mundiales. (Paucar M., 2014).

En un medio libre de oxígeno disuelto, los microorganismos facultativos y anaeróbicos degradan la materia orgánica presente en el agua o lodo produciendo CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Nolasco D., 2010)

La cantidad de metano producida se ve influrenciada por la cantidad de materia orgánica degradada y la medida en que el medio se encuentre libre de oxígeno disuelto. Esta última se ve condicionada por el diseño y mecanismos de aireación (naturales o forzados) que posea el sistema. (Nolasco D., 2010).

La motivación de estos estudios radica en proporcionar una contribución mediante el diseño de un sistema de captación y medición del volumen de gases emitidos por una cámara que simula en su interior a escala, una parte de agua y sedimento de las lagunas anteriormente señaladas.

Según datos de la IPCC, en condiciones óptimas (ausencia total de oxígeno disuelto) una cámara anaerobia es capaz de producir 0.25 kg de metano por cada kg de DQO (Demanda Química de Oxígeno) degradada. El gas emitido por una unidad de tratamiento anaerobio se denomina biogás y está compuesta por diversos gases, los cuales se mencionan a continuación (Nolasco D., 2010):

**Tabla 4-15 Compuestos que conforman el biogas**

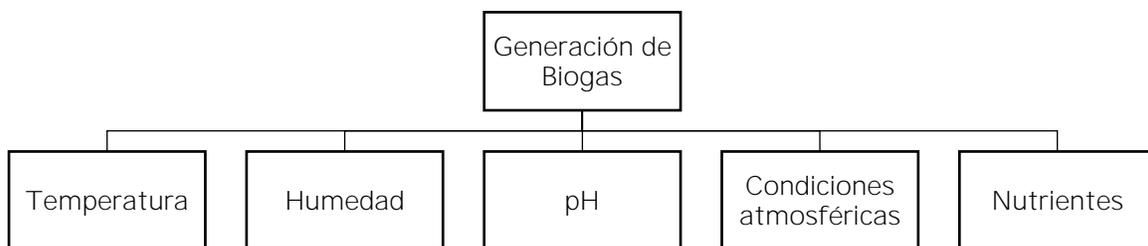
|   |          |
|---|----------|
| Metano (CH <sub>4</sub> )               | 55-75%   |
| Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )   | 25-45%   |
| Monóxido de Carbono (CO)                | 0-0.3%   |
| Nitrógeno (N <sub>2</sub> )             | 1-5%     |
| Hidrógeno (H <sub>2</sub> )             | 0-3%     |
| Sulfuro de Hidrogeno (H <sub>2</sub> S) | 0.1-0.5% |

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| Oxígeno (O <sub>2</sub> ) | trazas |
|---------------------------|--------|

Los proyectos que se enfocan al tratamiento y análisis de biogás tienen beneficios ambientales, control de emisiones contaminantes y la sustitución de combustibles fósiles.

El biogás se genera como resultado de reacciones físicas, químicas y microbianas que ocurren dentro de los sistemas, debido a la naturaleza orgánica de gran parte de los residuos, el proceso microbiano gobierna la producción de biogás. Estos procesos son sensibles al medio en que se desarrollan, por lo que existe una serie de condiciones naturales y artificiales que determinan la población microbiana y, en consecuencia, la producción de biogás. Es importante mencionar que el biogás se origina en condiciones anaeróbicas (López D., 2016).

Los factores que afectan la producción de biogás se resumen en la Ilustración 4-28.

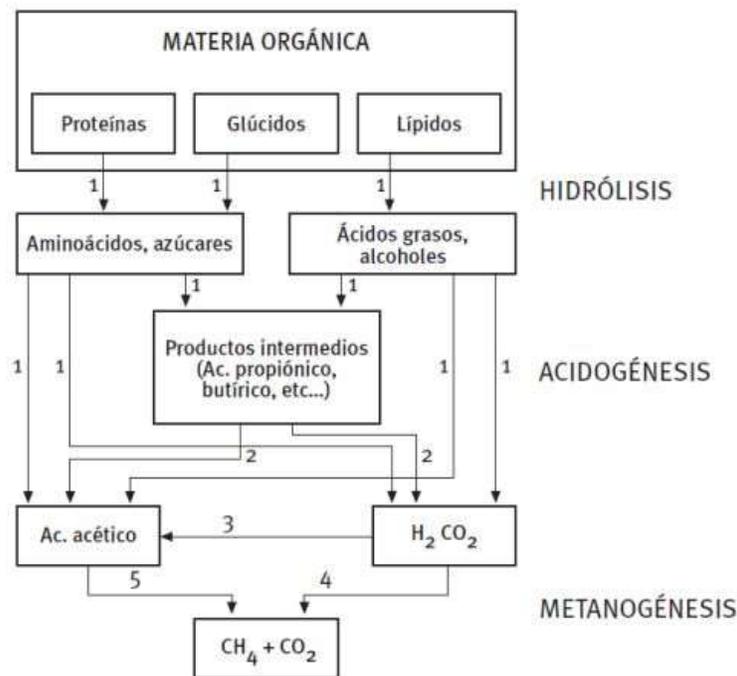


**Ilustración 4-28 Factores que afectan la generación de biogás**

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica (Corrales L., 2015). La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hojas y hierbas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales. (Lagunes Y., 2016). El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí mismo (Acosta Y., 2014).

Las vías microbiológicas de producción de energía a partir de sustratos biológicamente degradables representan una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables que se utilizan en la actualidad. Esto es especialmente interesante

dentro del campo de las instalaciones agroindustriales las que pueden cubrir una parte de sus necesidades energéticas a partir de sus propios residuos, para complementar o reemplazar los combustibles fósiles. Otro aspecto muy ventajoso es que la generación de lodos en exceso es mucho menor en el proceso anaerobio que en el aerobio, por lo que también se reducen los costos de tratamiento de los lodos. Por todo esto, la digestión anaerobia (Ilustración 4-29) se presenta como el método más ventajoso en el tratamiento de aguas residuales de mediana y alta carga orgánica (Acosta Y., 2014).



**Ilustración 4-29 Mecanismo de degradación anaerobia**

**Hidrólisis.**

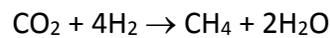
El material particulado es convertido en compuestos solubles que luego pueden ser hidrolizados aún más a moléculas simples si son utilizadas por bacterias que llevan a cabo la acidogénesis.

**Fermentación**

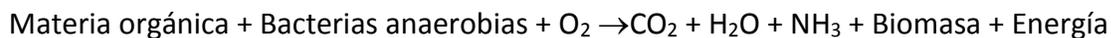
También conocida como acidogénesis, los ácidos grasos, aminoácidos, azúcares formados en el paso anterior son degradados aún más. Los principales productos de fermentación son el acetato, hidrogeno y el dióxido de carbono.

**Metanogénesis**

En esta fase es llevada a cabo por una clase de microorganismos anaeróbicos denominados metanogénicos. Existen dos grupos de microorganismos metanogénicos: los acetoclásticos (degradan el metano a acetato y dióxido de carbono) y los utilizadores de hidrogeno (generan metano a partir de hidrogeno y dióxido de carbono) El desarrollo de los organismos metanogénicos se ve inhibido en presencia de oxígeno disuelto (Nolasco D., 2010).



Por otra parte, el  $\text{CO}_2$  es un gas soluble en agua transportado en la columna de agua, en el sedimento y en la atmosfera mediante procesos de advección y difusión, así como también puede evolucionar a partir de los sedimentos por medio de burbujeos. Parte del carbono orgánico afluente a los lagos y humedales procedentes de las cuencas, es respirado como  $\text{CO}_2$  hacia la atmosfera y en el caso de los cuerpos eutrofizados, a pesar de la alta producción primaria autóctona (generación de fitoplancton) que vía fotosíntesis podría consumir  $\text{CO}_2$ , estos pueden ser fuentes netas de carbono (Canchala T., 2014). El proceso de generación de  $\text{CO}_2$  se resume en la siguiente reacción:



El  $\text{CH}_4$  se produce por la acción de los microorganismos metanogénicos cuando se presentan ambientes con baja disponibilidad de oxígeno, como es el caso de los sedimentos o aguas contaminadas (Liikanen, 2002). El  $\text{CH}_4$  es producto de la reducción del  $\text{CO}_2$ , en la cual el  $\text{H}_2$ , el acetato y los alcoholes son usados como donadores de electrones. El  $\text{CH}_4$  es poco soluble en agua, por ello luego de producirse en los sedimentos se transporta a favor de un gradiente de concentración a zonas con alta disponibilidad de oxígeno en donde puede ser oxidado por los microorganismos metanótrofos (Huttunen et al., 2001). La ebullición es uno de los principales mecanismos de transporte del metano desde los sistemas acuáticos hacia la atmosfera. Este proceso corresponde a la formación de burbujas de metano en los sedimentos, las cuales se acumulan hasta generar una presión suficiente para ser liberadas a través de la columna de agua a la atmosfera (Huttunen et al., 2001).

#### **4.4.7.1 Muestreo**

Se realizó un muestreo en las lagunas El Rodeo y Coatetelco, en donde se obtuvieron muestras de agua y sedimento.

Se procedió a utilizar la draga Ekman (Ilustración 4-30) para la extracción de sedimento del fondo, este muestreador de acero inoxidable está diseñado para ser usado en sedimento

blando. Las muestras se pueden tomar de las capas superficiales y las mandíbulas de carga, mediante un dispositivo de muelles, evitan la pérdida de material siempre que no haya pequeñas piedras o tallos que impidan el cierre. Este muestreador de 3.5 litros se completa con una cuerda sintética para alcanzar profundidades de hasta 30 metros. Así mismo se utilizaron garrafas con capacidad de 4 l para la muestra de agua del sitio tomada de la parte superior de la laguna. Se tomaron aproximadamente 3kg de sedimento y 8 l de agua por cada laguna.



Ilustración 4-30 Muestreo con draga Ekman

#### **4.4.7.2 Selección de la estación de muestreo**

Debido al interés que causaba el constante burbujeo en ciertos puntos de estas lagunas, la selección del punto de extracción fue de acuerdo con la zona más profunda en el que se mostraba un mayor burbujeo (Ilustración 4-31).



Ilustración 4-31 Zona de muestreo con mayor burbujeo.

#### **4.4.7.3 Análisis de sedimentos**

Para realizar el análisis de porcentaje de humedad y de materia orgánica lo primero que se debe realizar es el correcto manejo del procedimiento de calidad que indica la NMX-AA-034-SCFI-2015 para la preparación de las capsulas.

Se deben lavar correctamente y secar las capsulas a utilizar, introducir al horno a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 20 minutos como mínimo, las capsulas posteriormente se introducen a la mufla a una temperatura de  $550^{\circ}\pm 50^{\circ}\text{C}$ , durante 20 minutos y después se transfieren al horno.

Trasladar la capsula al desecador y dejar enfriar por 20 minutos por mínimo. El manejo de las capsulas durante el análisis debe realizarse en todo momento con pinzas.

Pesar las capsulas y repetir el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia de  $\leq 0.0005\text{g}$  en dos pesadas consecutivas.

Para realizar este procedimiento las balanzas deben estar correctamente calibradas. Para obtener las medidas más precisas debe usarse la misma balanza durante cada medición, se utilizó la balanza Aventurer OHAUS ubicada en la planta piloto del IMTA.

Para la determinación de humedad se siguió el procedimiento D 2974-00 (ASTM, 2000), para humedad, cenizas y materia orgánica y otros solidos orgánicos.

La humedad es determinada mediante el secado una muestra bien mezclada y representativa de sedimento húmedo de 40g a  $105^{\circ}\text{C}$  en horno eléctrico (marca Lindberg Blue, modelo SW-L7TA-1). El contenido de humedad es expresado como porcentaje de la masa seca del horno.

Posteriormente, se enfrió la muestra en desecador y peso en balanza electrónica (Aventurer OHAUS), repitiéndose este procedimiento hasta lograr un peso constante con una diferencia de  $\leq 0.0005\text{g}$  en dos pesadas consecutivas.

La materia orgánica se determinó a partir de muestras de sedimento seco, que fueron calcinadas en mufla (Furnace modelo 550-58) a  $550^{\circ}\text{C}$  durante una hora, posteriormente se enfriaron en desecador y se determinaron los contenidos de materia orgánica por diferencia de peso.

Tabla 4-16 Resultados del análisis de sedimentos.

|           | Laguna El Rodeo |           | Laguna Coatetelco |           |
|-----------|-----------------|-----------|-------------------|-----------|
|           | Muestra 1       | Muestra 2 | Muestra 1         | Muestra 2 |
| % Humedad | 57.71           | 57.78     | 60.74             | 61.14     |
| % MO      | 9.52            | 9.20      | 8.92              | 8.23      |

#### 4.4.7.4 Sistema de captación de gases

El sistema de captación de gases que se implementó en este proyecto fueron las cámaras debido a que es un método simple para simular un sistema de agua-sedimento a escala laboratorio de muestras tomadas de lagunas en este caso en particular. Esto no permite intercambio de gases entre el interior y exterior de la cámara. Es un sistema apto para estudiar procesos de emisión de gases con el aditamento adecuado como se muestra a continuación.

El sistema 1 como se muestra en la Ilustración 4-32, consiste en la cámara compuesta de agua y sedimento llenada hasta su máximo volumen posible para facilitar la salida por presión de los gases formados en el interior, estos pasan a través de una manguera de tubing mientras que por el otro lado se encuentra un cilindro invertido relleno totalmente de agua para que esta sea desplazada por el gas. A través de este método se puede cuantificar el volumen de gas generado y tomar muestras de este, para conocer sus concentraciones particulares formadas.

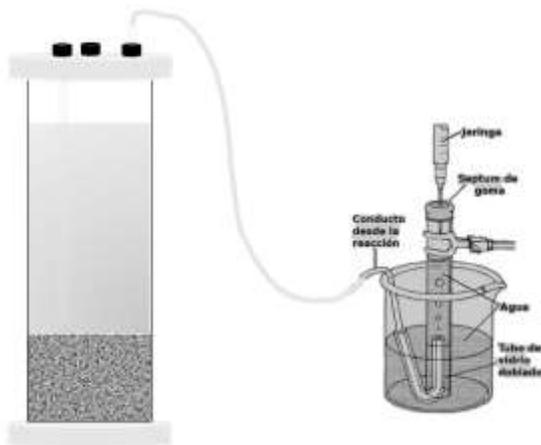


Ilustración 4-32 Sistema de medición por desplazamiento de volumen

El sistema 2 (Ilustración 4-33) consiste en la implementación de las bolsas Tedlar® que son un método simple de captación y transporte de muestras de gases. Se concentra todo el gas en la bolsa de fluoruro de polivinilo (FPV) que es químicamente inerte en el que se pueden realizar muestreos de aire interior, mezclas de gases, etc., contiene una opción de ajuste de válvula con bloqueo de presión/ tracción y costura que garantiza que las bolsas sean resistentes y a prueba de fugas.



**Ilustración 4-33 Sistema de captación Tedlar Bag®**

El trabajo experimental se desarrolló en cuatro cámaras de acrílico de 30cm de altura, donde la 1 y 2 contienen agua y sedimento de la laguna El Rodeo mientras que la 3 y 4 de la Laguna de Coatetelco, las cámaras funcionan cerradas herméticamente, manteniendo una porción de aire confinado entre la superficie que emite los gases de interés y la tapa de la cámara. Se determinaron las siguientes condiciones iniciales para cada una de ellas:

**Tabla 4-17 Condiciones experimentales iniciales para cada cámara complementada**

|                               | Sistema de captamiento Tedlar bag® |          | Sistema por desplazamiento de volumen |          |
|-------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
|                               | Cámara 2                           | Cámara 4 | Cámara 1                              | Cámara 3 |
| <b>Volumen de agua de (L)</b> | 1.85                               | 2.05     | 1.85                                  | 2.02     |
| <b>Peso (g)</b>               | 498.33                             | 303.16   | 498.33                                | 333.48   |
| <b>T inicial (°C)</b>         | 22                                 | 21       | 22                                    | 22       |
| <b>pH</b>                     | 7.77                               | 8.15     | 7.40                                  | 8.23     |
| <b>Eh (mV)</b>                | 323.00                             | 322.90   | 334.80                                | 310.50   |

Se mantuvo una temperatura ambiente en un rango de 23.5°C – 25.5°C para tener un mayor control de las condiciones experimentales.



**Ilustración 4-34. Sistema de cámaras simuladoras de reactores anaerobios para captación de gases**

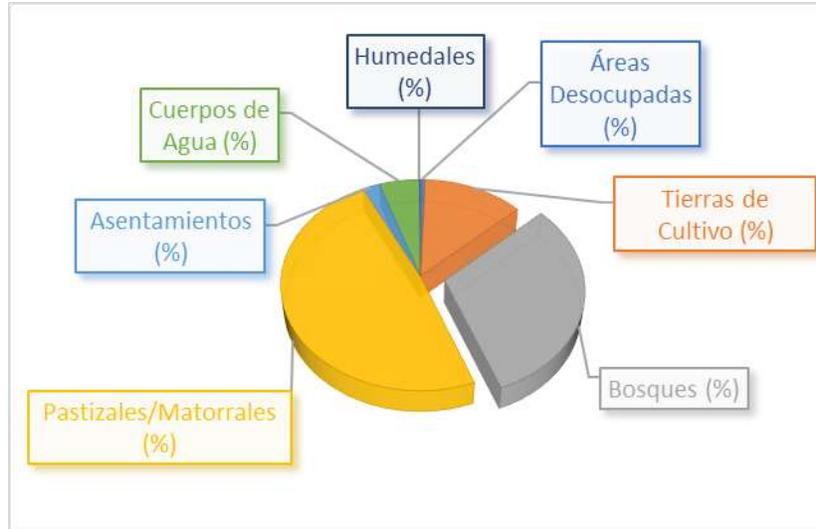
## 5 Resultados

Primeramente, con los porcentajes de cada uso de suelo, se calcula la media de todos los cuerpos de agua, con esto se obtiene el porcentaje de cobertura de total, la Tabla 5-1, muestra los porcentajes promedio correspondientes a cada tipo de suelo y la Ilustración 5-1, muestra de manera visual esta distribución.

**Tabla 5-1 Porcentaje de cobertura de suelo en los embalses de estudio**

| <i>Tipo de Suelo</i>             | <i>Porcentaje</i> |
|----------------------------------|-------------------|
| <i>Áreas Desocupadas (%)</i>     | 0.567648679       |
| <i>Tierras de Cultivo (%)</i>    | 12.57079526       |
| <i>Bosques (%)</i>               | 30.66869098       |
| <i>Pastizales/Matorrales (%)</i> | 48.12592913       |

|                     |             |
|---------------------|-------------|
| Asentamientos (%)   | 2.160383422 |
| Cuerpos de Agua (%) | 4.960297719 |
| Humedales (%)       | 0.136186563 |

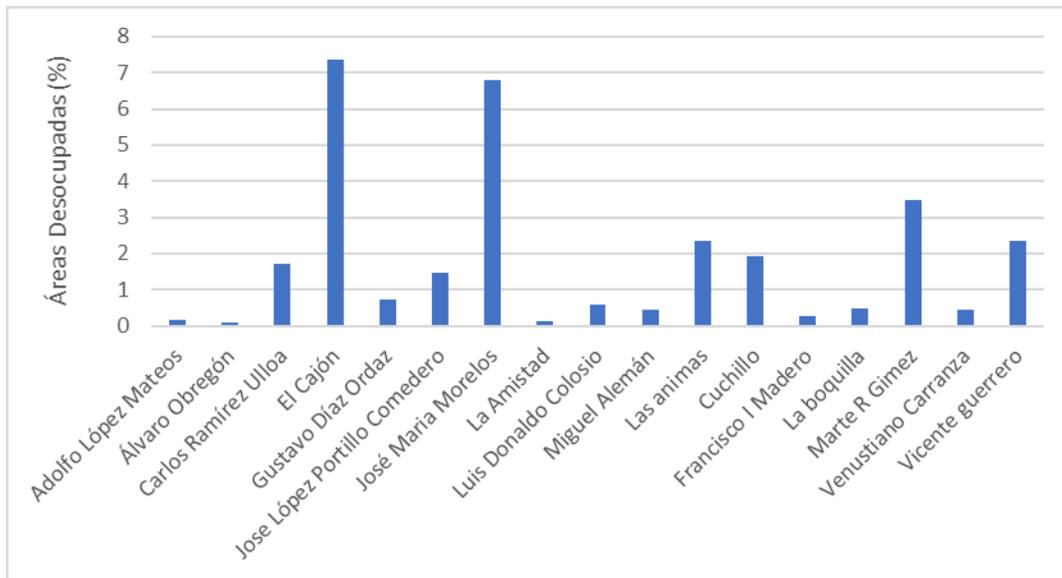


**Ilustración 5-1 Porcentaje promedio de uso de suelo**

Los resultados correspondientes al recubrimiento porcentual de los cuerpos de agua se presentan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con las tablas y gráficos correspondientes a cada caso, el porcentaje de cada embalse, esta referenciado al área de cuenca que le corresponde.

### 5.1 Uso de suelo resultados generales

La Ilustración 5-2, muestra el porcentaje de recubrimiento correspondiente a aquellas presas donde se presentan áreas desocupadas, en total son 17 cuerpos de agua con un rango de recubrimiento de 0.1052 a 7.3711 % y un promedio de 1.8107% de recubrimiento.



**Ilustración 5-2 Porcentajes de presas con usos de suelo de áreas desocupadas**

La Ilustración 5-3, muestra los porcentajes de cobertura correspondientes a áreas de cultivo (a) y bosques(b), para los diferentes embalses de estudio. Se El rango de cobertura de cultivo se encuentra entre 0.1137 y 82.3911 por ciento con un 14.7102 por ciento de promedio. Por su parte, el bosque tiene un rango de 0.1331 y 83.5892 por ciento de cobertura con un promedio de 33.0727 por ciento.

Por otro lado, la Ilustración 5-4 presenta los porcentajes correspondientes a los pastizales/matorrales (a) y cuerpos de agua (b), encontrándose el primero entre 0.3395 y 98.59 por ciento con un 50.9019 por ciento de promedio y el segundo entre un rango de 0.2118 y 26.9230 por ciento con un promedio de 5.0215 por ciento de cobertura.

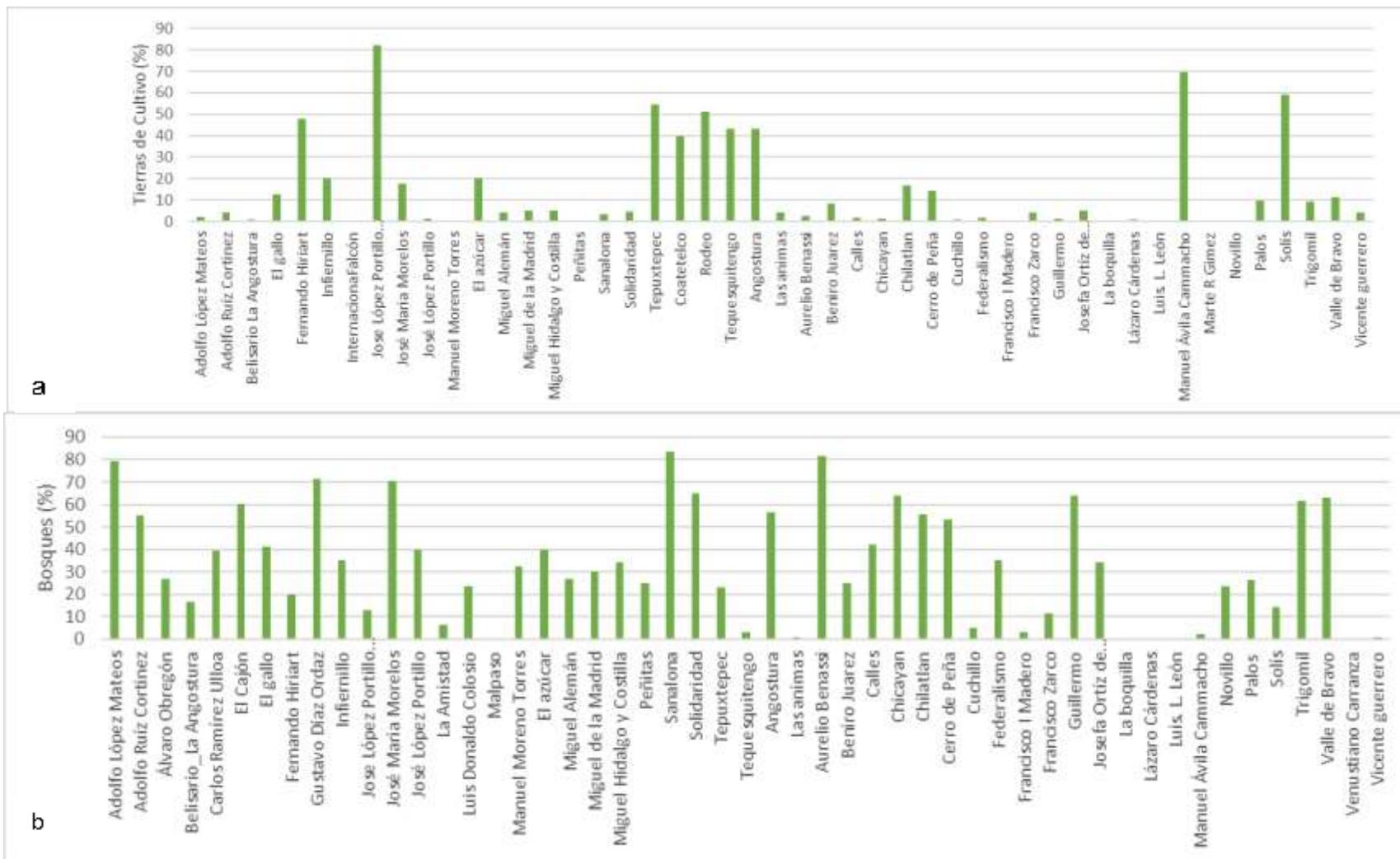
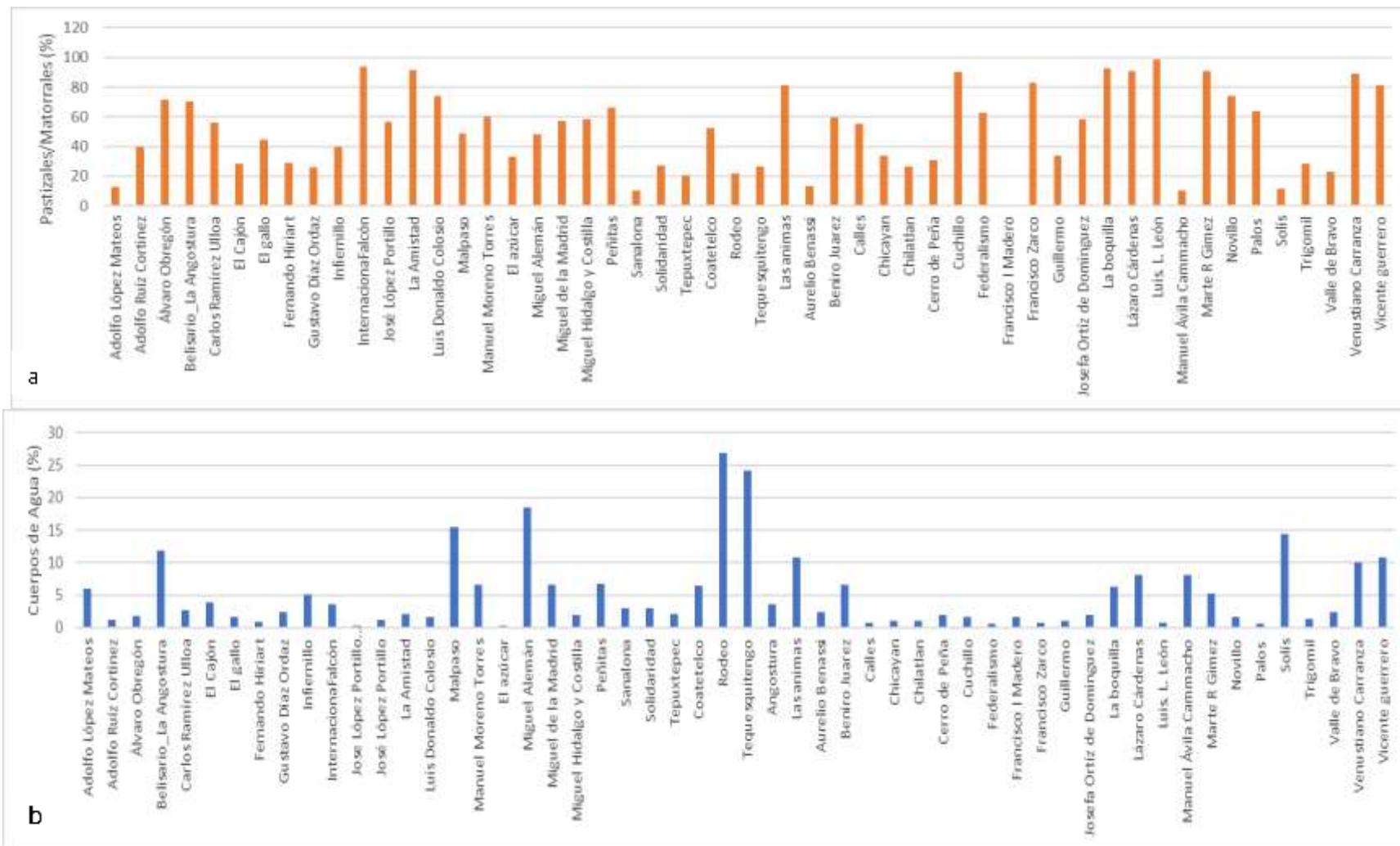
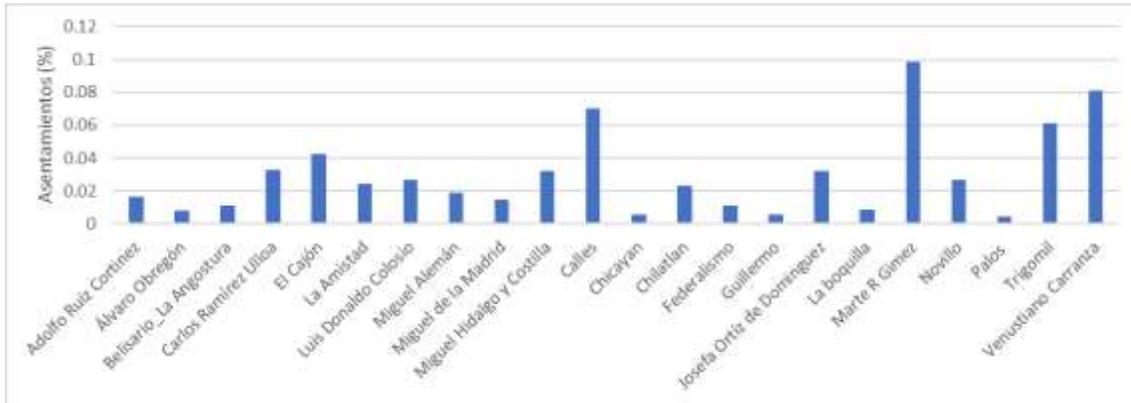


Ilustración 5-3 Porcentajes de cobertura de presas correspondientes a) Cultivo y b) Bosques.



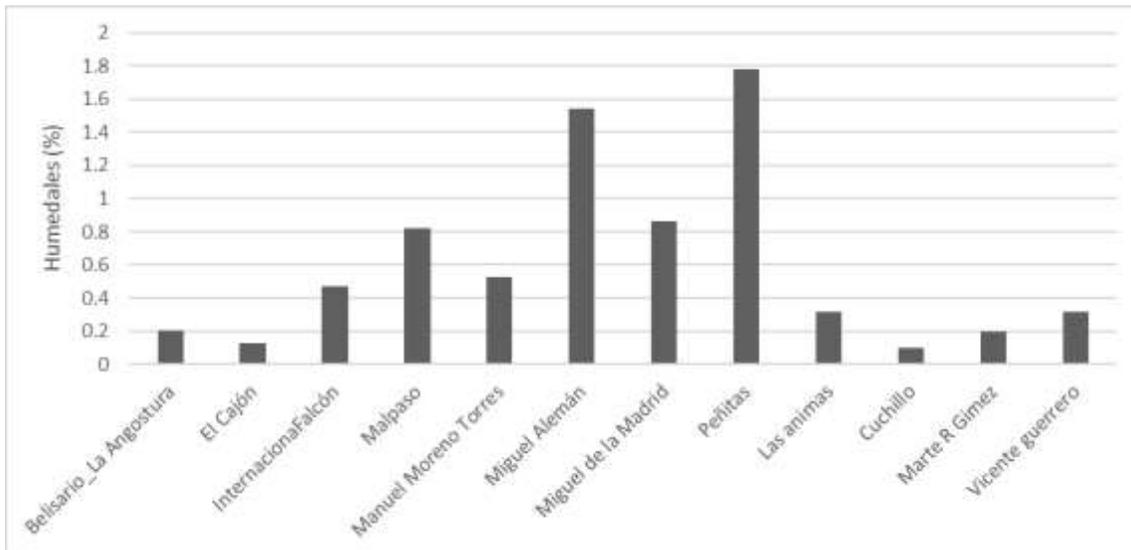
**Ilustración 5-4 Porcentajes de cobertura de presas correspondientes a) Pastizales/matorrales y b) Cuerpo de agua**

Otra de las coberturas con menor número de apariciones en los embalses es la correspondiente a los asentamientos (Ilustración 5-5), cuyo rango de aparición es de 0.218 a 26.9230 por ciento, con un promedio de 5.0521, lo anterior indica que los asentamientos urbanos son poco frecuentes a las cercanías de los embalses, sin embargo existen y es necesario conocer con mayor detalle sus ubicaciones con lo cual se puede tener una mejor idea de su interacción con los otros usos.



**Ilustración 5-5 Porcentajes de cobertura de presas correspondientes a asentamientos**

Finalmente, la Ilustración 5-6, muestra los porcentajes de cobertura por humedales, se puede observar que la presencia de esta cobertura es menos al dos por ciento en cualquiera de los cuerpos de agua.



**Ilustración 5-6 Porcentajes de cobertura de presas correspondientes a humedales**

## 5.2 Uso de los cuerpos de agua de Morelos

Para el caso de los cuerpos de agua del estado de Morelos los porcentajes de tipo de suelo finales se muestran en la Tabla 5-2. En los tres cuerpos de agua las tierras de cultivo son las que mayor porcentaje abarcan.

Tabla 5-2 Porcentaje de tipo de suelo.

| <i>Tipos de Suelo</i>            | <b>Tequesquitengo</b> | <b>Rodeo</b> | <b>Coatetelco</b> |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|
| <b>Áreas Desocupadas (%)</b>     | 0.00                  | 0.00         | 0.00              |
| <b>Asentamientos (%)</b>         | 2.42                  | 0.00         | 1.53              |
| <b>Bosques (%)</b>               | 3.33                  | 0.00         | 0.00              |
| <b>Cuerpos de Agua (%)</b>       | 24.24                 | 26.92        | 6.39              |
| <b>Humedales (%)</b>             | 0.00                  | 0.00         | 0.00              |
| <b>Pastizales/Matorrales (%)</b> | 26.67                 | 21.79        | 52.43             |
| <b>Tierras de Cultivo (%)</b>    | 43.33                 | 51.28        | 39.64             |

Lo anterior puede observarse en la Ilustración 5-7, donde el color amarillo corresponde a las tierras de cultivo, el verde pastizales/matorrales, el azul a cuerpos de agua y el magenta a asentamientos urbanos.

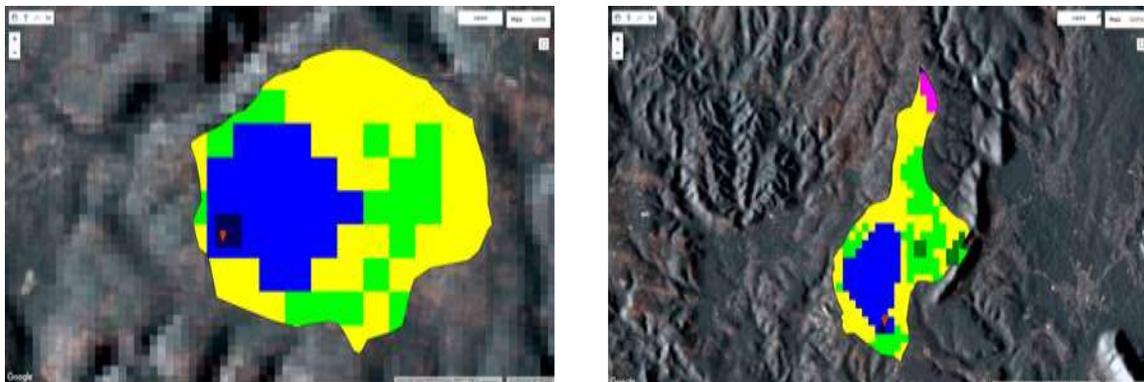


Ilustración 5-7 Porcentaje de recubrimiento por tipo de suelo



| <b>TIPO DE SUELO</b>                    | <b>Áreas<br/>Desocupadas</b> | <b>Tierras de<br/>Cultivo</b> | <b>Bosques</b> | <b>Pastizales<br/>Matorrales</b> | <b>Asentamientos</b> | <b>Cuerpos de<br/>Agua</b> | <b>Humedales</b> |
|---|------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------|
| <b>Adolfo López<br/>Mateos</b>          | 0.17                         | 2.19                          | 79.12          | 12.53                            | 0.00                 | 5.96                       | 0.03             |
| <b>Adolfo Ruíz<br/>Cortines</b>         | 0.00                         | 4.12                          | 55.16          | 39.46                            | 0.02                 | 1.23                       | 0.00             |
| <b>Álvaro Obregón</b>                   | 0.11                         | 0.00                          | 26.67          | 71.42                            | 0.01                 | 1.79                       | 0.00             |
| <b>Belisario La<br/>Angostura</b>       | 0.00                         | 0.65                          | 16.87          | 70.40                            | 0.01                 | 11.86                      | 0.20             |
| <b>Carlos Ramírez<br/>Ulloa</b>         | 1.71                         | 0.00                          | 39.49          | 56.11                            | 0.03                 | 2.66                       | 0.00             |
| <b>El Cajón</b>                         | 7.37                         | 0.00                          | 60.22          | 28.39                            | 0.04                 | 3.85                       | 0.13             |
| <b>El gallo</b>                         | 0.01                         | 12.54                         | 41.28          | 44.26                            | 0.24                 | 1.68                       |                  |
| <b>Fernando Hiriart</b>                 | 0.03                         | 47.69                         | 19.82          | 29.14                            | 2.40                 | 0.90                       | 0.02             |
| <b>Gustavo Díaz<br/>Ordaz</b>           | 0.72                         | 0.00                          | 71.19          | 25.69                            | 0.00                 | 2.40                       | 0.00             |
| <b>Infiernillo</b>                      | 0.06                         | 19.98                         | 35.13          | 39.64                            | 0.15                 | 5.04                       | 0.00             |
| <b>Internacional<br/>Falcón</b>         | 0.01                         | 0.50                          | 0.04           | 94.10                            | 1.34                 | 3.54                       | 0.47             |
| <b>José López Portillo<br/>Comedero</b> | 1.46                         | 82.39                         | 13.00          | 0.01                             | 2.85                 | 0.29                       | 0.00             |
| <b>José María<br/>Morelos</b>           | 6.80                         | 17.52                         | 70.53          | 0.00                             | 5.15                 | 0.00                       | 0.00             |
| <b>José López Portillo</b>              | 0.10                         | 1.33                          | 39.89          | 56.83                            | 0.57                 | 1.23                       | 0.06             |
| <b>La Amistad</b>                       | 0.11                         | 0.01                          | 6.29           | 91.49                            | 0.02                 | 2.05                       | 0.02             |
| <b>Luis Donaldo<br/>Colosio</b>         | 0.57                         | 0.00                          | 23.55          | 74.21                            | 0.03                 | 1.64                       | 0.00             |
| <b>Malpaso</b>                          | 0.00                         | 0.00                          | 0.22           | 48.74                            | 34.82                | 15.39                      | 0.82             |
| <b>Manuel Moreno<br/>Torres</b>         | 0.01                         | 0.11                          | 32.51          | 59.96                            | 0.35                 | 6.52                       | 0.52             |
| <b>El azúcar</b>                        | 0.00                         | 20.23                         | 39.81          | 33.07                            | 6.67                 | 0.21                       | 0.00             |
| <b>Miguel Alemán</b>                    | 0.43                         | 4.12                          | 27.09          | 48.31                            | 0.02                 | 18.48                      | 1.54             |
| <b>Miguel de la<br/>Madrid</b>          | 0.02                         | 5.03                          | 30.05          | 57.43                            | 0.01                 | 6.59                       | 0.87             |
| <b>Miguel Hidalgo y<br/>Costilla</b>    | 0.00                         | 5.16                          | 34.20          | 58.65                            | 0.03                 | 1.96                       | 0.00             |
| <b>Peñitas</b>                          | 0.04                         | 0.42                          | 24.92          | 66.13                            | 0.00                 | 6.70                       | 1.78             |
| <b>Sanalona</b>                         | 0.01                         | 3.32                          | 83.59          | 10.04                            | 0.00                 | 3.04                       | 0.00             |
| <b>Solidaridad</b>                      | 0.01                         | 4.50                          | 64.79          | 27.36                            | 0.12                 | 2.97                       | 0.00             |
| <b>Tepuxtepec</b>                       | 0.00                         | 54.35                         | 22.99          | 20.22                            | 0.31                 | 2.14                       | 0.00             |
| <b>Coatetelco</b>                       | 0                            | 39.64                         | 0              | 52.42                            | 1.53                 | 6.39                       | 0                |
| <b>Rodeo</b>                            | 0                            | 51.28                         | 0              | 21.79                            | 0                    | 26.92                      | 0                |
| <b>Tequesquitengo</b>                   | 0                            | 43.33                         | 3.33           | 26.66                            | 2.42                 | 24.24                      | 0                |

| <b>TIPO DE SUELO</b>                 | <b>Áreas<br/>Desocupadas</b> | <b>Tierras de<br/>Cultivo</b> | <b>Bosques</b> | <b>Pastizales<br/>Matorrales</b> | <b>Asentamientos</b> | <b>Cuerpos<br/>de Agua</b> | <b>Humedales</b> |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------|
| <i>Angostura</i>                     | 0.044                        | 43.13                         | 56.58          | 0.01                             | 0.22                 | 3.51                       | 0                |
| <i>Las animas</i>                    | 2.35                         | 4.08                          | 0.81           | 80.97                            | 0.62                 | 10.84                      | 0.31             |
| <i>Aurelio Benassi</i>               | 0                            | 2.59                          | 81.6           | 13.34                            | 0                    | 2.44                       | 0                |
| <i>Benito Juárez</i>                 | 0                            | 8.571                         | 24.92          | 59.71                            | 0.25                 | 6.53                       | 0                |
| <i>Calles</i>                        | 0                            | 1.699                         | 42.21          | 55.25                            | 0.07                 | 0.772                      | 0                |
| <i>Chicayón</i>                      | 0                            | 1.30                          | 63.93          | 33.79                            | 0.01                 | 0.95                       | 0                |
| <i>Chilatlán</i>                     | 0                            | 16.58                         | 55.73          | 26.60                            | 0.02                 | 1.04                       | 0                |
| <i>Cerro de Peña</i>                 | 0                            | 14.08                         | 53.41          | 30.57                            | 0                    | 1.93                       | 0                |
| <i>Cuchillo</i>                      | 1.93                         | 0.80                          | 5.01           | 90.02                            | 0.50                 | 1.61                       | 0.10             |
| <i>Federalismo</i>                   | 0                            | 1.85                          | 35.237         | 62.32                            | 0.01                 | 0.57                       | 0                |
| <i>Francisco I. Madero</i>           | 0.25                         | 0.35                          | 3.22           | 0.33                             | 46.37                | 1.63                       | 0                |
| <i>Francisco Zarco</i>               | 0.09                         | 4.16                          | 11.63          | 83.303                           | 0                    | 0.79                       | 0                |
| <i>Guillermo</i>                     | 0                            | 1.30                          | 63.93          | 33.79                            | 0.01                 | 0.95                       | 0                |
| <i>Josefa Ortiz de<br/>Domínguez</i> | 0                            | 5.15                          | 34.20          | 58.64                            | 0.03                 | 1.96                       | 0                |
| <i>La boquilla</i>                   | 0.49                         | 0.38                          | 0.13           | 92.74                            | 0.01                 | 6.22                       | 0.02             |
| <i>Lázaro Cárdenas</i>               | 0                            | 0.80                          | 0.16           | 90.89                            | 0                    | 8.13                       | 0                |
| <i>Luis. L. León</i>                 | 0                            | 0.21                          | 0.40           | 98.59                            | 0                    | 0.78                       | 0                |
| <i>Manuel Ávila<br/>Camacho</i>      | 0                            | 69.80                         | 2.13           | 10.07                            | 9.95                 | 8.03                       | 0                |
| <i>Marte R Gínez</i>                 | 3.49                         | 0.41                          | 0.02           | 90.60                            | 0.09                 | 5.17                       | 0.19             |
| <i>Novillo</i>                       | 0                            | 0.56                          | 23.55          | 74.20                            | 0.02                 | 1.64                       | 0                |
| <i>Palos</i>                         | 0                            | 9.42                          | 26.39          | 63.59                            | 0.01                 | 0.55                       | 0.03             |
| <i>Solís</i>                         | 0                            | 58.99                         | 14.33          | 11.76                            | 0.47                 | 14.43                      | 0                |
| <i>Trigomil</i>                      | 0                            | 9.10                          | 61.52          | 28.04                            | 0.06                 | 1.27                       | 0                |
| <i>Valle de Bravo</i>                | 0                            | 11.49                         | 62.83          | 23.12                            | 0.20                 | 2.34                       | 0                |
| <i>Venustiano<br/>Carranza</i>       | 0.45                         | 0                             | 0.20           | 89.10                            | 0.08                 | 10.10                      | 0.04             |
| <i>Vicente guerrero</i>              | 2.35                         | 4.08                          | 0.81           | 80.97                            | 0.62                 | 10.84                      | 0.31             |

Para entender los resultados obtenido de ambos modelos, primeramente, se presenta la clasificación de los cuerpos de agua de acuerdo con el clima en el cual se ubican. Posteriormente utilizando el modelo de G-res tool y considerando el clima como principal clasificación, se analizan las emisiones de los cuerpos de agua, de acuerdo con los usos de las presas. Como tercera etapa se analizarán las huellas de gases de acuerdo con el clima desde el punto de vista del momento de inundación, en esta parte se obtendrá la huella total generada en un año, y la tasa de generación por día. Seguidamente, se revisarán el porcentaje de participación de los procesos presentes en los cuerpos de agua para la liberación de metano (desgasificación, burbujeo y difusión). Finalmente se revisarán la

huella aérea emitida por año por unidad de superficie, la huella emitida por el embalse y la huella total emitida durante el tiempo de uso del embalse.

Posteriormente, con el modelo GRAT, se revisa primeramente para el CO<sub>2</sub>, el flujo presente a la fecha de revisión y el promedio de emisión en 100 años. De forma paralela, se obtiene el flujo difuso de CH<sub>4</sub> a la fecha de revisión y el promedio de emisión en 100 años.

Una vez obtenidos los resultados de ambos modelos, se comparan las emisiones posteriores al embalsamiento y el acumulado anual a la fecha de revisión.

### 5.3 Climas predominantes de los embalses

De acuerdo con la información de la base de datos, los embalses se encuentran distribuidos en tres climas, subtropical, templado y tropical, presentándose el 44% de estos en el clima tropical, 20% en el clima templado y el restante en el clima subtropical (Ilustración 5-8).

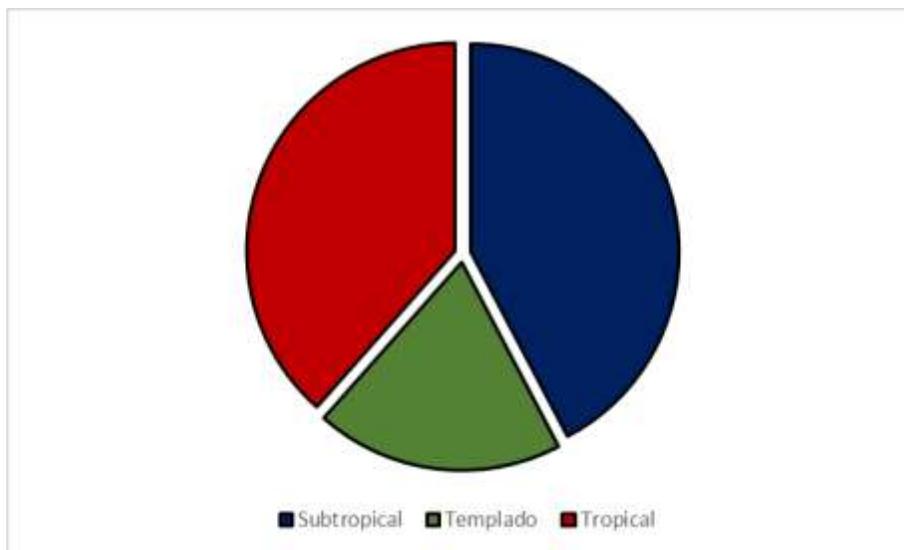


Ilustración 5-8 Distribución de los embalses de acuerdo con el clima

### 5.4 Muestreo de los embalses de Morelos

Para cada uno de los cuerpos de agua del estado de Morelos (Tequesquitengo, Coatetelco y El rodeo), se realizaron mediciones con sonda multiparamétrica y disco de secci en cada punto de muestreo, con la cual se obtuvieron los parámetros de profundidad, transparencia de secci, pH, Oxígeno disuelto, conductividad, sólidos totales disueltos, salinidad, temperatura, presión y posición por lo menos a dos alturas representativas (superficial y fondo), así mismo, se realizaron las mediciones de metano en la atmósfera controlada de las cámaras de muestreo con un equipo:

La Ilustración 5-9, muestra imágenes del muestreo en los diferentes puntos en el lago Tequesquitengo.



**Ilustración 5-9 Muestreo en el lago Tequesquitengo**

Los resultados obtenidos en la composición representan un porcentaje de las emisiones generadas en la mezcla de gases, se observa que no se tiene una contaminación significativa por lo que se atribuye que los bajos niveles de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  son resultado de la actividad microbiana presente en el sistema. Se puede observar con claridad que el agua y sedimento de la Laguna el Rodeo presenta una mayor producción de gases e incluso una producción de  $\text{CH}_4$  del doble de la registrada en la Laguna de Coatetelco.

Se hace indispensable un estudio sobre las emisiones de  $\text{CH}_4$  debido a la ya anteriormente mencionada contaminación por gases de efecto invernadero, la mayoría del material orgánico se convierte en biogás, utilizando las técnicas adecuadas puede ser combustionado con el fin de obtener energía.

### **5.5 Batimetría de la zona de estudio**

Con las mediciones de batimetría realizadas en la laguna del Rodeo y Coatetelco se describen las principales características batimétricas de las lagunas. En el caso de la laguna de El Rodeo el muestreo de los datos fue bastante extenso y por lo tanto representan adecuadamente las características batimétricas de la laguna. En el caso de la laguna de Coatetelco los transectos que se llevaron a cabo cubrieron principalmente la parte de la orilla por lo tanto existe una incertidumbre en los datos del centro de la laguna ya que estos son interpolados con base a los datos de los transectos.

### **5.6 Sistema de cámaras simuladoras**

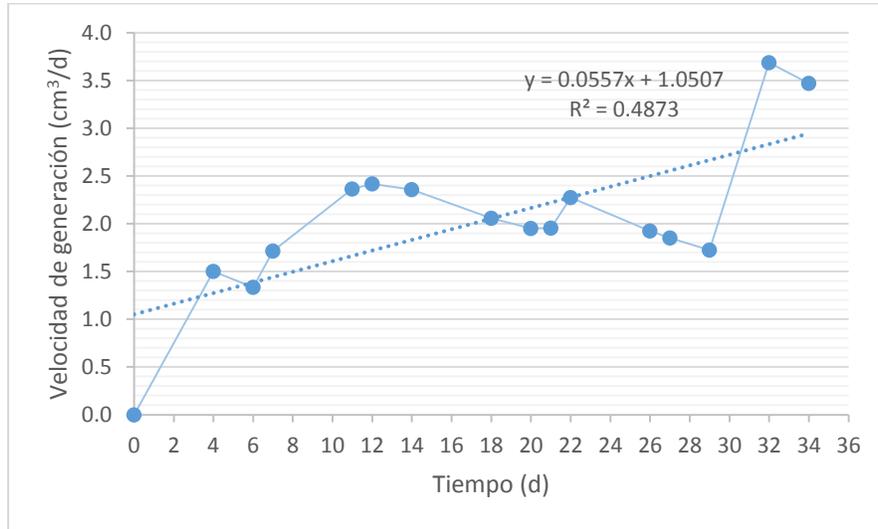
Los resultados obtenidos durante los 34 días de experimentación para cada cámara se presentan a continuación. Debido a que las Tedlar bag <sup>®</sup> no mostraron resultado alguno, o

algún tipo de gas formado en su interior, de estas no se cuenta con deducciones aparentes. Las cámaras en las que se implementó el sistema de captación por desplazamiento de volumen mostraron un avance significativo en el transcurso de los días como se muestra en la Ilustración 5-10.

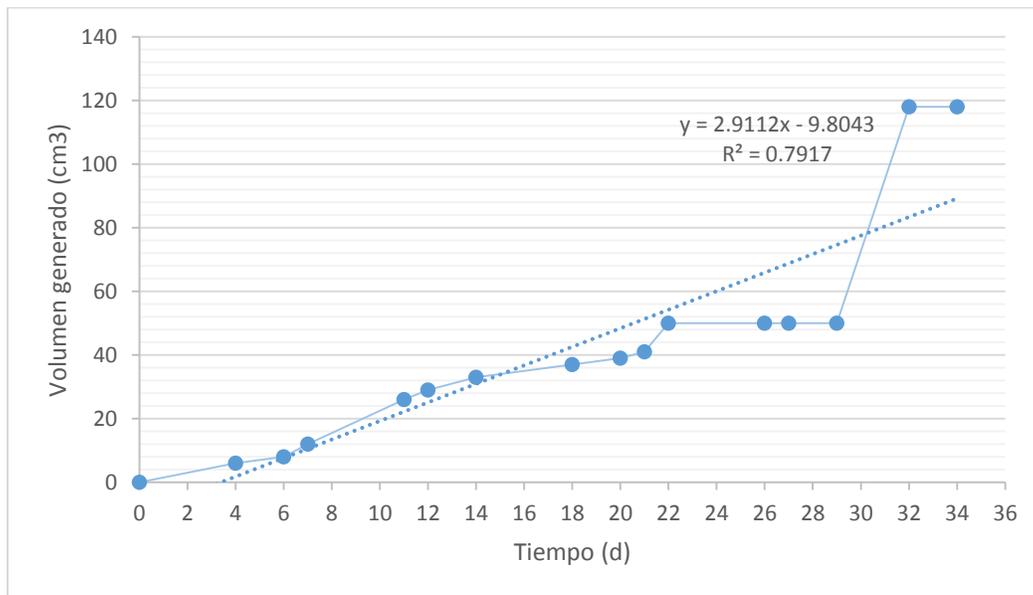


**Ilustración 5-10 Cilindro contenedor de gases de la cámara 3**

La generación de gases en la cámara 3 tuvo un constante avance en su velocidad de generación, como se muestra en la Ilustración 5-11, además de una producción de volumen de aproximadamente  $4 \text{ cm}^3$  por día.

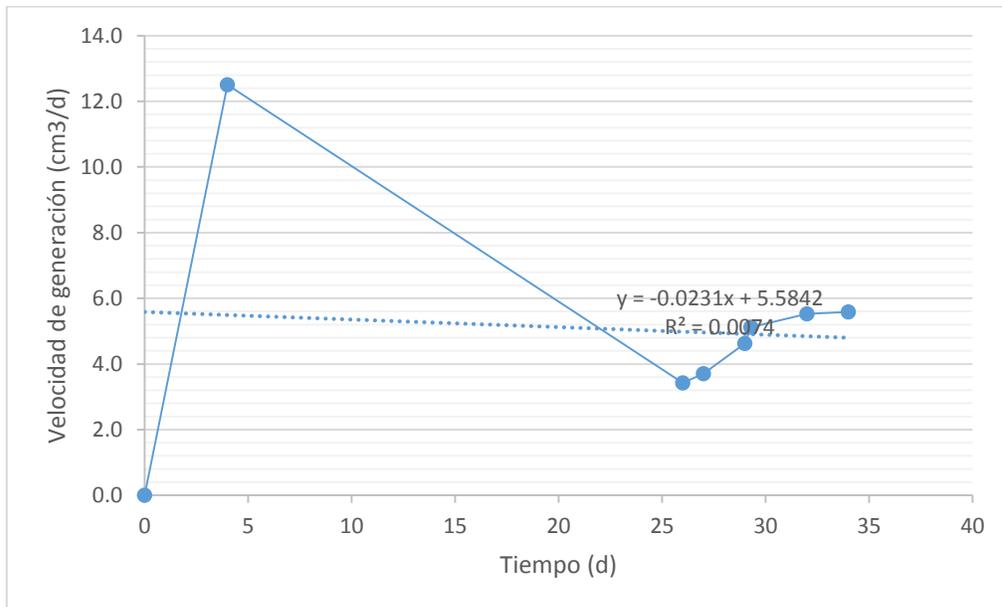


**Ilustración 5-11 Producción de gas en la cámara 3**

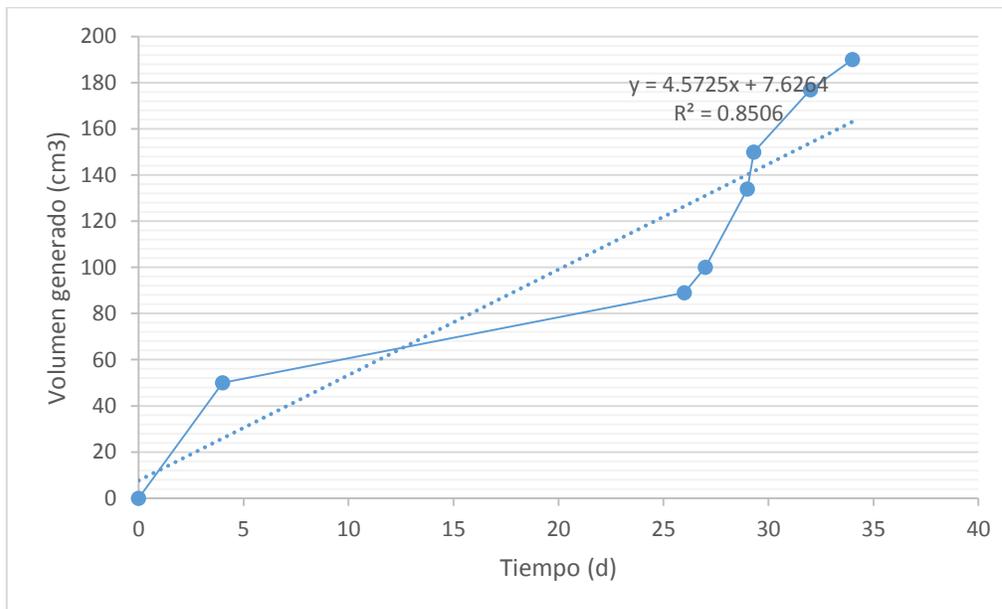


**Ilustración 5-12 Volumen generado en la cámara 3**

En la cámara 1 los resultados se muestran más inestables, al igual que el contenido de esta. Se obtiene una velocidad y volumen de generación muy variable como se muestra en las Ilustración 5-13 y la Ilustración 5-14.



**Ilustración 5-13 Producción de gas en la cámara 1**



**Ilustración 5-14 Volumen de gases generados en la cámara 1**

Para evaluar estas emisiones se utilizó cromatografía de gases, se cuantificó la concentración de los gases formados hasta el momento en ambas cámaras con el cromatógrafo de gases presente en el laboratorio de la PTAR del IMTA con número de

inventario 32048, se tomó una muestra del gas generado en la columna con una jeringa de 2ml y fue transportada hasta el sitio de análisis.



**Ilustración 5-15 Procedimiento de cuantificación por cromatografía**

Los análisis de composición realizados mostraron los resultados que se indican en la *Tabla 5-3*.

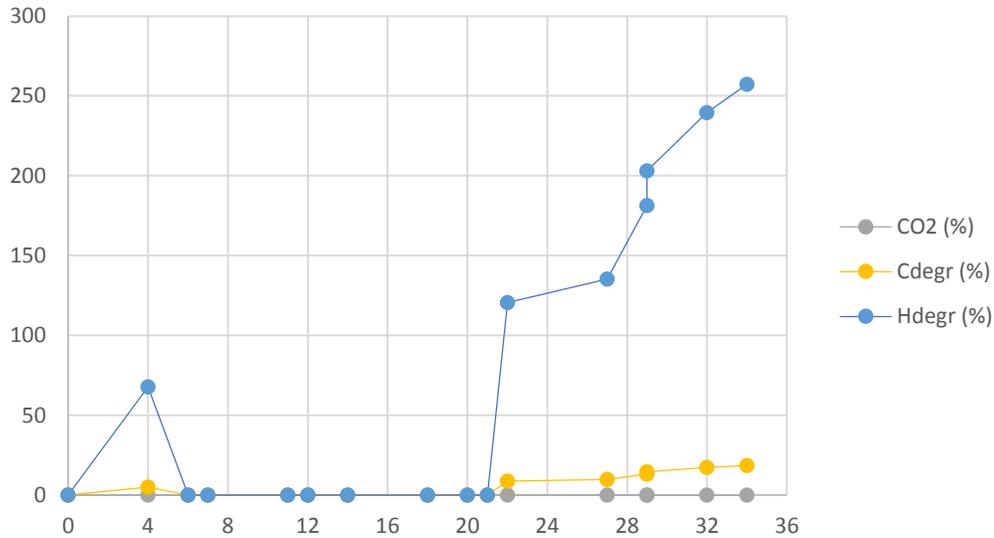
**Tabla 5-4 Concentración de cada compuesto en la mezcla de gases generados**

| Laguna            | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| <b>EL Rodeo</b>   | 93%            | 7%              | 0%              |
| <b>Coatetelco</b> | 96%            | 3%              | 1%              |

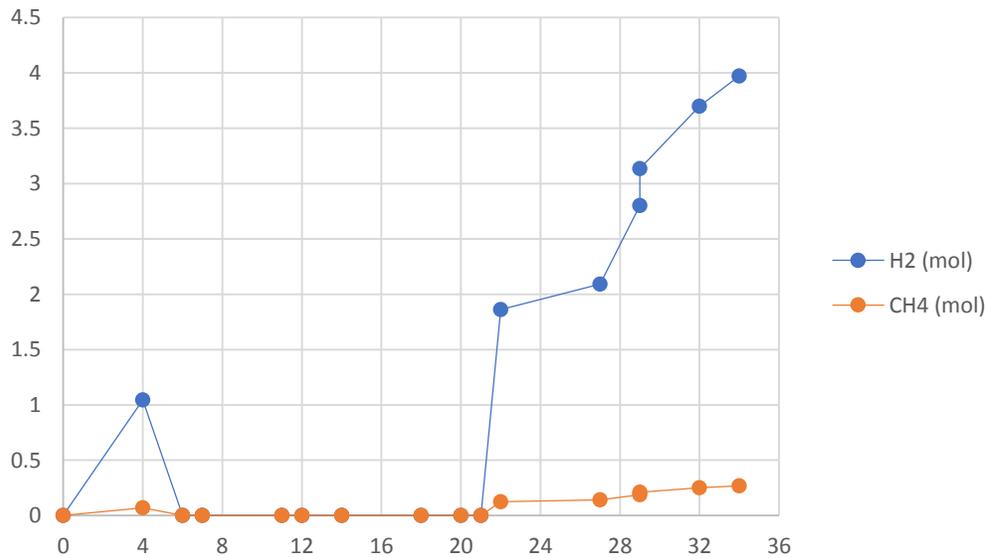
**Tabla 5-5. Volumen generado en 34 días de experimentación.**

| Laguna | H <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> ) | CH <sub>4</sub> (cm <sup>3</sup> ) | CO <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|        |                                   |                                    |                                    |

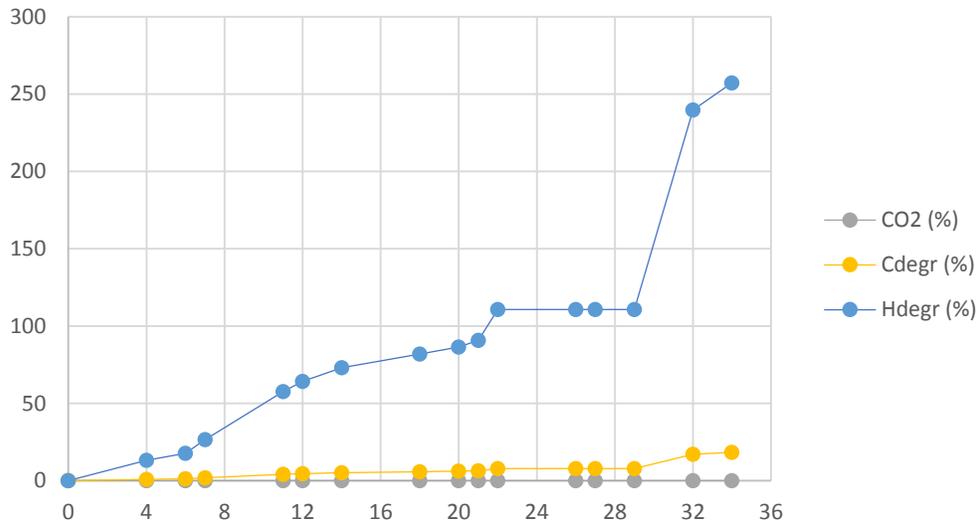
|                   |     |      |      |
|-------------------|-----|------|------|
| <b>EL Rodeo</b>   | 177 | 11   | 0    |
| <b>Coatetelco</b> | 113 | 3.54 | 1.18 |



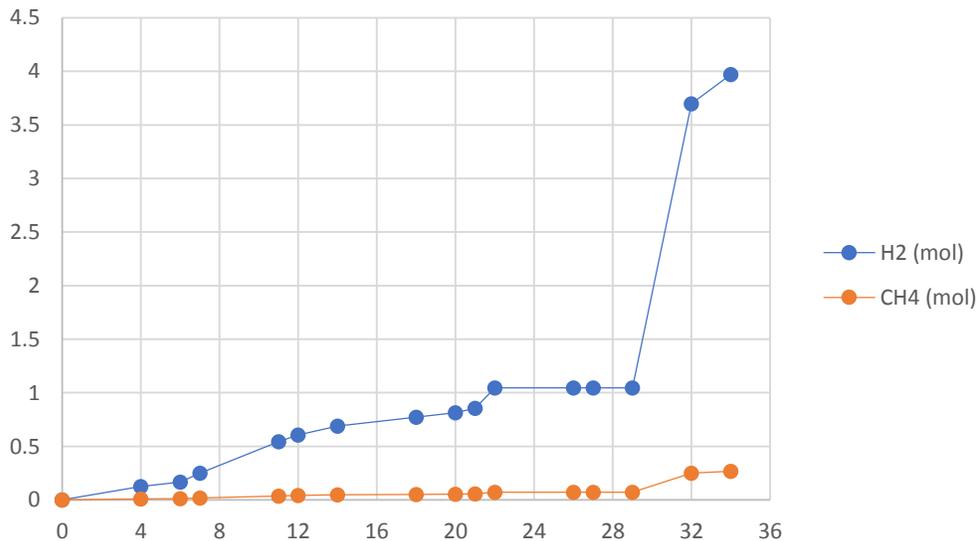
**Ilustración 5-16 Degradación de carbono e hidrógeno en la laguna el Rodeo**



**Ilustración 5-17 Concentración de los gases generados de la laguna el Rodeo**



**Ilustración 5-18 Degradación de Carbono e Hidrógeno de la laguna de Coatetelco**



**Ilustración 5-19 Concentración de los gases generados de la laguna de Coatetelco.**

De la Ilustración 5-15 a la Ilustración 5-19 se puede observar como la generación de H<sub>2</sub> es aproximadamente un 300% de su valor inicial, mientras que el CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> presentan valores de degradación correspondientes a su composición.

Los resultados obtenidos en la composición representan un porcentaje de las emisiones generadas en la mezcla de gases, se observa que no se tiene una contaminación significativa por lo que se atribuye que los bajos niveles de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> son resultado de la actividad

microbiana presente en el sistema. Se puede observar con claridad que el agua y sedimento de la Laguna el Rodeo presenta una mayor producción de gases e incluso una producción de CH<sub>4</sub> del doble de la registrada en la Laguna de Coatetelco.

Se hace indispensable un estudio sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> debido a la ya anteriormente mencionada contaminación por gases de efecto invernadero, la mayoría del material orgánico se convierte en biogás, utilizando las técnicas adecuadas puede ser combustionado con el fin de obtener energía.

## 5.7 Emisión debido al tipo de uso del embalse

Cada uno de los embalses estudiados tiene por lo menos un uso específico, esta información puede consultarse en seguridad de presas de la CONAGUA. Entre los usos considerados para este análisis se encuentran: Control de inundaciones, pesca, riego, navegación, caudal ambiental, recreación, agua potable e hidroeléctricas. De acuerdo con la cantidad y jerarquía de la actividad realizada en el embalse es la emisión generada.

### 5.7.1 Uso contra inundaciones

Únicamente tres de las presas presentan el uso de control de inundaciones, dos en el clima tropical y el restante en el subtropical, aquellos ubicados en el clima tropical emiten una huella de 500 y 2500 tCO<sub>2</sub>/año, mientras que la presa ubicada en el clima subtropical sirve como sumidero de emisiones de carbono, teniendo una tasa 1556 tCO<sub>2</sub>/año en absorción.

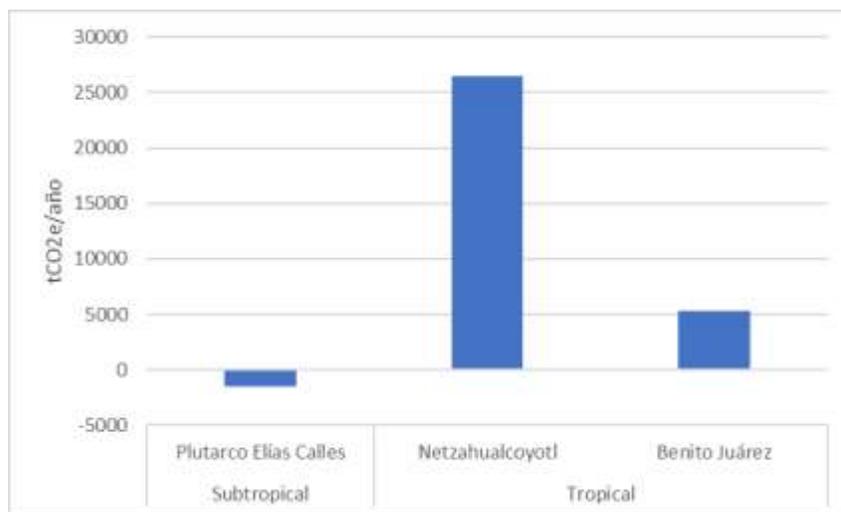


Ilustración 5-20 Huella de carbono por uso control de inundaciones

### 5.7.2 Uso de pesca

Siete de las presas de estudio presentan esta actividad, debido a esto, los cuerpos sirven como sumideros para la huella de carbono, presentando la mayor absorción en los climas subtropicales. La presa Miguel de la Madrid, es la única en este rubro que presenta emisiones de GEI, sin embargo, esta es de 20 tCO<sub>2</sub>e/año.

La presencia de peces en el embalse, en este caso se considera como un factor que favorece a la reducción de la huella de carbono (Tabla 5-6), convirtiendo el cuerpo en un sumidero de GEI.

**Tabla 5-6 Huella de carbono por uso de pesca**

| Presa por Clima           | tCO <sub>2</sub> e/año |
|---------------------------|------------------------|
| <b>Subtropical</b>        | <b>-129945580</b>      |
| Francisco Zarco           | -121                   |
| Josefa Ortiz de Domínguez | -136                   |
| Luis L. León              | -129944934             |
| Plutarco Elías Calles     | -389                   |
| <b>Templado</b>           | <b>-4156</b>           |
| Adolfo López Mateos       | -62                    |
| Gustavo Díaz Ordaz        | -4094                  |
| <b>Tropical</b>           | <b>-149</b>            |
| Miguel de la Madrid       | 20                     |
| Ramiro Caballero          | -169                   |

### 5.7.3 Uso para Riego

Gran parte de los cuerpos de agua en estudio son utilizados para el riego (Tabla 5-8), en cuanto a la emisión de huella de carbono, es importante mencionar que, de la totalidad de presas en este rubro, el 34%, 16% y 3% de estas son sumideros de GEI en las zonas subtropical, templado y tropical respectivamente. El porcentaje restante corresponde a los cuerpos que emiten GEI, situándose el clima tropical con el mayor porcentaje incluido.

La Tabla 5-7, muestra el valor acumulado de huella de carbono presente por riego, los climas subtropical y templado, trabajan como sumideros de la huella de carbono, mientras que, en el clima tropical existe la emisión de gases.

**Tabla 5-7 Huella de carbono total por clima**

| <i>Clima</i>       | <i>Huella de carbono<br/>tCO<sub>2</sub>e/año</i> |
|--------------------|---|
| <i>Subtropical</i> | <b>-693059665</b>                                 |
| <i>Templado</i>    | -67414  |
| <i>Tropical</i>    | 33211   |

**Tabla 5-8 Huella de carbono por uso de riego**

| <i>Presa por Clima</i>               | <i>Riego</i>      |
|--------------------------------------|-------------------|
| <b>Subtropical</b>                   | <b>-693059665</b> |
| <i>Cuchillo-Solidaridad</i>          | 860               |
| <i>Luis L. León</i>                  | -693039650        |
| <i>Internacional La Amistad</i>      | -2                |
| <i>Internacional Falcón</i>          | -3466             |
| <i>Luis Donaldo Colosio</i>          | -1563             |
| <i>Lázaro Cárdenas</i>               | -7                |
| <i>Miguel Hidalgo y Costilla</i>     | -2567             |
| <i>José López Portillo</i>           | 2432              |
| <i>La Boquilla</i>                   | -329              |
| <i>Adolfo Ruiz Cortines</i>          | -688              |
| <i>Venustiano Carranza</i>           | -3219             |
| <i>Lázaro Cárdenas</i>               | -7                |
| <i>Josefa Ortiz de Domínguez</i>     | -1448             |
| <i>Francisco I. Madero</i>           | -9708             |
| <i>Francisco Zarco</i>               | -483              |
| <i>Plutarco Elías Calles</i>         | 80                |
| <i>Federalismo Mexicano</i>          | 100               |
| <b>Templado</b>                      | <b>-67414</b>     |
| <i>Adolfo López Mateos</i>           | -988              |
| <i>Chicayón</i>                      | 100               |
| <i>Solís</i>                         | 378               |
| <i>Tepuxtepec</i>                    | 80                |
| <i>José López Portillo</i>           | -571              |
| <i>Gustavo Díaz Ordaz</i>            | -65506            |
| <i>Marte R. Ginez</i>                | -352              |
| <i>Guillermo Blake Aguilar</i>       | -353              |
| <i>Manuel Ávila Camacho</i>          | -202              |
| <b>Tropical</b>                      | <b>33211</b>      |
| <i>Sanalona</i>                      | 969               |
| <i>Solidaridad</i>                   | 1037              |
| <i>Miguel Alemán</i>                 | 9767              |
| <i>Vicente Guerrero</i>              | 69                |
| <i>Benito Juárez</i>                 | 1322              |
| <i>Aurelio Benassini Viscaño</i>     | 13112             |
| <i>Constitución de Apatzingán</i>    | 1039              |
| <i>José María Morelos</i>            | 1178              |
| <i>Cajón de Peña</i>                 | 7251              |
| <i>Ramiro Caballero</i>              | -2707             |
| <i>El Gallo</i>                      | 94                |
| <i>General Ramón Corona Madrigal</i> | 80                |

### 5.7.4 Uso de Navegación

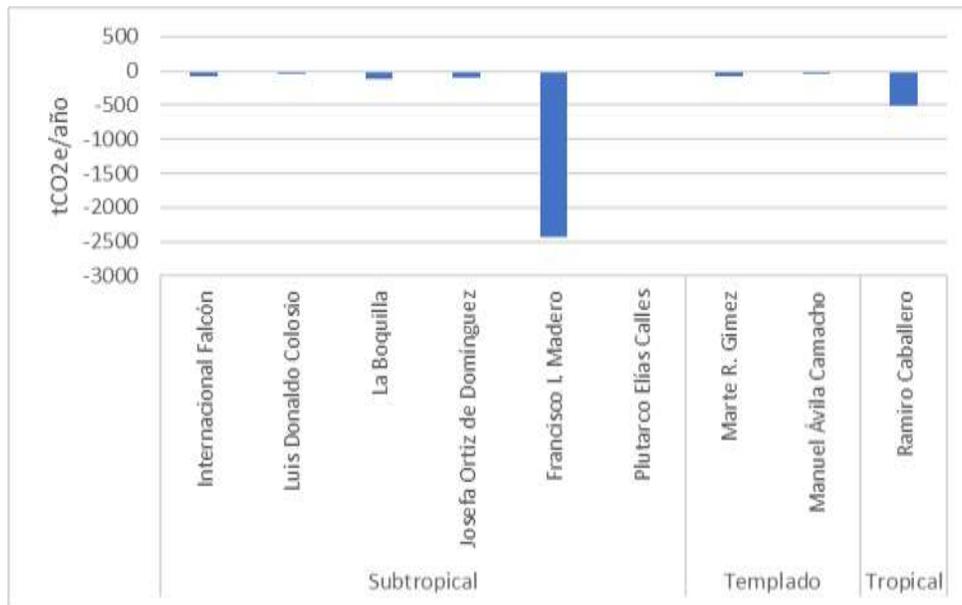
Los embalses que tienen uso de navegación se ubican únicamente en la zona subtropical, siendo el embalse de Luis L. León, el de mayor impacto en la huella de carbono, los cuatro cuerpos permiten la captura de gases debido a que estos funcionan como sumideros de carbono (Tabla 5-9).

**Tabla 5-9 Huella de carbono por uso de navegación**

| <i>Etiquetas de fila</i>         | <b>Navegación</b><br>tCO <sub>2</sub> e/año |
|----------------------------------|---|
| <b>Subtropical</b>               | <b>-43315237</b>                            |
| <i>Internacional Falcón</i>      | -74   |
| <i>Josefa Ortiz de Domínguez</i> | -136  |
| <i>Luis L. León</i>              | -43314978                                   |
| <i>Luis Donaldo Colosio</i>      | -49   |

### 5.7.5 Uso de Recreación

Los usos recreativos en las presas se han convertido en una actividad bastante común permitiendo que el cuerpo de agua funcione como un sumidero para los gases de efecto invernadero y con ello reduce la presencia de estos. La presa Francisco I. Madero, es la que mayor absorción de gases tiene, al consumir un total de casi 2500 tCO<sub>2</sub>e/año, (Ilustración 5-21).



**Ilustración 5-21 Huella de carbono por uso de recreación**

### 5.7.6 Uso de abastecimiento de agua

El abastecimiento de agua permite la liberación constante de gases debido a los cambios en las presiones abruptos de la columna da agua. Estos cambios permiten la liberación del CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, así como la liberación por burbujas y desgasificación. Los cuerpos con principal emisión son Cuchillo Solidaridad, José López portillo y Cajón de Peña (Ilustración 5-22), resultando el clima tropical el de mayor emisión de GEI.

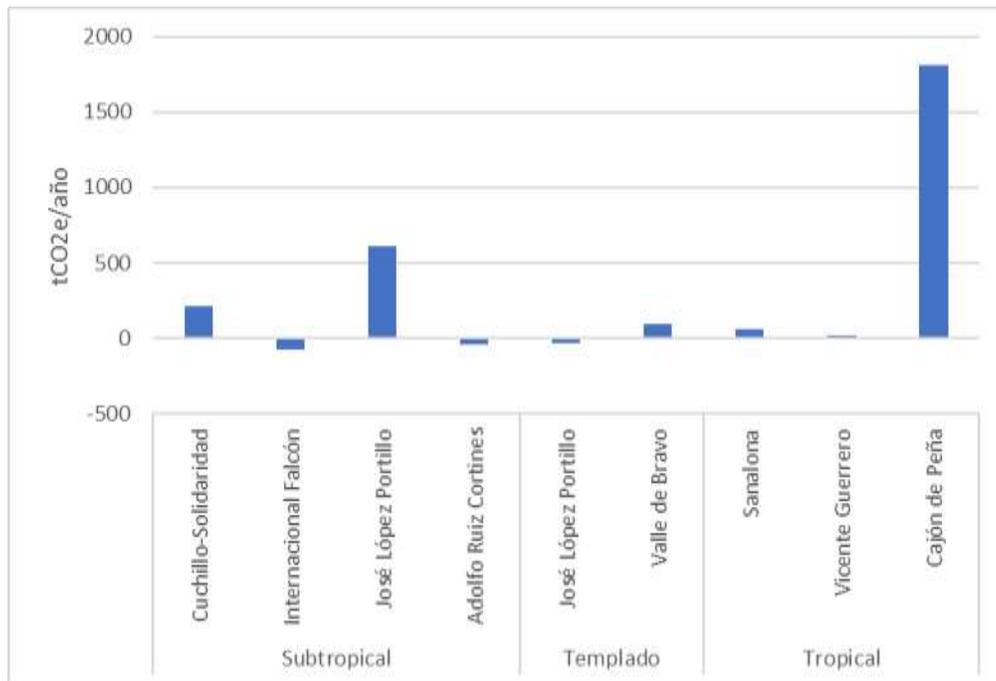


Ilustración 5-22 Huella de carbono por uso de abastecimiento

### 5.7.7 Uso de generación eléctrica

El principal uso de los embalses es la generación eléctrica, por lo cual se espera que el cuerpo de agua sea un emisor de gases de efecto invernadero de manera continua, sin embargo, algunos cuerpos de agua tienen más de un uso, lo cual deriva en una reducción de la emisión por tipo de uso del cuerpo de agua. La Ilustración 5-23, muestra que son tres los cuerpos de agua que generan la mayor cantidad de huella de carbono, Infiernillo, Belisario Domínguez y Miguel Alemán. De acuerdo con la información de la Tabla 5-10, en el clima subtropical pese a presentarse generación eléctrica estos cuerpos actúan como sumideros de GEI.

Tabla 5-10 Emisión de carbono en clima Subtropical

| Subtropical              | tCO <sub>2</sub> e/año |
|--------------------------|------------------------|
| Internacional La Amistad | -10                    |
| Internacional Falcón     | -650                   |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| <i>Luis Donaldo Colosio</i>      | -293  |
| <i>Álvaro Obregón</i>            | -1436 |
| <i>Miguel Hidalgo y Costilla</i> | -642  |
| <i>La Boquilla</i>               | -1756 |
| <i>Adolfo Ruiz Cortines</i>      | -129  |
| <i>Fernando Hiriart</i>          | -514  |

Por otro lado, de acuerdo con la información de la Tabla 5-11, la mayor parte de los cuerpos de agua de este clima, sirven como sumideros de gases de efecto invernadero, y empieza a notarse la presencia de bajas emisiones.

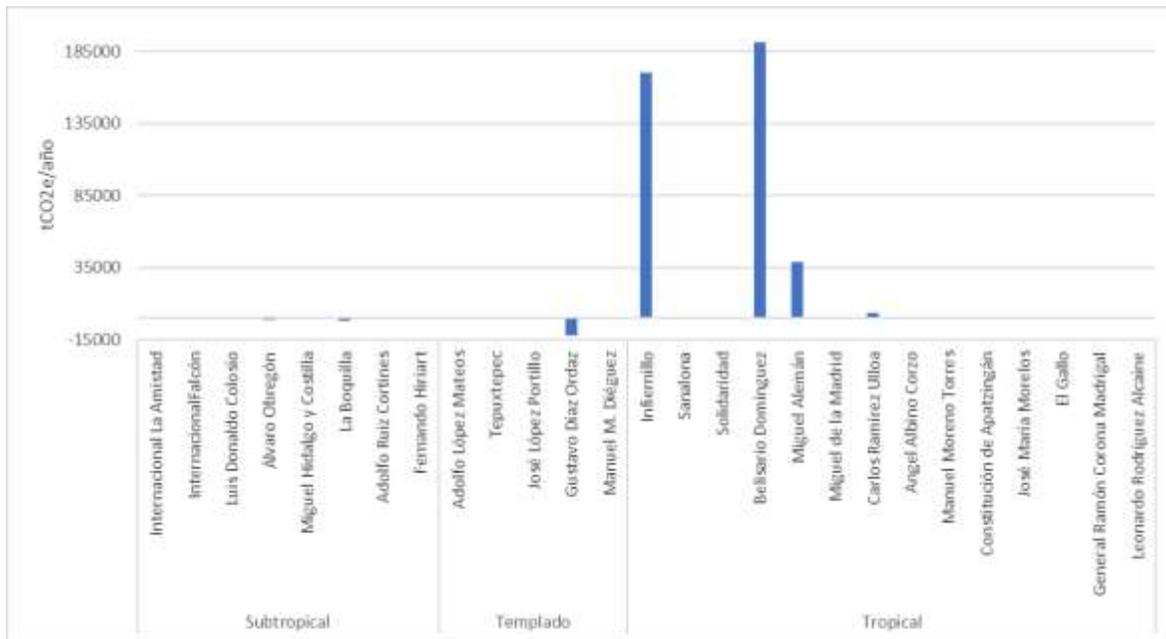
**Tabla 5-11 Emisión de carbono en clima templado**

| <b>Templado</b>            | <b>tCO<sub>2</sub>e/año</b> |
|----------------------------|-----------------------------|
| <i>Adolfo López Mateos</i> | -185                        |
| <i>Tepuxtepec</i>          | 230                         |
| <i>José López Portillo</i> | -107                        |
| <i>Gustavo Díaz Ordaz</i>  | -12282                      |
| <i>Manuel M. Diéguez</i>   | -324                        |

Finalmente, las presas que se encuentran en el clima tropical son las que principalmente generan GEI, con emisiones que van de 20 a 190975 tCO<sub>2</sub>e/año, como se puede observar en la Tabla 5-12.

**Tabla 5-12 Emisión de carbono en clima tropical**

| <b>Tropical</b>                      | <b>tCO<sub>2</sub>e/año</b> |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Infiernillo</i>                   | 170225                      |
| <i>Sanalona</i>                      | 182                         |
| <i>Solidaridad</i>                   | 259                         |
| <i>Belisario Domínguez</i>           | 190975                      |
| <i>Miguel Alemán</i>                 | 39066                       |
| <i>Miguel de la Madrid</i>           | 80                          |
| <i>Carlos Ramírez Ulloa</i>          | 3742                        |
| <i>Ángel Albino Corzo</i>            | -604                        |
| <i>Manuel Moreno Torres</i>          | 1174                        |
| <i>Constitución de Apatzingán</i>    | 260                         |
| <i>José María Morelos</i>            | 294                         |
| <i>El Gallo</i>                      | 23                          |
| <i>General Ramón Corona Madrigal</i> | 20                          |
| <i>Leonardo Rodríguez Alcaine</i>    | 100                         |



**Ilustración 5-23 Huella de carbono por uso de generación eléctrica**

## 5.8 Emisión del embalse

La huella de carbono, no solamente se debe al tipo de uso que se da al embalse, como se ha visto en el apartado anterior. Por si sola una cuenca puede ser fuente o sumidero para los GEI, por la conformación del suelo y usos, sin embargo, una vez que se inunda la zona, esta modifica tanto el uso de suelo como el comportamiento de las emisiones.

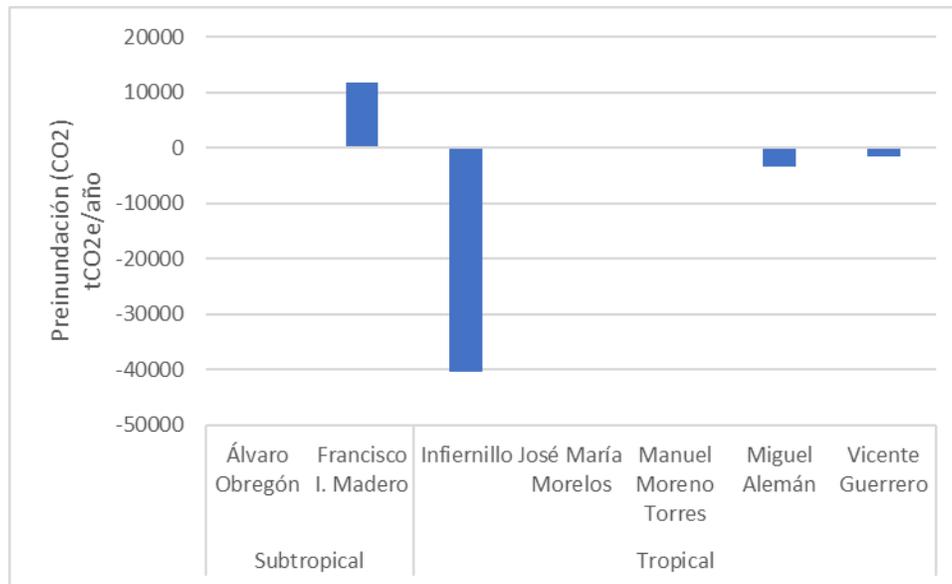
En este apartado se revisarán las emisiones de cuatro consideraciones de análisis para los cuerpos de agua, siendo estos la pre-inundación, la post-inundación, fuentes antropogénicas y la tasa de emisión neta anual.

### 5.8.1 Emisión CO<sub>2</sub>

Primeramente, se analizarán las emisiones correspondientes al CO<sub>2</sub> en los tres rubros previamente mencionados.

#### 5.8.1.1 Pre-inundación

La presencia de la huella de carbono en los cuerpos de agua originada por CO<sub>2</sub>, es baja, ya que gran parte de las emisiones provienen de la materia orgánica presente en los embalses. La Ilustración 5-24, muestra las condiciones de emisión de los cuerpos de agua que fungían como sumidero o fuente de GEI en su situación previa a la inundación de la cuenca.

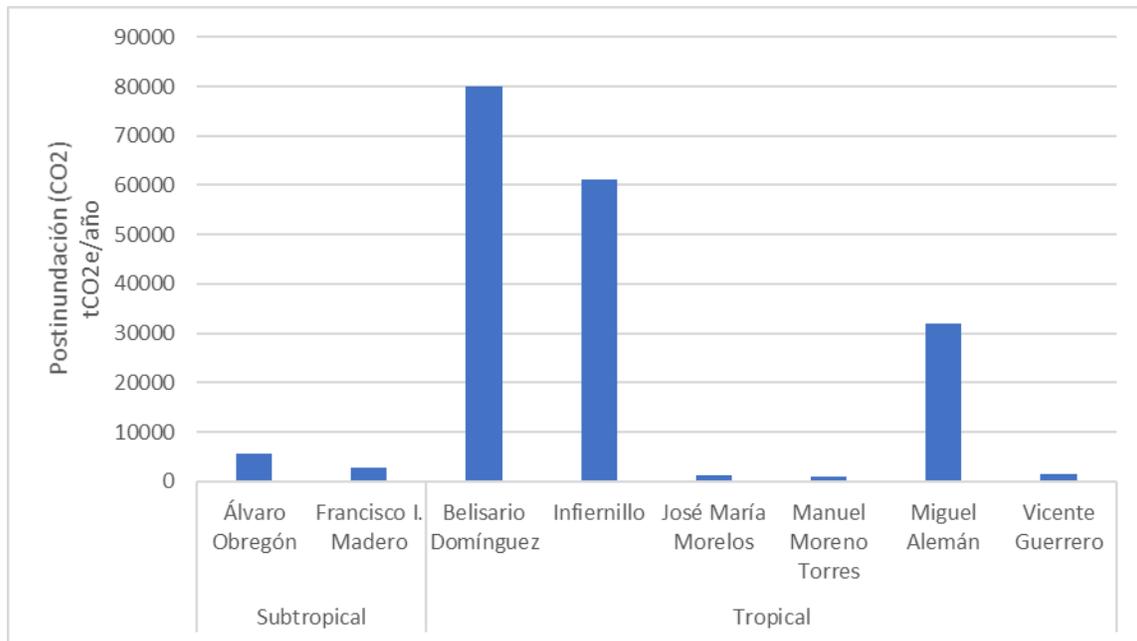


**Ilustración 5-24 Emisión de CO<sub>2</sub> condición pre-inundación**

Las presas Álvaro Obregón, José María Morelos y Manuel Moreno Torres, presentan emisiones menores a 100 tCO<sub>2</sub>e/año, razón por la cual parecen no contener información en la Ilustración 5-24.

### **5.8.1.2 Post-inundación**

Una vez que se ha llenado el embalse, la dinámica del fluido y la interacción del medio da como resultado un aumento en la emisión de gases aguas arriba del embalse y una reducción aguas abajo. El cambio es bastante visual, pues presas como Infiernillo, Belisario Domínguez o Miguel Alemán que previo a la inundación del embalse tenían una emisión nula o servían como sumidero de gases, empiezan a tener una tasa de emisión considerable al año, como se puede observar en la Ilustración 5-25, el cambio se presenta principalmente en el clima tropical.



**Ilustración 5-25 Emisión de CO<sub>2</sub> condición post-inundación**

### **5.8.1.3 Fuente Antropogénica**

Para el caso del CO<sub>2</sub> proveniente de fuentes antropogénicas, esta se encuentra ausente para todas las presas, de manera que las actividades que se realizan no impactan directamente por medio de este rubro.

### **5.8.2 Emisión de CH<sub>4</sub>**

Los mismos rubros revisado en el apartado Emisión CO<sub>2</sub>, se revisan en este apartado, pero ahora considerando la participación del CH<sub>4</sub>, como gas emitido en las diferentes etapas.

#### **5.8.2.1 Pre-inundación**

Para la porción de gases generada por la presencia de CH<sub>4</sub>, se observa en la Ilustración 5-26, que la presencia de material orgánico permite la emisión de GEI independientemente del clima predominante, lo anterior puede deberse principalmente al uso de suelo predominante en todas las regiones.

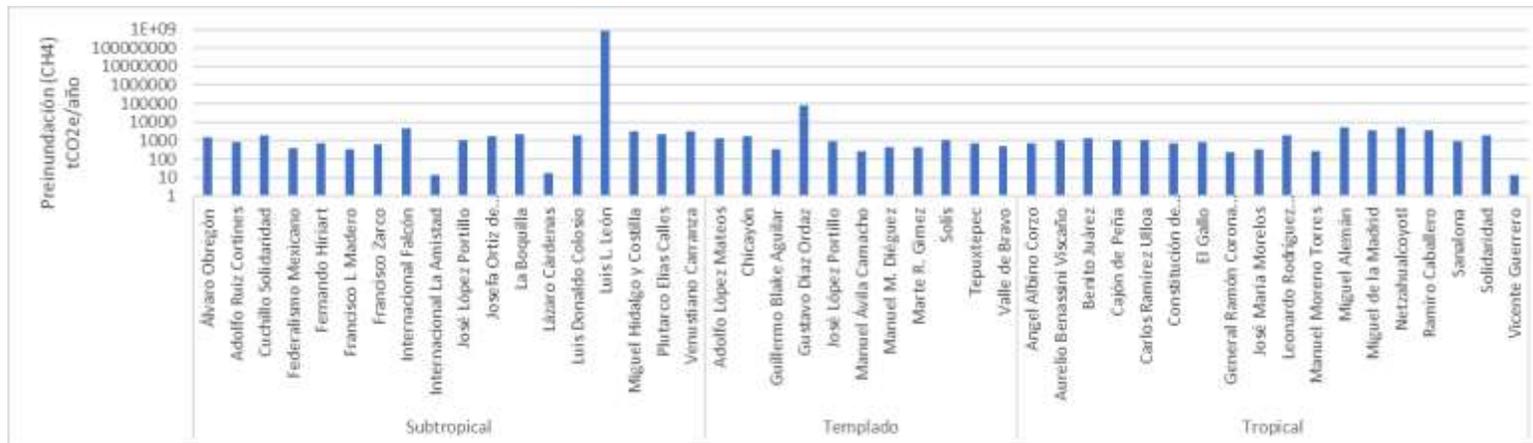


Ilustración 5-26 Emisión de gases CH<sub>4</sub> previo a la inundación

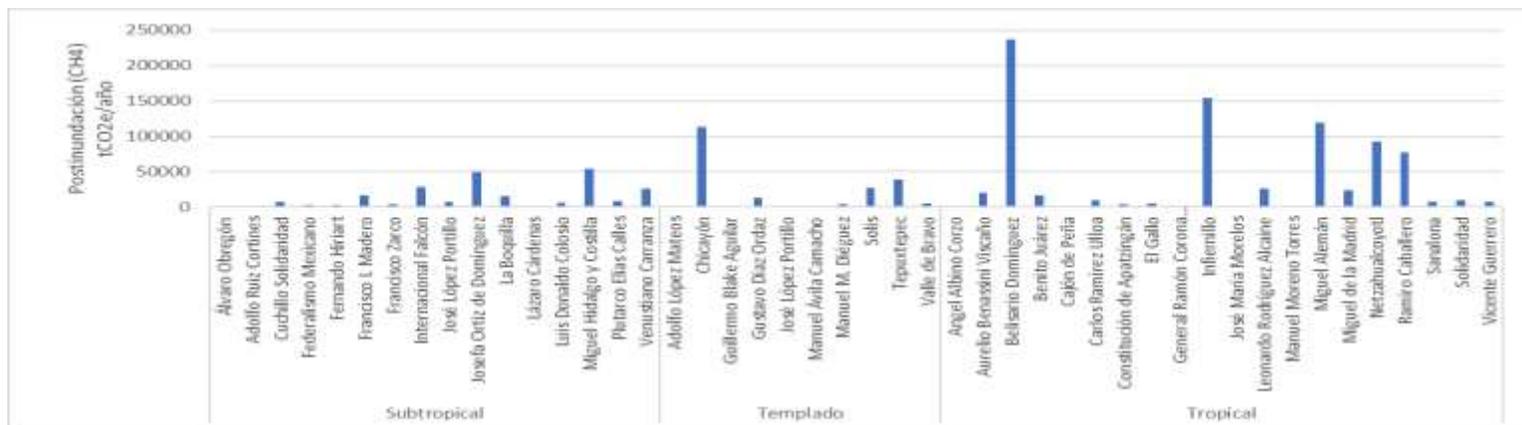


Ilustración 5-27 Emisión de gases CH<sub>4</sub> posterior a la inundación

### 5.8.2.2 Post-inundación

Una vez que el embalse se encuentra lleno, la materia orgánica presente en la zona inundada inicia su descomposición, generando la emisión de GEI a la superficie del cuerpo de agua, la Ilustración 5-27, muestra la emisión de diferentes cuerpos de agua, se observa una modificación en la tasa de generación de gases CH<sub>4</sub>. Lo anterior puede ser resultado de los usos de suelo presente en cada caso de estudio y los usos de la presa en sí. Las emisiones más significativas, se presentan en el clima tropical.

### 5.8.2.3 Fuente antropogénica

Finalmente, las actividades antropogénicas que se realizan en el embalse juegan un papel importante en la generación de GEI proveniente de CH<sub>4</sub>, como se muestra en la Ilustración 5-28. Las presas con mayor aporte en este rubro son Infiernillo, La angostura, Malpaso y Temascal presentando más de 60000 tCO<sub>2</sub>e/año de emisiones.

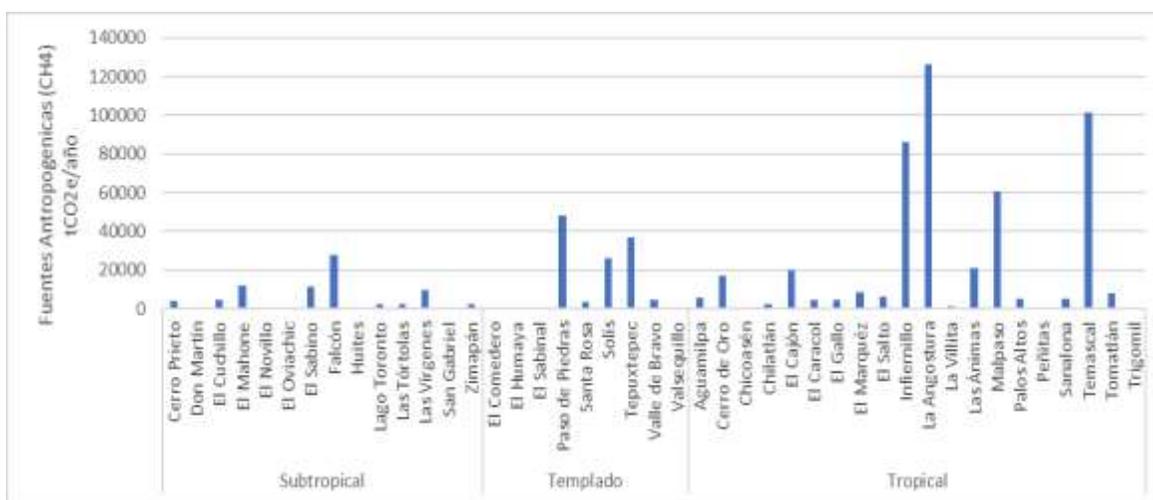


Ilustración 5-28 Emisión de gases CH<sub>4</sub> por fuente antropogénica

### 5.8.2.4 Huella neta de emisión por CH<sub>4</sub>

Una vez obtenido la huella de las diferentes fuentes, se realiza la suma de las emisiones por condiciones previas y posteriores a la inundación y se obtiene la huella neta de las emisiones de GEI. La Ilustración 5-29, muestra el comportamiento de estas emisiones en los cuerpos de agua estudiados. Cabe señalar que no es posible observar el comportamiento de específico, pues existen varios embalses que funcionan como sumideros de GEI, pero al ser pequeñas las cantidades que absorben no es posible identificar el resultado en la tabla.

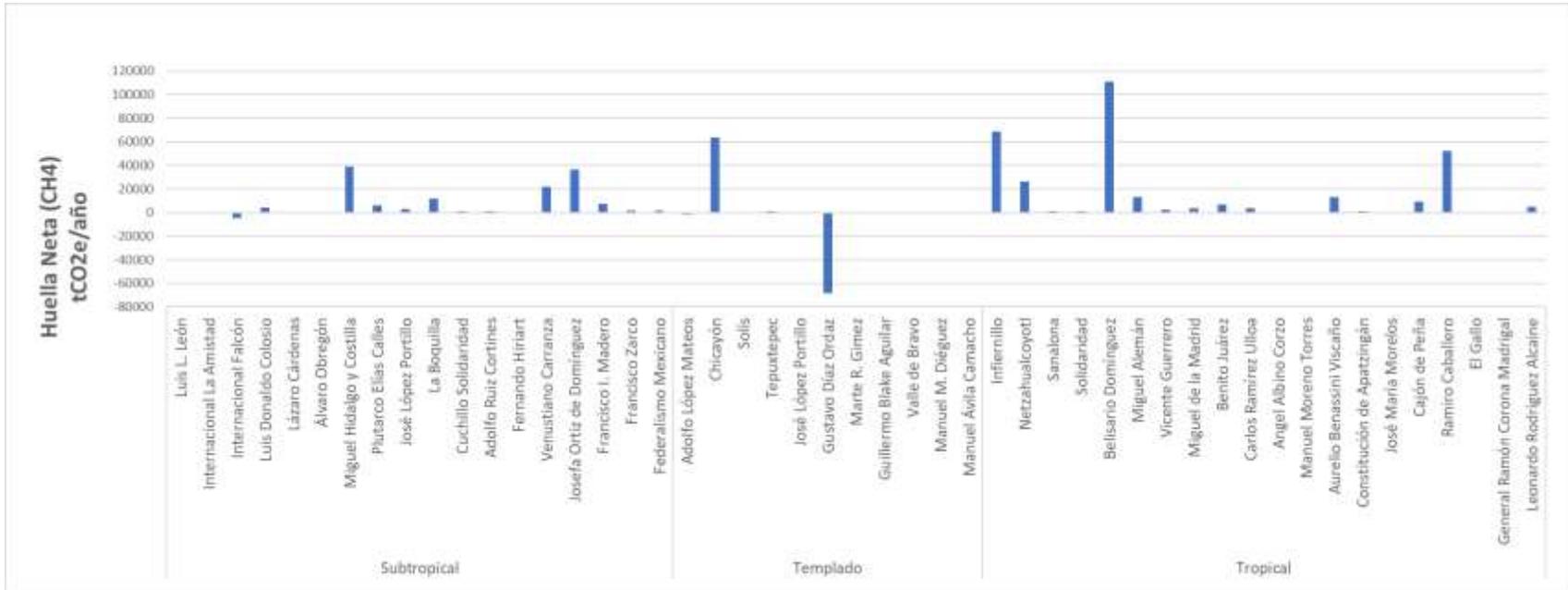


Ilustración 5-29 Emisión Neta de CH<sub>4</sub>

## 5.9 Forma de liberación

El gas de las presas una vez inundadas tiene tres mecanismos diferentes por los cuales puede liberarse primeramente al seno del líquido y posteriormente a la atmósfera y estos son por difusión, desgasificación y por burbujeo.

### 5.9.1 Porcentaje difuso

La parte difusa en el cuerpo de agua depende de la edad del cuerpo de agua en cuestión, es importante mencionar que esta, se reduce con el paso de los años. El porcentaje promedio de emisión de gases por el mecanismo de flujo difuso corresponde al 1.33% en clima subtropical y de 62.2% en el clima tropical. Algunas de las presas con porcentajes altos, han resaltado previamente como fuentes de altas tasas de emisión. La Ilustración 5-30, indica que las presas Belisario Domínguez, Miguel Alemán e Infiernillo son las de mayor presencia de flujo difuso.

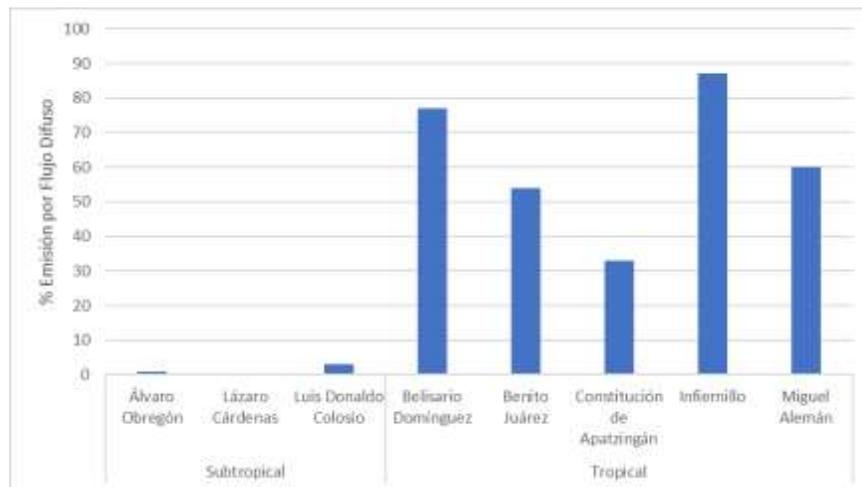
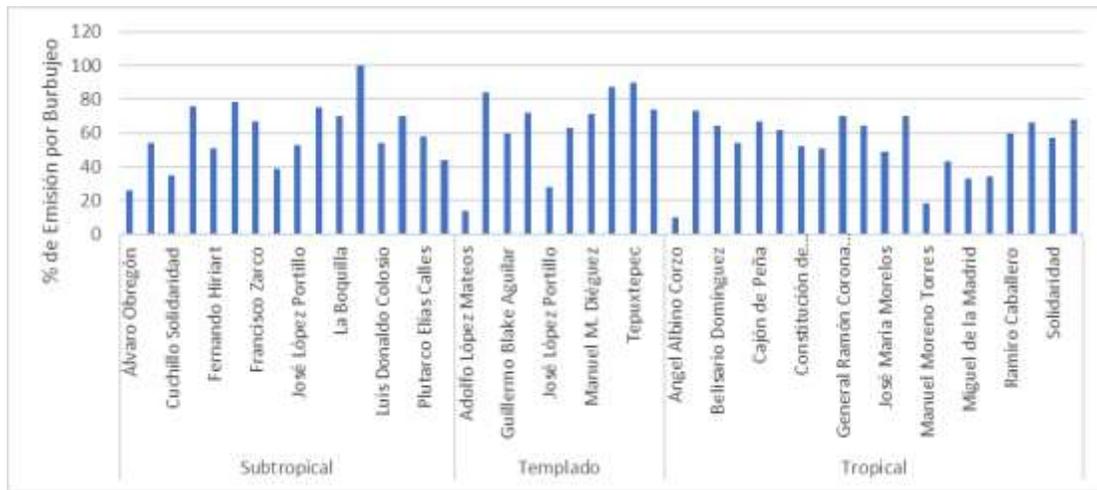


Ilustración 5-30 Porcentaje de gas emitido por flujo difuso

### 5.9.2 Porcentaje de burbujeo

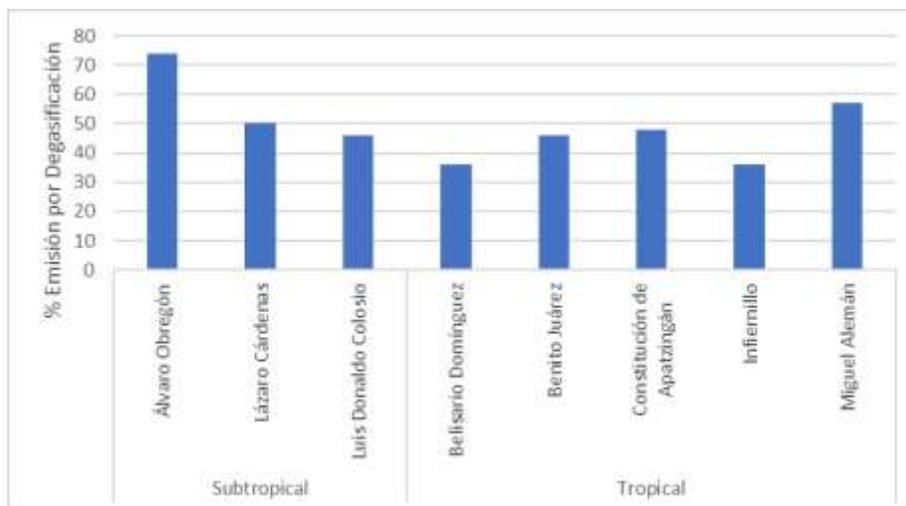
Debido a la solubilidad relativa del CH<sub>4</sub> con el CO<sub>2</sub>, se logra alcanzar altos niveles de supersaturación, lo cual deriva en la formación de burbujas en los sedimentos. Esta liberación se presenta principalmente debido a un cambio brusco de la presión. La Ilustración 5-31, muestra el porcentaje de gas proveniente del burbujeo en los cuerpos de agua, las altas tasas de este mecanismo, se debe a la presencia constante de materiales orgánicos en el seno del líquido reservado. De acuerdo con el clima, el clima templado presenta el mayor porcentaje promedio de liberación con un 64.3%, seguido del clima subtropical y tropical con 55.88% y 53.25% respectivamente.



**Ilustración 5-31 Porcentaje de gas por burbujeo**

### 5.9.3 Porcentaje por desgasificación

Este concierne al porcentaje de gas que se libera durante la operación de los embalses, debido a la variación instantánea de la profundidad del embalse. El mecanismo por desgasificación se presenta en un bajo número de presas, y únicamente en los climas subtropical y tropical, con 56.67% y 44.6% respectivamente. Este mecanismo se encuentra estrechamente relacionado con el manejo y variación de los niveles de la presa por su operación. La Ilustración 5-32, muestra aquellas presas que presentan ese mecanismo de liberación de CH<sub>4</sub> en el medio.



**Ilustración 5-32 Porcentaje de gas por desgasificación**

## 5.10 Información total de la huella de carbono

Finalmente, se revisa la información total de la huella de carbono bajo tres tipos de tasa y de cuatro diferentes fuentes. Las tasas se dividen en emisiones aéreas, emisiones del vaso y las emisiones totales en el tiempo de vida actual de la presa, cada una de estas se conforma de las emisiones post-inundación menos las condiciones pre-inundación menos las fuentes antropogénicas más las correspondientes a la obra (este último no se considera en el este informe) con estos, se obtiene la huella neta de carbono.

### 5.10.1 Emisiones aéreas

La Tabla 5-13 muestra las emisiones netas aéreas, en el clima templado, donde el total acumulado es de  $-1228 \text{ gCO}_2/\text{m}^2\text{d}$ . Este total incluye las condiciones pre-inundación, así como las actividades antropogénicas correspondientes a estos cuerpos de agua e indica que este conjunto de presas tiene la función de sumideros para los GEI.

**Tabla 5-13 Huella neta de emisión de carbono y sus procedencias en clima templado**

| Presa                      | (Huella Neta)<br>$\text{gCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{año}$ | Antropogénicas<br>$\text{gCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{año}$ | Pre-inundación<br>$\text{gCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{año}$ | Post-inundación<br>$\text{gCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{año}$ |
|----------------------------|---|--|--|---|
| <b>Total</b>               | <b>-1228</b>  | <b>3679</b>  | <b>3602</b>  | <b>6052</b>   |
| Adolfo López Mateos        | -42   | 2  | 43   | 3   |
| Chicayón                   | 1568  | 1189   | 40   | 2797  |
| Guillermo Blake<br>Aguilar | 33  | 71   | 63   | 167   |
| Gustavo Díaz Ordaz         | -2686   | 0  | 3209   | 523   |
| José López Portillo        | -36   | 5  | 46   | 15  |
| Manuel Ávila<br>Camacho    | -35   | 118  | 35   | 118   |
| Manuel M. Diéguez          | -33   | 362  | 45   | 374   |
| Marte R. Gimez             | -45   | 0  | 45   | 0   |
| Solís                      | 9   | 617  | 24   | 649   |
| Tepuxtepec                 | 33  | 1063   | 22   | 1118  |
| Valle de Bravo             | 6   | 252  | 30   | 288   |

Por su parte, la Tabla 5-14 muestra las emisiones totales del clima subtropical, se puede observar que la emisión neta es de  $1977 \text{ gCO}_2/\text{m}^2\text{d}$  la emisión neta de las presas ubicadas

en este clima. A diferencia del caso anterior en conjunto estas presas son fuente de gases de efecto invernadero.

**Tabla 5-14 Huella neta de emisión de carbono y sus procedencias en clima subtropical**

| Presa                     | (Huella Neta)<br>gCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /año | Antropogénicas<br>gCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /año | Pre-inundación<br>gCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /año | Post-inundación<br>gCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /año |
|---------------------------|---|--|--|---|
| <b>Total</b>              | <b>1977</b>   | <b>1625</b>  | <b>45959075</b>  | <b>4975</b>   |
| Álvaro Obregón            | 73  | 19   | 92   | 17  |
| Adolfo Ruiz Cortines      | 76  | 0  | 56   | 132   |
| Cuchillo Solidaridad      | 25  | 105  | 46   | 175   |
| Federalismo Mexicano      | 160   | 43   | 39   | 242   |
| Fernando Hiriart          | -23   | 109  | 33   | 120   |
| Francisco I. Madero       | -60   | 366  | 473  | 778   |
| Francisco Zarco           | 106   | 146  | 44   | 295   |
| Internacional Falcón      | -36   | 231  | 36   | 231   |
| Internacional La Amistad  | -161  | 0  | 160  | -1  |
| José López Portillo       | 151   | 189  | 51   | 391   |
| Josefa Ortiz de Domínguez | 815   | 245  | 40   | 1100  |
| La Boquilla               | 145   | 27   | 28   | 200   |
| Lázaro Cárdenas           | -170  | 4  | 230  | 66  |
| Luis Donaldo Colosio      | 100   | 3  | 46   | 149   |
| Luis L. León              | 0   | 0  | 45957536   | 0   |
| Miguel Hidalgo y Costilla | 411   | 128  | 34   | 573   |
| Plutarco Elías Calles     | 103   | 4  | 93   | 200   |
| Venustiano Carranza       | 262   | 6  | 38   | 307   |

Finalmente, en las emisiones aéreas, se tienen las de los cuerpos de agua que se encuentran en clima tropical con un total de emisión de 3708 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d. Siendo la mayor de los tres climas estudiados. Parte de esta diferencia puede deberse al uso de suelo y actividades

relacionadas con el uso del agua de la presa. El compendio de emisiones de cada una de las fuentes se encuentra en la Tabla 5-15.

**Tabla 5-15 Huella neta de emisión de carbono y sus procedencias en clima tropical**

| <b>Presa</b>                     | <b>(Huella Neta)<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Antropogénicas<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Pre-inundación<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Post-inundación<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> |
|----------------------------------|---|--|--|---|
| <b>Total</b>                     | <b>3708</b>   | <b>4033</b>  | <b>428</b>   | <b>8180</b>   |
| Ángel Albino Corzo               | -32   | 6  | 37   | 11  |
| Aurelio Benassini<br>Viscaño     | 526   | 257  | 44   | 827   |
| Belisario Domínguez              | 337   | 222  | 0  | 559   |
| Benito Juárez                    | 154   | 195  | 30   | 379   |
| Cajón de Peña                    | 334   | 298  | 40   | 672   |
| Carlos Ramírez Ulloa             | 128   | 149  | 38   | 315   |
| Constitución de<br>Apatzingán    | 93  | 151  | 52   | 305   |
| El Gallo                         | 6   | 244  | 45   | 295   |
| General Ramón Corona<br>Madrigal | 43  | 120  | 45   | 208   |
| Infiernillo                      | 590   | 298  | -140   | 748   |
| José María Morelos               | 111   | 103  | 14   | 228   |
| Leonardo Rodríguez<br>Alcaine    | 71  | 309  | 29   | 409   |
| Manuel Moreno Torres             | 108   | 49   | 3  | 160   |
| Miguel Alemán                    | 126   | 261  | 5  | 392   |
| Miguel de la Madrid              | 24  | 126  | 25   | 175   |
| Netzahualcoyotl                  | 90  | 207  | 19   | 317   |
| Ramiro Caballero                 | 597   | 241  | 39   | 877   |
| Sanalona                         | 62  | 259  | 47   | 368   |
| Solidaridad                      | 18  | 81   | 28   | 128   |
| Vicente Guerrero                 | 322   | 457  | 28   | 807   |

### 5.10.2 Emisiones del embalse

La Tabla 5-16 muestra las emisiones netas propias del embalse, en el clima subtropical, donde el total acumulado es de -866174485 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d. Este total incluye las condiciones pre-inundación, así como las actividades antropogénicas correspondientes a estos cuerpos de agua. De acuerdo con esto, las actividades que se realizan en el cuerpo de agua, así como el suelo que se encuentra cubierto por el agua, no generan una gran emisión de gases por los diferentes mecanismos que se analizaron previamente. El sistema trabaja como un sumidero, gracias a la presa Luis L. León, la cual debido a sus características pre-inundación la posicionan como un sumidero de gases

**Tabla 5-16 Huella neta de emisión de carbono del embalse y sus procedencias en clima subtropical**

| <b>Presa</b>              | <b>Post-inundación<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Pre-inundación<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Fuente Antropogénica<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>(Huella Neta)<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> |
|---------------------------|---|--|--|---|
| <b>Total</b>              | <b>239697</b>   | <b>866340576</b>   | <b>79746</b>   | <b>-866174485</b>   |
| Álvaro Obregón            | 6926  | 1436   | 8  | 5482  |
| Adolfo Ruiz Cortines      | 0   | 860  | 0  | -860  |
| Cuchillo Solidaridad      | 7613  | 1985   | 4552   | 1076  |
| Federalismo Mexicano      | 2385  | 384  | 425  | 1577  |
| Fernando Hiriart          | 2700  | 749  | 2465   | -514  |
| Francisco I. Madero       | 19974   | 12135  | 9390   | -1550   |
| Francisco Zarco           | 4081  | 604  | 2012   | 1465  |
| Internacional Falcón      | 27944   | 4333   | 27944  | -4333   |
| Internacional La Amistad  | 0   | 13   | -13  | -9  |
| José López Portillo       | 7843  | 1014   | 3788   | 3040  |
| Josefa Ortiz de Domínguez | 49567   | 1810   | 11054  | 36703   |
| La Boquilla               | 15850   | 5195   | 5156   | 11499   |
| Lázaro Cárdenas           | 6   | 18   | 0  | -14   |
| Luis Donald Colosio       | 6323  | 1954   | 139  | 4230  |
| Luis L. León              | 0   | 866299563  | 0  | -866299563  |

|                           |       |      |       |       |
|---------------------------|-------|------|-------|-------|
| Miguel Hidalgo y Costilla | 54256 | 3209 | 12099 | 38948 |
| Plutarco Elías Calles     | 8452  | 2095 | 186   | 6321  |
| Venustiano Carranza       | 25777 | 3219 | 541   | 22017 |

La Tabla 5-17 muestra las emisiones correspondientes a las presas que se encuentran en el clima templado, considerando el efecto de todas, se tiene que el sistema trabaja como un sumidero para gases de efecto invernadero, con la capacidad de absorber 19270 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d. Gracias a las características previas a la inundación y los usos del agua el sistema logra fungir como un sumidero de gases de efecto invernadero.

**Tabla 5-17 Huella neta de emisión de carbono del embalse y sus procedencias en clima templado**

| Presa                   | Post-inundación                        | Pre-inundación                         | Fuente Antropogénica                   | (Huella Neta)                          |
|-------------------------|--|--|--|--|
|                         | gCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /año |
| <b>Total</b>            | <b>190952</b>                          | <b>89451</b>                           | <b>120770</b>                          | <b>-19270</b>                          |
| Adolfo López Mateos     | 95                                     | 1265                                   | 65                                     | -1234                                  |
| Chicayón                | 113740                                 | 1627                                   | 48340                                  | 63773                                  |
| Guillermo Blake Aguilar | 937                                    | 353                                    | 400                                    | 184                                    |
| Gustavo Díaz Ordaz      | 0                                      | 81882                                  | 0                                      | -81882                                 |
| José López Portillo     | 296                                    | 915                                    | 95                                     | -714                                   |
| Manuel Ávila Camacho    | 853                                    | 255                                    | 850                                    | -253                                   |
| Manuel M. Diéguez       | 3640                                   | 441                                    | 3523                                   | -324                                   |
| Marte R. Gimez          | 0                                      | 441                                    | 0                                      | -441                                   |
| Solís                   | 27658                                  | 1005                                   | 26275                                  | 378                                    |
| Tepuxtepec              | 38823                                  | 753                                    | 36920                                  | 1149                                   |
| Valle de Bravo          | 4910                                   | 514                                    | 4302                                   | 94                                     |

Finalmente, la Tabla 5-18 presenta las emisiones generadas por las presas del clima tropical, donde en conjunto se tiene una huella de 540898 gCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d el cual es menor a las emisiones

calculadas para el clima subtropical. Este conjunto de presas antes de su inundación fungía como sumideros para los gases de efecto invernadero, sin embargo, las actividades antropogénicas y la inundación convierten al sistema en una fuente de GEI.

**Tabla 5-18 Huella neta de emisión de carbono del embalse y sus procedencias en clima tropical**

| <b>Presa</b>                  | <b>Post-inundación<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Pre-inundación<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>Fuente Antropogénica<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> | <b>(Huella Neta)<br/>gCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/año</b> |
|-------------------------------|---|--|--|---|
| <b>Total</b>                  | <b>1009986</b>  | <b>-15721</b>  | <b>484820</b>  | <b>540898</b>   |
| Ángel Albino Corzo            | 210   | 697  | 117  | -604  |
| Aurelio Benassini Viscaño     | 20625   | 1099   | 6414   | 13112   |
| Belisario Domínguez           | 317059  | 0  | 126084   | 190975  |
| Benito Juárez                 | 16294   | 1307   | 8375   | 6612  |
| Cajón de Peña                 | 18246   | 1081   | 8101   | 9064  |
| Carlos Ramírez Ulloa          | 9179  | 1105   | 4333   | 3742  |
| Constitución de Apatzingán    | 4283  | 727  | 2257   | 1299  |
| El Gallo                      | 5385  | 820  | 4448   | 117   |
| General Ramón Corona Madrigal | 1051  | 226  | 608  | 216   |
| Infiernillo                   | 215904  | -40417   | 86096  | 170225  |
| José María Morelos            | 3025  | 181  | 1372   | 1482  |
| Leonardo Rodríguez Alcaine    | 26597   | 1877   | 20081  | 4639  |
| Manuel Moreno Torres          | 1743  | 37   | 532  | 1174  |
| Miguel Alemán                 | 151848  | 1827   | 101188   | 48833   |
| Miguel de la Madrid           | 23692   | 3381   | 17011  | 3300  |
| Netzahualcóyotl               | 92698   | 5512   | 60717  | 26469   |
| Ramiro Caballero              | 76912   | 3384   | 21151  | 52377   |
| Sanalona                      | 7148  | 905  | 5032   | 1211  |
| Solidaridad                   | 9230  | 2055   | 5880   | 1296  |
| Vicente Guerrero              | 8857  | -1525  | 5023   | 5359  |

### 5.10.3 Emisiones acumuladas por tiempo de vida

Finalmente, el modelo de estimación de gases predice la emisión acumulada neta en el tiempo de vida útil que lleva la presa. Considerando los cambios acumulados previo y durante su puesta en marcha, así como, las fuentes antropogénicas presentes en el cuerpo de agua. La Tabla 5-19, muestra los valores para cada una de las presas que se encuentran en el clima subtropical, se observa que existe una emisión neta acumulada de 12 492 369 tCO<sub>2</sub>e, pese a que algunos cuerpos de agua sirven como sumideros de gases, no son suficientes para mitigar la emisión final. La presa Luis L. León, requiere mayor análisis, debido a que presenta nula emisión en el tiempo de vida que lleva de operación.

**Tabla 5-19 Huella acumulada neta de emisión en clima subtropical**

| Presas                    | Post-inundación<br>tCO <sub>2</sub> e | Pre-inundación<br>tCO <sub>2</sub> e | Antropogénica<br>tCO <sub>2</sub> e | (Huella Neta)<br>tCO <sub>2</sub> e |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Total</b>              | <b>23970759</b>                       | <b>3800141</b>                       | <b>7675884</b>                      | <b>12492369</b>                     |
| Álvaro Obregón            | 692552                                | 143569                               | 750                                 | 548233                              |
| Adolfo Ruiz Cortines      | 0                                     | 86007                                | 0                                   | -86007                              |
| Cuchillo Solidaridad      | 761264                                | 198468                               | 455236                              | 107560                              |
| Federalismo Mexicano      | 238535                                | 38407                                | 42459                               | 157668                              |
| Fernando Hiriart          | 270043                                | 74873                                | 246549                              | -51380                              |
| Francisco I. Madero       | 1997422                               | 1213510                              | 938960                              | -155048                             |
| Francisco Zarco           | 408078                                | 60430                                | 201182                              | 146466                              |
| Internacional Falcón      | 2794444                               | 433293                               | 2794445                             | -433293                             |
| Internacional La Amistad  | 1252                                  | 0                                    | 0                                   | -1261                               |
| José López Portillo       | 784286                                | 101442                               | 378812                              | 304032                              |
| Josefa Ortiz de Domínguez | 4956723                               | 181043                               | 1105350                             | 3670330                             |
| La Boquilla               | 1584964                               | 219491                               | 215555                              | 1149918                             |
| Lázaro Cárdenas           | 536                                   | 1868                                 | 36                                  | -1368                               |
| Luis Donald Colosio       | 632294                                | 195430                               | 13910                               | 422953                              |
| Luis L. León              | 0                                     | 0                                    | 0                                   | 0                                   |
| Miguel Hidalgo y Costilla | 5425622                               | 320929                               | 1209914                             | 3894779                             |
| Plutarco Elías Calles     | 845060                                | 209510                               | 18595                               | 617105                              |

Venustiano Carranza                      2577684                      321871                      54131                      2201682

En la Tabla 5-20, se muestran las emisiones acumuladas para el clima templado, se observa que este conjunto de presas trabaja como un sumidero de gases con un valor de 1 926 961 tCO<sub>2</sub>e. En este conjunto de presas, el embalse Gustavo Díaz Ordaz es la que mayor aportación realiza en la absorción de las GEI.

**Tabla 5-20 Huella acumulada neta de emisión en clima templado**

| <b>Presas</b>           | <b>Post-inundación<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> | <b>Pre-inundación<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> | <b>Antropogénica<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> | <b>(Huella Neta)<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> |
|-------------------------|---|--|---|---|
| <b>Total</b>            | <b>19095179</b>                             | <b>8945151</b>                             | <b>12076990</b>                           | <b>-1926961</b>                           |
| Adolfo López Mateos     | 9542  | 126508                                     | 6479                                      | -123445                                   |
| Chicayón                | 11373990                                    | 162741                                     | 4833955                                   | 6377294                                   |
| Guillermo Blake Aguilar | 93671                                       | 35268                                      | 39988                                     | 18415                                     |
| Gustavo Díaz Ordaz      | 0   | 8188209                                    | 0   | -8188209                                  |
| José López Portillo     | 29567                                       | 91528                                      | 9462                                      | -71422                                    |
| Manuel Ávila Camacho    | 85288                                       | 25516                                      | 85032                                     | -25261                                    |
| Manuel M. Diéguez       | 363985                                      | 44053                                      | 352338                                    | -32406                                    |
| Marte R. Gimez          | 0   | 44053                                      | 0   | -44053                                    |
| Solís                   | 2765822                                     | 100519                                     | 2627531                                   | 37772                                     |
| Tepuxtepec              | 3882265                                     | 75315                                      | 3692034                                   | 114916                                    |
| Valle de Bravo          | 491049                                      | 51441                                      | 430171                                    | 9438                                      |

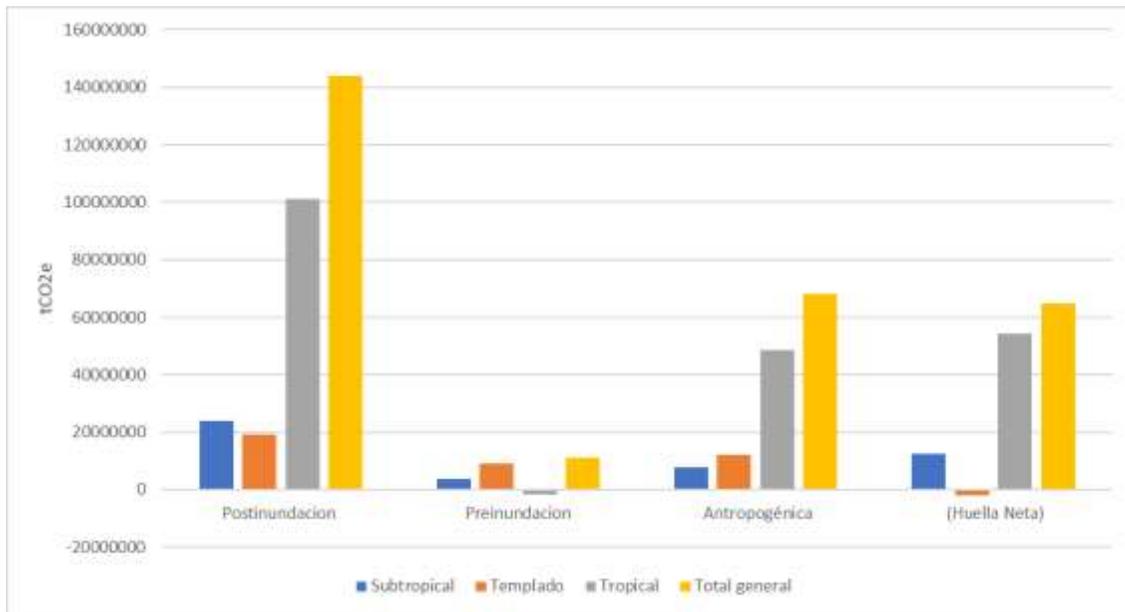
Finalmente, la Tabla 5-21 muestra las emisiones de las presas que se encuentran en clima tropical, para este caso la mayor parte de los cuerpos de agua son emisores de gases, llegando a un total acumulado de 54 088 823 tCO<sub>2</sub>e. La presa Ángel Albino Corzo, es la única presa en este grupo que sirve de sumidero para los gases de efecto invernadero. También se puede observar que las características previas a la inundación del embalse, impacta en menor medida a las emisiones que posteriormente se presentaron, así mismo las actividades antropogénicas tienen un algo impacto en este grupo de presas principalmente por el tipo de uso del cuerpo de agua.

**Tabla 5-21 Huella acumulada neta de emisión en clima tropical**

| <b>Presas</b>                 | <b>Post-inundación<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> | <b>Pre-inundación<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> | <b>Antropogénica<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> | <b>(Huella Neta)<br/>tCO<sub>2</sub>e</b> |
|-------------------------------|---|--|---|---|
| <b>Tropical</b>               | <b>100998688</b>                            | <b>-1572099</b>                            | <b>48381961</b>                           | <b>54088823</b>                           |
| Ángel Albino Corzo            | 20966                                       | 69730                                      | 11664                                     | -60428                                    |
| Aurelio Benassini Viscaño     | 2062539                                     | 109936                                     | 641449                                    | 1311153                                   |
| Belisario Domínguez           | 31705901                                    | 0  | 12608417                                  | 19097484                                  |
| Benito Juárez                 | 1629412                                     | 130663                                     | 837529                                    | 661221                                    |
| Cajón de Peña                 | 1824624                                     | 108082                                     | 810133                                    | 906409                                    |
| Carlos Ramírez Ulloa          | 917924                                      | 110484                                     | 433260                                    | 374179                                    |
| Constitución de Apatzingán    | 428335                                      | 72686                                      | 225739                                    | 129910                                    |
| El Gallo                      | 538490                                      | 81985                                      | 444793                                    | 11712                                     |
| General Ramón Corona Madrigal | 105061                                      | 22649                                      | 60835                                     | 21577                                     |
| Infiernillo                   | 21590387                                    | -4041660                                   | 8609583                                   | 17022464                                  |
| José María Morelos            | 302524                                      | 18148                                      | 37159                                     | 147217                                    |
| Leonardo Rodríguez Alcaine    | 2659735                                     | 187675                                     | 2008114                                   | 463946                                    |
| Manuel Moreno Torres          | 174258                                      | 3664                                       | 53162                                     | 117432                                    |
| Miguel Alemán                 | 15184768                                    | 182682                                     | 10118773                                  | 4883312                                   |
| Miguel de la Madrid           | 2369205                                     | 338074                                     | 1701089                                   | 330042                                    |
| Netzahualcóyotl               | 9269805                                     | 551179                                     | 6071722                                   | 2646904                                   |
| Ramiro Caballero              | 7691186                                     | 338434                                     | 2115076                                   | 5237675                                   |
| Sanalona                      | 714825                                      | 90485                                      | 503237                                    | 121103                                    |
| Solidaridad                   | 923006                                      | 205487                                     | 587954                                    | 129564                                    |
| Vicente Guerrero              | 885737                                      | -152482                                    | 502273                                    | 535947                                    |

Una vez analizados los diferentes casos, la Ilustración 5-33 muestra en resumen el comportamiento de las diferentes fuentes consideradas en el modelo de Gres y la huella total para cada uno de los climas en los que se encuentran los diferentes cuerpos de agua de interés. Es interesante observar que la mayor presencia emisiones se presenta posterior a la inundación del embalse, pues se hace un cambio bastante fuerte en el tipo de uso del

suelo. Así mismo, las actividades antropogénicas, son un foco importante para la generación de gases en los embalses.

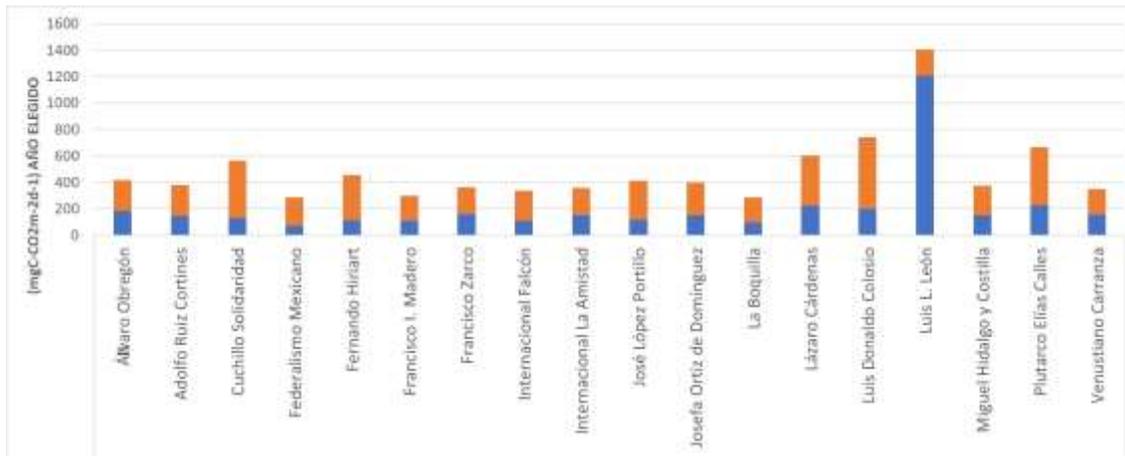


**Ilustración 5-33 Comparación de huellas por clima**

### 5.11 Modelo GRAT

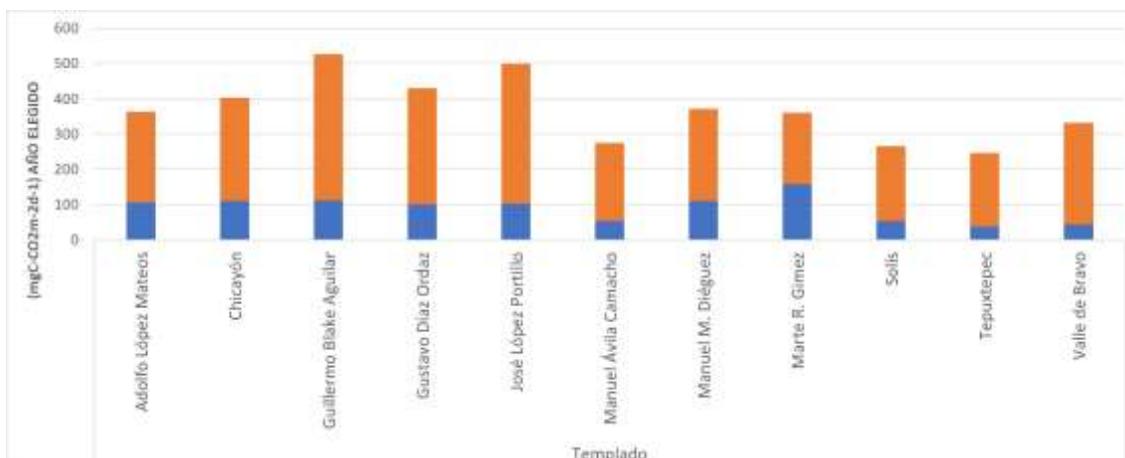
Cada una de las cuencas de estudio se revisaron con el modelo de cálculo GRAT, con lo cual se obtiene la huella de carbono por CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> correspondiente al año y al acumulado de la edad del embalse.

Se obtuvieron las huellas de carbono por unidad de superficie por día, para cada uno de los climas en que se encuentran los embalses de interés. La Ilustración 5-34, muestra la huella de carbono generada por el CO<sub>2</sub> (naranja) y el CH<sub>4</sub> (azul) en el clima subtropical. Se observa también que la presa Luis L. León, además de ser la de mayor emisión, es aquella en donde la presencia de CH<sub>4</sub> es más significativa.



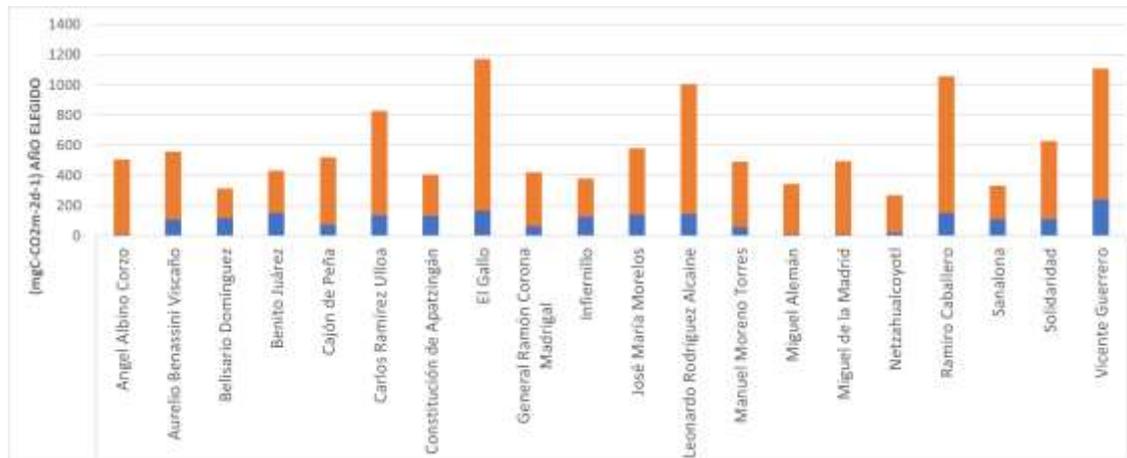
**Ilustración 5-34 Huella de Carbono para el clima subtropical**

El promedio en este clima es de 205.611 mgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>d y de 277.277mgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>d, para el dióxido de carbono y metano respectivamente. Por otro lado, la Ilustración 5-35, muestra los resultados de la huella en clima templado, donde el CO<sub>2</sub> aporta 89.7272 mg y el CH<sub>4</sub> 280.5454 mg por unidad de superficie al año. En este clima el mayor aporte de la huella se debe principalmente al CO<sub>2</sub> de los embalses.



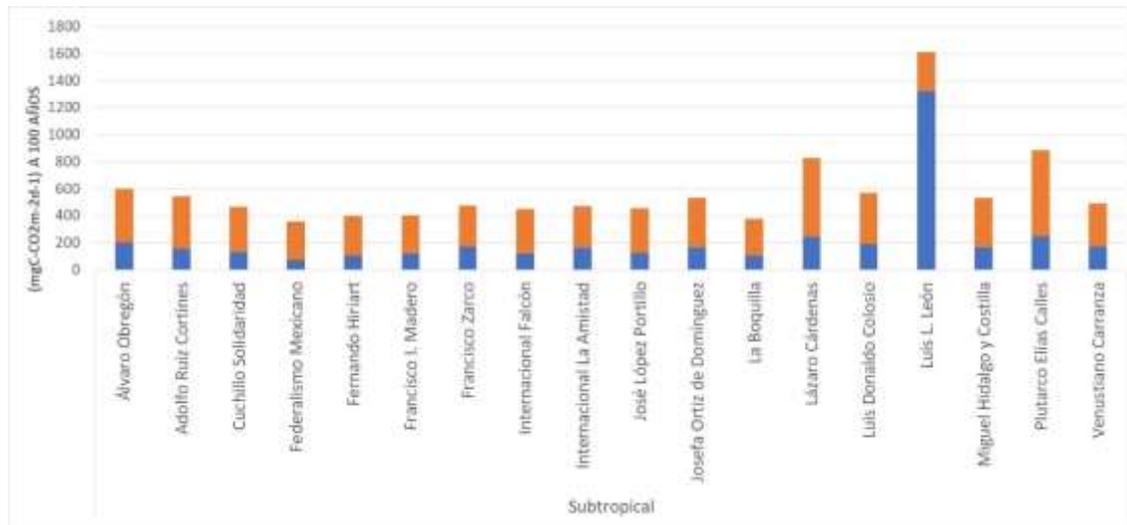
**Ilustración 5-35 Huella de Carbono para el clima templado**

En el clima tropical, de acuerdo con la Ilustración 5-36, se observa que la mayor parte de la huella de carbono es generada por el CO<sub>2</sub> de los embalses. El promedio en mgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>d de la generación por parte del metano es de 103.5 y del dióxido de carbono de 487.9 en clima tropical.



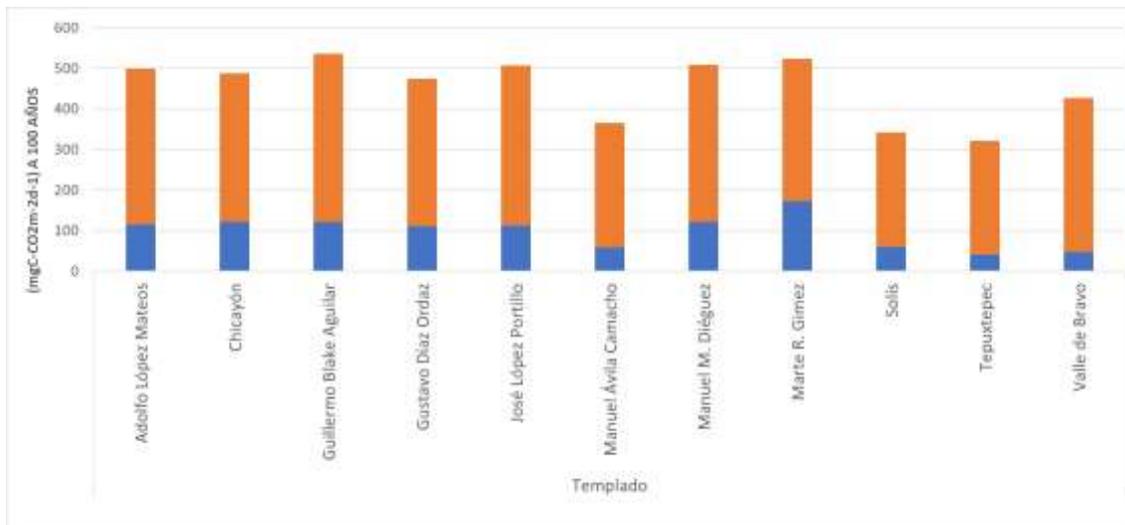
**Ilustración 5-36 Huella de Carbono para el clima tropical**

Finalmente se analiza la emisión acumulada a 100 años de los gases en cada cuerpo de agua agrupándolos por su ubicación en el clima. La Ilustración 5-37, indica que la mayor parte de emisiones durante los 100 primeros años de las presas en clima subtropical proviene del CO<sub>2</sub>, a excepción de la presa Luis L. León en la cual el CH<sub>4</sub> es el protagonista de las emisiones. El promedio en mgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>d en este clima es de 222.388 y 359.444 de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> respectivamente.



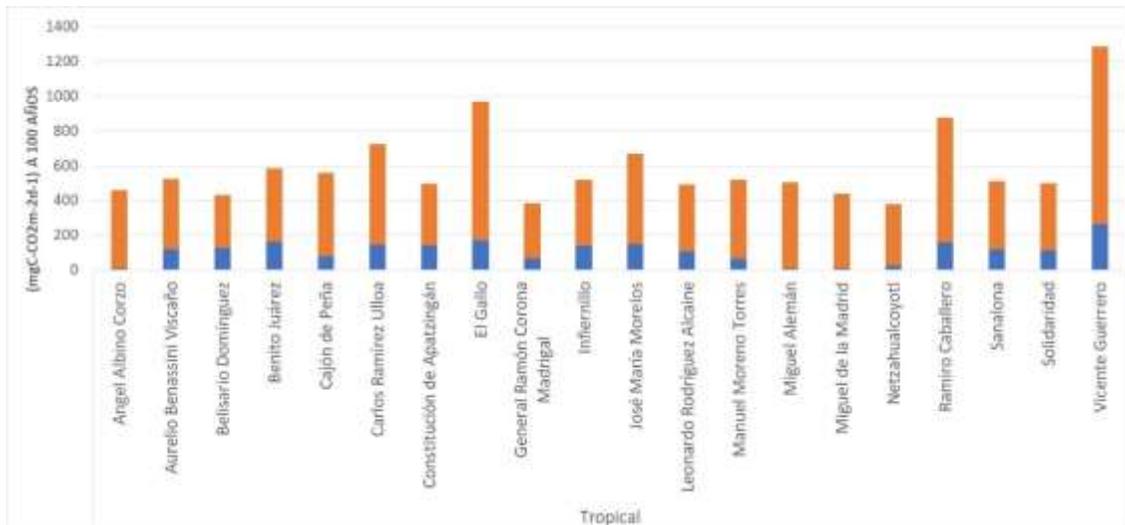
**Ilustración 5-37 Emisión a 100 años para clima Tropical**

La Ilustración 5-38, muestra la emisión de las presas ubicadas en clima templado, de manera similar al clima subtropical, la principal fuente de emisión proviene del CO<sub>2</sub>. El promedio de emisión en mgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>d es de 98.3636 y 355.2727 para el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> respectivamente.



**Ilustración 5-38 Emisión a 100 años para clima templado**

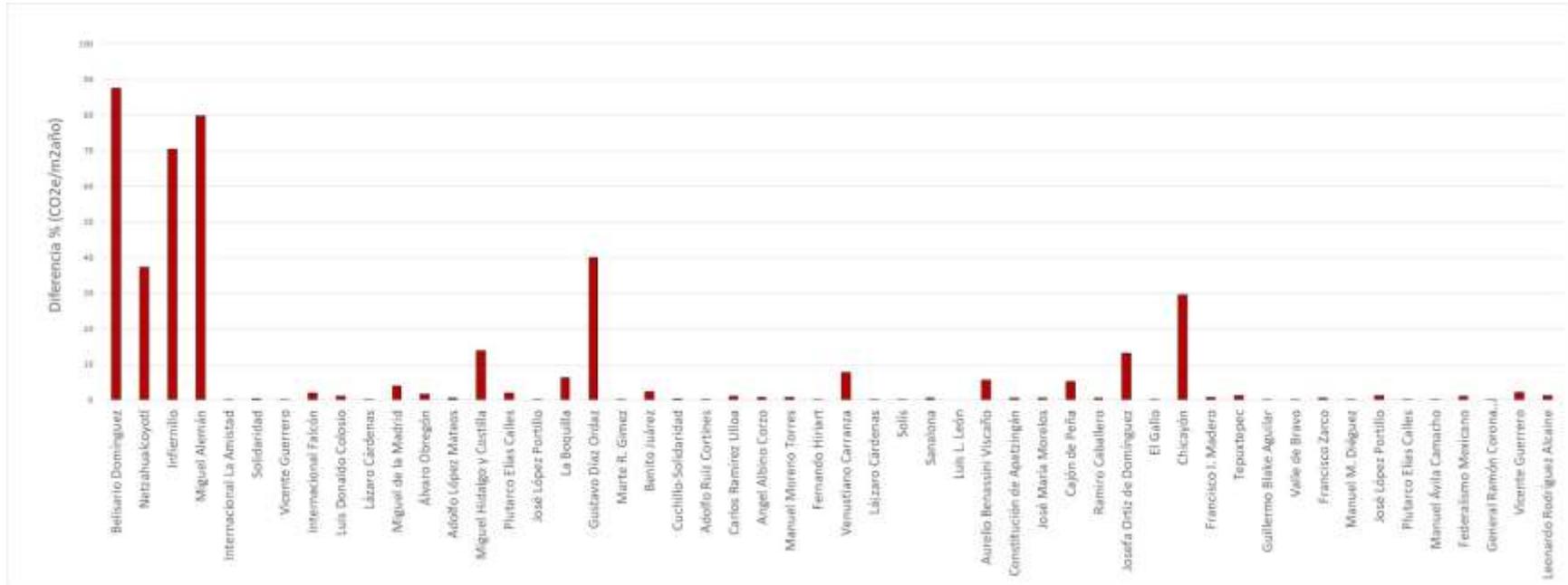
Finalmente, la Ilustración 5-39 muestra la participación del CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en la emisión a 100 años para el clima tropical, presentando 109.3 y 482.5 en mgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>d respectivamente. Nuevamente se hace evidente la mayor aportación por parte del CO<sub>2</sub> en los GEI.



**Ilustración 5-39 Emisión a100 años para clima tropical**

### 5.12 Comparación de modelos Gres y GRAT

En este apartado se analizan las diferencias entre los modelos utilizados en la cuantificación y predicción de los gases de efecto invernadero presentes en las presas de estudio. La Ilustración 5-1, muestra las diferencias porcentuales entre el total de emisiones calculado por el modelo Gres-tool y por el modelo GRAT. La mayor parte de las emisiones tienen una diferencia menor al 10%, por lo cual se puede decir que ambos tienen una estimación similar. Sin embargo, existen algunos casos donde la diferencia entre los modelos es mayor al 20% y con casos cercanos al 80%. Las diferencias anteriores pueden deberse a diversos factores, sin embargo, para efectos visuales de comparación, el modelo GRAT solo trabaja con cuatro factores para el cálculo de las emisiones, y no considera efectos previos al embalsamiento ni aspectos relacionados a las actividades antropogénicas, así como tampoco los usos de suelo.



**Ilustración 5-1 Diferencia porcentual de los modelos Gres-tool y GRAT**

Por su parte, el modelo Gres-tool, trabaja con un mayor número de variables de análisis y tiene en su cálculo las consideraciones que el modelo GRAT no utiliza, haciendo este una estimación más detallada que el primer modelo. Como parte de las variables consideradas, al no tener información referente a la materia orgánica, les da mayor peso a las emisiones de CO<sub>2</sub> que al CH<sub>4</sub> en las cuencas, pues no considera la interacción de este último con el medio de la cuenca.

## 6 Comparación a nivel estatal

Los dos modelos previamente revisados fueron utilizados para los embalses del estado de Morelos, y los resultados se compararon con las mediciones realizadas in situ. Para esto las unidades fueron homogenizadas a kg/m<sup>2</sup>mes, con la finalidad de poder realizar la comparación de manera adecuada. La Tabla 6-1 muestra la comparación de los resultados obtenidos de cada modelo para el cuerpo de agua del Rodeo. Se puede observar que los valores encontrados in situ resultan mayores que los modelos numéricos.

**Tabla 6-1 Comparación de métodos en El rodeo**

|  | <b>In situ</b> | <b>GRAT</b> | <b>GRES</b> |
|--|----------------|-------------|-------------|
| <b>Concentración<br/>kg/m<sup>2</sup>mes</b> | 0.370          | 0.143       | 0.230       |

Por otro lado, la Tabla 6-2 muestra los resultados obtenidos en el cuerpo de agua de Coatetelco con los tres diferentes métodos de análisis. Los resultados de cada uno de los muestreos realizados se encuentran en el apartado de ANEXO. De manera similar al caso de El rodeo, las mediciones in situ, resultaron con mayores emisiones.

**Tabla 6-2 Comparación de métodos en Coatetelco**

|  | <b>In situ</b> | <b>GRAT</b> | <b>GRES</b> |
|--|----------------|-------------|-------------|
| <b>Concentración<br/>kg/m<sup>2</sup>mes</b> | 0.363          | 0.155       | 0.230       |

## 7 Conclusiones

La medición insitu de la emisión de gases GEI en los tres principales cuerpos de agua de Morelos: El Rodeo, Coatetelco y Tequesquitengo, permitió establecer una baja contribución de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> a la atmosfera, por lo que no contribuyen al efecto de cambio climático global.

La aplicación de los modelos G res Tool y GRAT a las 52 principales presas del país, para la predicción de emisión de gases GEI mostraron que las presas Infiernillo, Belisario Domínguez, Chicayán y Miguel Alemán son las más altamente emisoras de gases GEI a la atmósfera, recomendándose realizar mediciones in situ para corrobora y/o ajustar estos modelos.

La comparación entre sí de los modelos G Res Tool y GRAT no mostraron diferencias significativas entre ellos, por lo que pueden utilizarse indistintamente para la predicción de emisión de gases GEI. El modelo GRAt es menos demandante en información que el modelo G Res Tool, pero este último parte de una base de datos global precargada que puede afinarse con información local si se dispone.

Los resultados de la batimetría realizada describen las principales características de las lagunas, sin embargo, se recomienda llevar a cabo más mediciones en la parte central de la laguna de Coatetelco para verificar las profundidades máximas de la laguna.

Los sedimentos de la Laguna del Rodeo y Coatetelco se consideran como una mínima fuente emisora de gases a la atmosfera, las máximas emisiones de metano se registraron en los sedimentos procedentes de El Rodeo.

Se debe realizar un mayor control sobre los diferentes factores influyentes en el proceso que son indispensables para su buen funcionamiento como lo son la temperatura y el pH.

Se desarrolló un sistema prototipo de captación y medición de volumen de gases (cámara flotante) de fácil implementación y uso con materiales apropiados para la toma de muestra adecuada y factible misma que se buscará su registro como modelo de utilidad.

La proyección de usos de suelo de los 52 cuerpo de agua analizados, muestran que el mayor porcentaje de uso de suelo se enfoca principalmente a los pastizales, con cerca del 50% de del suelo, mientras que los bosques y tierras de cultivo quedan en segundo y tercer lugar con el 30% y el 12% respectivamente, por otro lado, el menor uso corresponde a humedales con menos del 1%. Lo anterior impacta directamente con el comportamiento de los cuerpos de agua a la emisión de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, se revisaron las diferencias porcentuales entre el total de emisiones calculado por el modelo Gres-tool y por el modelo GRAT. La mayor parte de las emisiones tienen una

diferencia menor al 10%, por lo cual se puede decir que ambos tienen una estimación similar. Sin embargo, existen algunos casos donde la diferencia entre los modelos es mayor al 20% y con casos cercanos al 80%. Las diferencias anteriores pueden deberse a diversos factores, sin embargo, para efectos visuales de comparación, el modelo GRAT solo trabaja con cuatro factores para el cálculo de las emisiones, y no considera efectos previos al embalsamiento ni aspectos relacionados a las actividades antropogénicas, así como tampoco los usos de suelo.

Por su parte, el modelo Gres-tool, trabaja con un mayor número de variables de análisis y tiene en su cálculo las consideraciones que el modelo GRAT no utiliza, haciendo este una estimación más detallada que el primer modelo. Como parte de las variables consideradas, al no tener información referente a la materia orgánica, les da mayor peso a las emisiones de CO<sub>2</sub> que al CH<sub>4</sub> en las cuencas, pues no considera la interacción de este último con el medio de la cuenca.

Se puede decir que ambos modelos numéricos dependen de la información que se tiene para su alimentación, lo cual lleva a resultados en este caso subestimados. Principalmente debido a la falta de información relacionada con las descargas de agua negras o materiales orgánicos a los cuerpos de agua, como resultado de las actividades que se realizan en ellos.

## 8 ANEXO

**Tabla 8-1 Mediciones de concentración de metano in situ en El rodeo**

| PUNTO                  | Acumulado ppm | dt  | área de captura | área micro-cuenca | Concentración ppm/min | Concentración kg/día | Concentración kg/m <sup>2</sup> mes | Concentración ppm/m <sup>2</sup> mes | Por microcuenca Ton/mes |
|------------------------|---------------|-----|-----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| <b>Julio 2018</b>      |               |     |                 |                   |                       |                      |                                     |                                      |                         |
| <b>Insitu P1</b>       | 386           | 303 | 0.1427          | 6200000           | 1.273927393           | 0.001834455          | 0.386                               | 385659.87                            | 2391                    |
| <b>Insitu P2</b>       | 1817          | 307 | 0.1427          | 6200000           | 5.918566775           | 0.008522736          | 1.792                               | 1791745.51                           | 11109                   |
| <b>Insitu P3</b>       | 487           | 295 | 0.1427          | 6200000           | 1.650847458           | 0.00237722           | 0.500                               | 499766.01                            | 3099                    |
| <b>Insitu P4</b>       | 356           | 291 | 0.1427          | 6200000           | 1.223367698           | 0.001761649          | 0.370                               | 370353.78                            | 2296                    |
| <b>Insitu P5</b>       | 625           | 285 | 0.1427          | 6200000           | 2.192982456           | 0.003157895          | 0.664                               | 663888.17                            | 4116                    |
| <b>Septiembre 2018</b> |               |     |                 |                   |                       |                      |                                     |                                      |                         |
| <b>Insitu P1</b>       | 240           | 146 | 0.1427          | 6200000           | 1.643835616           | 0.002367123          | 0.498                               | 497643.30                            | 3085                    |
| <b>Insitu P2</b>       | 2013          | 849 | 0.1427          | 6200000           | 2.371024735           | 0.003414276          | 0.718                               | 717787.45                            | 4450                    |
| <b>Insitu P3</b>       | 206           | 892 | 0.1427          | 6200000           | 0.230941704           | 0.000332556          | 0.070                               | 69913.68                             | 433                     |
| <b>Insitu P4</b>       | 6400          | 902 | 0.1427          | 6200000           | 7.095343681           | 0.010217295          | 2.148                               | 2147994.72                           | 13318                   |
| <b>Insitu P5</b>       | 127           | 938 | 0.1427          | 6200000           | 0.135394456           | 0.000194968          | 0.041                               | 40988.37                             | 254                     |
| <b>Octubre 2018</b>    |               |     |                 |                   |                       |                      |                                     |                                      |                         |
| <b>Insitu P1</b>       | 386           | 329 | 0.1427          | 6200000           | 1.17325228            | 0.001689483          | 0.355                               | 355182.19                            | 2202                    |
| <b>Insitu P2</b>       | 1817          | 334 | 0.1427          | 6200000           | 5.44011976            | 0.007833772          | 1.647                               | 1646903.81                           | 10211                   |
| <b>Insitu P3</b>       | 487           | 341 | 0.1427          | 6200000           | 1.428152493           | 0.00205654           | 0.432                               | 432348.90                            | 2681                    |
| <b>Insitu P4</b>       | 356           | 345 | 0.1427          | 6200000           | 1.031884058           | 0.001485913          | 0.312                               | 312385.36                            | 1937                    |
| <b>Insitu P5</b>       | 625           | 346 | 0.1427          | 6200000           | 1.806358382           | 0.002601156          | 0.547                               | 546844.30                            | 3390                    |

**Tabla 8-2 Mediciones de concentración de metano in situ en Coatetelco**

| Puntos                 | Acumulado ppm | dt   | área de captura | área micro-cuenca | Concentración ppm/min | Concentración kg/día | Concentración kg/m <sup>2</sup> mes | Concentración ppm/m <sup>2</sup> mes | Por microcuenca Ton/mes |
|------------------------|---------------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| <b>Julio 2018</b>      |               |      |                 |                   |                       |                      |                                     |                                      |                         |
| <b>Insitu P1</b>       | 368           | 307  | 0.1427          | 1750000           | 1.198697068           | 0.001726124          | 0.363                               | 362885.17                            | 635                     |
| <b>Insitu P2</b>       | 1320          | 312  | 0.1427          | 1750000           | 4.230769231           | 0.006092308          | 1.281                               | 1280793.49                           | 2241                    |
| <b>Insitu P3</b>       | 2269          | 310  | 0.1427          | 1750000           | 7.319354839           | 0.010539871          | 2.216                               | 2215810.29                           | 3878                    |
| <b>Insitu P5</b>       | 1248          | 314  | 0.1427          | 1750000           | 3.974522293           | 0.005723312          | 1.203                               | 1203219.08                           | 2106                    |
| <b>Septiembre 2018</b> |               |      |                 |                   |                       |                      |                                     |                                      |                         |
| <b>Insitu P1</b>       | 240           | 146  | 0.1427          | 1750000           | 1.643835616           | 0.002367123          | 0.498                               | 497643.30                            | 871                     |
| <b>Insitu P2</b>       | 696           | 1217 | 0.1427          | 1750000           | 0.57189811            | 0.000823533          | 0.173                               | 173132.43                            | 303                     |
| <b>Insitu P3</b>       | 3000          | 1088 | 0.1427          | 1750000           | 2.757352941           | 0.003970588          | 0.835                               | 834741.75                            | 1461                    |
| <b>Insitu P4</b>       | 5530          | 1096 | 0.1427          | 1750000           | 5.045620438           | 0.007265693          | 1.527                               | 1527475.84                           | 2673                    |
| <b>Insitu P5</b>       | 781           | 1107 | 0.1427          | 1750000           | 0.705510388           | 0.001015935          | 0.214                               | 213581.28                            | 374                     |
| <b>Insitu P6</b>       | 4790          | 1114 | 0.1427          | 1750000           | 4.299820467           | 0.006191741          | 1.302                               | 1301697.58                           | 2278                    |
| <b>Octubre 2018</b>    |               |      |                 |                   |                       |                      |                                     |                                      |                         |
| <b>Insitu P1</b>       | 368           | 307  | 0.1427          | 1750000           | 1.198697068           | 0.001726124          | 0.363                               | 362885.17                            | 635                     |
| <b>Insitu P2</b>       | 1320          | 312  | 0.1427          | 1750000           | 4.230769231           | 0.006092308          | 1.281                               | 1280793.49                           | 2241                    |
| <b>Insitu P3</b>       | 2269          | 310  | 0.1427          | 1750000           | 7.319354839           | 0.010539871          | 2.216                               | 2215810.29                           | 3878                    |
| <b>Insitu P4</b>       | 1248          | 314  | 0.1427          | 1750000           | 3.974522293           | 0.005723312          | 1.203                               | 1203219.08                           | 2106                    |

## 8.1 Calidad del agua

Tabla 8-3 Calidad del agua muestreo Octubre de El rodeo

| Parámetros    | P            | S      | P            | M      | S      | P            | M      | S      | P            | M     | S      | P            | S     |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------------|-------|--------|--------------|-------|
| Puntos        | 1            |        | 2            |        |        | 3            |        |        | 4            |       |        | 5            |       |
| Prof          | 6.8          | -      | 8.2          | -      | -      | 10.5         | -      | -      | 10           | -     | -      | 6            | -     |
| Secchi        | 1.5          | -      | 1.5          | -      | -      | -            | -      | -      | 1.8          | -     | -      | 1.6          | -     |
| ppm Amonio    | 0.03         | 0.02   | -            | -      | 0.02   | 0.02         | 0.02   | 0.02   | 0.02         | 0.02  | 0.02   | 0.02         | 0.02  |
| OD            | 6.8          | 6.23   | 2.3          | 6.3    | 8.1    | 1.6          | 2.9    | 6.63   | 2.29         | 3.04  | 7.14   | 6.19         | 7.37  |
| Conductividad | 133          | 125    | 133          | 125    | 129    | 123          | 130    | 131    | 124          | 125   | 131    | 123          | 131   |
| kOhms         | 7.5          | 8      | 7.5          | 8.1    | 8.1    | 7.9          | 7.3    | 8      | 7.9          | 8.1   | 8.1    | 8            | 8.1   |
| ppm STD       | 67           | 63     | 67           | 62     | 62     | 63           | 66     | -      | 64           | 62    | 62     | 63           | 62    |
| PSU           | 0.06         | 0.06   | 0.06         | 0.06   | -      | 0.06         | 0.06   | 0.06   | 0.06         | 0.06  | 0.03   | 0.03         | 0.06  |
| °C            | 24.37        | 27.06  | 23.98        | 24.46  | 27.7   | -            | -      | -      | -            | -     | -      | -            | -     |
| PSI           | 13.036       | 13.041 | 13.047       | 13.048 | 13.056 | 13.054       | 13.052 | 13.054 | 13.049       | 13.05 | 13.055 | 13.053       | 13.05 |
| N             | 18° 46' 18.1 |        | 18° 46' 15.9 |        |        | 18° 46' 02.5 |        |        | 18° 46' 11.9 |       |        | 18° 46' 20.2 |       |
| W             | 99° 19' 05.5 |        | 99° 19' 14   |        |        | 99° 19' 24.5 |        |        | 99° 19' 31.8 |       |        | 99° 19' 35.6 |       |

**Tabla 8-4 Calidad del agua muestreo Octubre de Coatetelco**

| Parámetros    | P            | S      | P            | S      | P            | S      | P            | S      |
|---------------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| Puntos        | 1            |        | 2            |        | 3            |        | 4            |        |
| Prof          | 5.2          | -      | 5            | -      | 5.2          | -      | 5.2          | -      |
| Secchi        | 90           | -      | 90           | -      | 90           | -      | 90           | -      |
| mvPH          | -73.5        | -109.3 | -15.7        | -32.1  | 5.1          | -      | 5.5          | -17    |
| pH            | 8.24         | 8.67   | 7.21         | 7.58   | 6.9          | 7.39   | 7.06         | 7.3    |
| ORP           | 81.5         | 90.8   | 106.2        | 92.1   | 148          | 136.4  | 153.4        | 143    |
| OD            | 4.15         | 8.31   | 4.99         | 7.77   | 4.19         | 7.48   | 4.52         | 7.71   |
| Conductividad | 452          | 448    | 450          | 461    | 468          | 491    | 49           | 491    |
| kOhms         | 2.2          | 2.2    | 2.2          | 2.2    | 2.2          | 2.2    | 2.2          | 2.2    |
| ppm STD       | 20           | 225    | 225          | 225    | 225          | 224    | 226          | 226    |
| PSU           | 0.22         | 0.21   | 0.22         | 0.21   | 0.22         | 0.21   | 0.22         | 0.21   |
| °C            | 26.96        | 29.18  | 26.97        | 30.3   | 27.01        | 29.45  | 27.05        | 29.8   |
| PSI           | 13.81        | 13.197 | 13.2         | 13.196 | 13.177       | 13.177 | 13.162       | 13.163 |
| N             | 18° 44' 40.4 |        | 18° 44' 35.6 |        | 18° 44' 30.6 |        | 18° 44' 31.4 |        |
| W             | 95° 19' 53.9 |        | 92° 20' 06.1 |        | 93° 20' 14.4 |        | 99° 20' 21.2 |        |

**Tabla 8-5 Calidad del agua muestreo Noviembre de Coatetelco**

| Puntos               | P1            |        | P2            |        | P3             |        | P4            |        |
|----------------------|---------------|--------|---------------|--------|----------------|--------|---------------|--------|
|                      | P             | S      | P             | S      | P              | S      | P             | S      |
| <b>Prof</b>          | 4.6           | -      | 7             | -      | 9.9            | -      | 10.8          | -      |
| <b>Sechi</b>         | 1.3           | -      | 1.3           | -      | 1              | -      | 1.5           | -      |
| <b>mvPH</b>          | -71.1         | 80     | 94.3          | 99.6   | -33.5          | -98.8  | -14.3         | 83.3   |
| <b>pH</b>            | 8.17          | 8.36   | 8.63          | 8.69   | 7.51           | 8.66   | 7.21          | 8.4    |
| <b>ORP</b>           | 178.2         | 163.5  | 129           | 124.6  | 109.7          | 29.1   | -24.7         | -20.2  |
| <b>OD</b>            | 5.7           | 6      | 6.7           | 7.25   | 2.56           | 6.4    | 0.8           | 5.87   |
| <b>Conductividad</b> | 122           | 124    | 125           | 125    | 134            | 125    | 143           | 125    |
| <b>kOhms</b>         | 123           | -      | 8.1           | 8.1    | 7.4            | 8.1    | 6.9           | 8.1    |
| <b>ppm STD</b>       | 61            | 62     | 62            | 62     | 68             | 62     | 72            | 62     |
| <b>PSU</b>           | 0             | 0.06   | 0.06          | 0      | 0.06           | 0.06   | 0             | 0.03   |
| <b>°C</b>            | 25.33         | 25.35  | 25.34         | 25.41  | 24.63          | 25.37  | 24.39         | 25.38  |
| <b>PSI</b>           | 13.033        | 13.032 | 13.029        | 13.032 | 13.027         | 13.024 | 13.022        | 13.022 |
| <b>N</b>             | 18° 46' 23.9" |        | 18° 46' 10.4" |        | 18° 46' 09.9 " |        | 18° 46' 08.8" |        |
| <b>W</b>             | 99° 19' 06.4" |        | 99° 19' 09.9" |        | 99° 19' 14.8"  |        | 99° 19' 22.9" |        |