

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR  
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS GEOGRÁFICAS CON ENFASIS EN  
ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

**Desgasificación asociada a el lago del volcán Río Cuarto y su potencial de  
peligro sobre la comunidad de Río Cuarto**

**Trabajo de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de  
Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional para optar por el grado de Licenciatura  
en Ciencias Geográficas con énfasis en Ordenamiento Territorial**

**Christofer Jiménez Rivera**

**Heredia, Costa Rica**

**Octubre 2022**

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Geográficas con Énfasis en Ordenamiento del Territorio de la Universidad Nacional, para optar por el grado de Licenciatura en Ciencias Geográficas con Énfasis en Ordenamiento del Territorio.

### **Miembros del Tribunal examinador.**



Liliam Quirós Arias.

Representante de la decanatura de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar.



Ligia Hernando Echeverría

Directora Escuela de Ciencias Geográficas



Gustavo Barrantes Castillo.

Tutor



Maarten de Moor.

Lector



Geoffroy Avard.

Lector

## **Dedicatoria**

En el largo recorrido de nuestras vidas siempre contamos con el apoyo y sacrificio incondicional de nuestros padres, hermanos y demás familiares, para que cada uno de nosotros podamos cumplir los sueños que desde pequeños nos hemos fijado, luchado para alcanzar y hacer realidad. Por tal razón, espero que esta investigación sea una pequeña recompensa hacía mis padres y hermanos, como agradecimiento por todo el apoyo y sacrificio brindado durante estos años de constante trabajo y esfuerzo para obtener un título profesional.

## **Agradecimientos**

Uno de mis grandes sueños desde que estaba en la escuela era poder estudiar el volcán Turrialba algún día, ya que lo veía constantemente camino a mi escuela. Soñaba con algún día poder trabajar en el OVSICORI, compartir y aprender de esos grandes profesionales que veía por televisión. El primer día de universidad me acerqué al OVSICORI para ofrecer mis servicios, pero principalmente para aprender de aquellos profesionales; fue ahí donde me presentaron al Dr. Geoffroy Avard y él sin dudar me aceptó. Agradezco infinitamente a Geoffroy porque ese día estaba cumpliendo uno de mis grandes sueños, a lo largo de todo este tiempo me ha enseñado mucho de la rama de la vulcanología y de la ciencia y en todo momento sentí su apoyo incondicional.

Con los años conocí a los demás académicos del instituto, como el Dr. Maarten de Moor quien me ha enseñado y apoyado en gran medida en geoquímica y en la elaboración de esta investigación. También mi agradecimiento para la Dra. María Martínez, el Dr. Alejandro Rodríguez y al M.s.C José Sibaja.

Agradezco al personal del OVSICORI por el apoyo brindado durante todos estos años. Al Dr. Gustavo Barrantes, tutor de esta tesis, por el aporte de sus conocimientos, por su guía y paciencia a lo largo de esta investigación.

# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Justificación	15
1.3 Viabilidad del proyecto	18
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos específicos	19
<b>2. Marco teórico</b>	<b>20</b>
2.1. El riesgo de desastre	20
2.1.1 Los componentes del riesgo: amenaza y vulnerabilidad	22
<b>2.2 Amenazas y peligros volcánicos</b>	<b>24</b>
2.2.1 Formación de mares y lagos crátericos	26
<b>3. Metodología</b>	<b>28</b>
3.1. Tipo de investigación	28
3.2. Área de estudio	28
3.2.1 Ubicación geográfica	28
3.2.2 Características físicas del área de estudio	31
3.2.3 Aspectos sociales del área de estudio	32
3.4. Métodos utilizados para la recolección de datos	34
3.4.1 Medición de las concentraciones de gases disueltos emitidos en el lago Río Cuarto	36
3.4.2 Análisis de la composición de gases recolectados para la identificación y fuente de los gases potencialmente peligrosos sobre la población y actividades agropecuarias	39
3.4.3. Análisis de la acumulación de gas como peligro potencial para la población y actividad agropecuaria	42
3.4.4 Exposición física de las actividades agropecuarias y ser humano ante un eventual evento	43
<b>4. Resultados</b>	<b>48</b>
4.1 Datos recolectados en campo	48
4.1.1 Volumen de gas liberado en el lago	48
4.1.2 Medición de parámetro de temperatura y pH in situ	49
4.2 Concentración de CO <sub>2</sub> y el CH <sub>4</sub>	51
4.2.1 Razón CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	51
4.2.2 Composición isotópica $\delta^{13}C_{CH_4}$	52
4.2.3 Composición isotópica $\delta^{13}C_{CO_2}$	53
4.3 Volumen de agua y gas acumulado en el lago de Río Cuarto	54
4.3.1 Acumulación de gas en el lago de Río Cuarto con respecto de otras lagunas volcánicas	57
4.4 Evaluación del peligro por liberación y acumulación de gas	58
4.4.1. Dirección y velocidad predominante del viento	58

4.4.2 Localización de viviendas y coberturas de la tierra en el área de estudio. ....	61
4.4.3 Potencial de dispersión de gas en el área de estudio.....	65
4.4.4 Viviendas y zonas agropecuarias afectadas ante una posible erupción límnic.....	74
<b>5. Discusión de resultados.....</b>	<b>78</b>
5.1. Origen y composición del gas encontrado en el lago de Río Cuarto.....	78
5.2 Estratificación de capas en el lago.....	81
5.3 Gas acumulado en el lago y su posible potencial de peligro sobre la comunidad de Río Cuarto y sus actividades agropecuarias.....	82
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>87</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>90</b>
7.1 Fichas técnicas y simbología utilizada en la investigación.....	90
7.2 Procedimientos detallados del análisis de las muestras recolectadas en el campo. ....	93
7.2.1 Análisis isotópico de CH <sub>4</sub> .....	93
7.2.2 Análisis de la composición isotópica del CO <sub>2</sub> .....	95
7.2.3 Cálculo de la acumulación de gas liberable en el lago de Río Cuarto. ....	96
7.2.4 Cálculo de la acumulación de gas disuelto en el lago de Río Cuarto.....	98
7.3 Resultados de los análisis detallados. ....	100
7.3.1 pH tomado in situ.....	100
7.3.2 Resultados detallados del cálculo de agua y acumulación de gases presente en el lago de Río Cuarto.....	101
7.4 Figuras tomadas con el dron para validar el mapa de coberturas de la tierra.....	104
<b>1. Referencias bibliográficas .....</b>	<b>124</b>

## Mapas y Figuras

Mapa 1. Muestra el área de estudio y su contexto espacial.....	30
Mapa 2. Estaciones Meteorológicas utilizadas en la investigación.....	59
Mapa 3. Viviendas independientes en el Cantón de Río Cuarto.....	62
Mapa 4. Coberturas de la Tierra del área de estudio.....	64
Mapa 5. Modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	66
Mapa 6. Modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	67

Mapa 7. Modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	68
Mapa 8. Modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	69
Mapa 9. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	70
Mapa 10. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	71
Mapa 11. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	72
Mapa 12. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	73
Mapa 13 Coberturas de la tierra con sobre posición de escenario de concentración de gas al Medio día.....	76
Mapa 14 Coberturas de la tierra con sobre posición de escenario de concentración de gas al Media noche.....	87
Figura 1. Solubilidad del CO <sub>2</sub> según temperatura y presión.....	12
Figura 2. Diagrama de la metodología por seguir.....	35
Figura 3. Metodología para la extracción de muestras en el lago.....	37
Figura 4. Batimetría del lago Río Cuarto.....	39
Figura 5. Modelo 3D del fondo de el lago con volumen y hectáreas de agua que posee.....	54
Figura 6. Clasificación del origen de CH <sub>4</sub> basado en su composición isotópica dD y δ <sup>13</sup> C <sub>PDDB</sub> .....	79
Figura 7. Forma batimétrica aproximada que presenta el lago de Río Cuarto.....	89

## Cuadros

Cuadro 1. Variables consideradas en la investigación. ....	33
Cuadro 2 . Rangos de exposición para el ser humano y animales.....	47
Cuadro 3. Rangos de exposición de gas para los cultivos .....	47
Cuadro 4. Resultados de gas acumulado en ml/L en el lago de Río Cuarto.....	49
Cuadro 5. Datos obtenidos in situ de temperatura dados en °C, en el lago de Río Cuarto .....	50
Cuadro 6. Resultados de la razón CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> . .....	51
Cuadro 7. Resultados obtenidos de δ <sup>13</sup> C <sub>CH<sub>4</sub></sub> de las muestras recolectadas en campo y los datos de Cabassi et al (2014), de el lago de Río Cuarto .....	52
Cuadro 8. Resultados de δ <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub> de el lago Río Cuarto.....	53
Cuadro 9. Volumen total de el lago de Río Cuarto.....	55
Cuadro 10. Volmen Total de gas acumulado liberado según capas.....	55
Cuadro 11. Volumen total de CO <sub>2</sub> disuelto según capa y volumen total del sistema.....	56
Cuadro 12. Volumen de gas total acumulado en el lago de Río Cuarto (Gas disuelto + gas liberable.....	57
Cuadro 13. Comparación de volúmenes de gas acumulado de Río Cuarto con respecto a otros lagos .....	58
Cuadro 14. Promedio mensual de la velocidad y dirección del viento m/s del 2016 hasta el 2020.....	60
Cuadro 15. Muestra las edificaciones en cada área del cantón y del área de estudio.....	63
Cuadro 16. Muestras las hectáreas de cada cobertura identificada en el área de estudio.....	63
Cuadro 17. Número de viviendas expuestas a las concentraciones de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> para el escenario 1.....	75

Cuadro 18. Número de viviendas expuestas a las concentraciones de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> para el escenario 2 .....	75
---	----

Cuadro 19. <i>Porcentaje de personas según edades que viven en el cantón de Río Cuarto</i> .....	79
--	----

### Gráficos

Gráfico 1. Dirección y velocidad del viento predominante del 2016 al 2020.....	60
--	----

Gráfico 2. Velocidad y Dirección del viento m/s según visita de campo realizada a la laguna de Río Cuarto. ....	61
---	----

### Anexos

Cuadro 20. Ficha técnica de recolección de muestras .....	90
---	----

Cuadro 21. Símbolos y abreviaturas utilizadas en el proyecto con sus significados .....	91
---	----

Cuadro 22. Ejemplo de calibración del estándar. Caso Diciembre 2019. ....	94
---	----

Cuadro 23. Resultados in situ del pH en el lago de Río Cuarto .....	100
---	-----

Cuadro 24. Volumen de agua que se encuentra en cada capa muestreada en el lago de Río Cuarto.....	101
---	-----

Cuadro 25. Resultados y calibración el volumen total de gas acumulado liberable de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub> .....	102
--	-----

Cuadro 26. Acumulación de gas disuelto en el lago según capa muestreada. ....	102
---	-----

Figura 9. Imagen del drone hacia el sector oeste de el lago de Río Cuarto.....	104
--	-----

Figura 10. Sector noroeste de el lago .....	104
---	-----

Figura 11. Sector Noreste de el lago.....	106
---	-----

Figura 12. Centro de Río Cuarto hacia el este-sureste de el lago .....	107
--	-----

Figura 13. Sector sur de el lago.....	108
---------------------------------------	-----

Figura 14. Sector noroeste de el lago .....	109
---	-----

Figura 15. Imagen satelital para la identificación de las coberturas de la Tierra .....	110
---	-----

Figura 16. Imagen satelital para la identificación de las coberturas de la Tierra .....	110
Figura 17. Equipo de trabajo de febrero del 2020 en el lago de Río Cuarto, en la extracción de muestras.....	111
Figura 18. Realizando pruebas en laboratorio, para obtener el mejor método de análisis de las muestras.....	112
Figura 19. Analizador de Isótopos, Picarro G2201-i. En proceso de análisis .....	112
Mapa 15. Estaciones meteorológicas utilizadas para el modelo Aermod .....	113
Mapa 16. Viviendas que se encuentran dentro de las zonas de distribución y afectación de gas en el cantón de Río Cuarto.....	114
Mapa 17. Modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día. ....	115
Mapa 18. Modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	116
Mapa 19. Modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	117
Mapa 20. Modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche. ....	118
Mapa 21. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	119
Mapa 22. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	120
Mapa 23. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A medio día.....	121
Mapa 24. Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora. A media noche.....	122
Mapa 25. Mapa de coberturas de la Tierra del área de estudio. ....	123

# 1. Introducción

## 1.1 Planteamiento del problema

El 16% de los volcanes activos en el mundo cuentan con un lago cratérico con exhalación de gases, formada por constantes erupciones freáticas, freatomagmáticas o magmáticas, de dimensiones variadas (Delmelle, et al. 2015). Sin embargo, estos volcanes no siempre presentan una geomorfología cónica ni tampoco presentan periodos de erupciones en las últimas décadas como es el caso del Arenal, Irazú, Turrialba y Poás. No obstante, estos autores indican que algunos volcanes pueden presentar en ocasiones una desgasificación pasiva asociada a su actividad que no es percibida por la población pero que representa un peligro eminente.

A escala mundial son varios los incidentes que se han presentado debido a explosiones de gas en lagos crátericos, conocidas como erupciones límnicas. Estas se producen por la acumulación de gases volcánicos producto de la estratificación del agua de el lago, donde las aguas profundas no se mezclan con las superficiales. Las presiones que se encuentran en lagos profundos favorecen la acumulación de gases, principalmente CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), en lagos neutrales en términos de pH (Kusakabe, et al. 2008). Este es el caso del lago Nyos en Camerún, un maar que presenta actividad de desgasificación pero sin conocer el tipo y volumen de gas contenido. En 1986 ocurrió la repentina muerte de al menos 1700 personas y un centenar de heridos producto de la liberación de grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, distribuido con ayuda del viento por casi toda la comunidad aledaña (BBC News, 2018).

Kusakabe et al. (2008), mencionan que en 1985 el lago Monoun, al oeste de Camerún, también presentó una explosión de gas que dejó un saldo de 100 muertos y otro centenar de heridos. Este lago contaba con una liberación pasiva de gases; sin embargo, los científicos no tenían conocimiento de la cantidad de gas que se estaba acumulando a profundidad.

Una conferencia científica internacional realizada en Camerún después de ambas erupciones (llamada causas del desastre del lago Nyos), contó con la presencia de autoridades de la UNESCO y del Ministerio de Educación Superior e Investigación Científica de Camerún, con el objetivo de

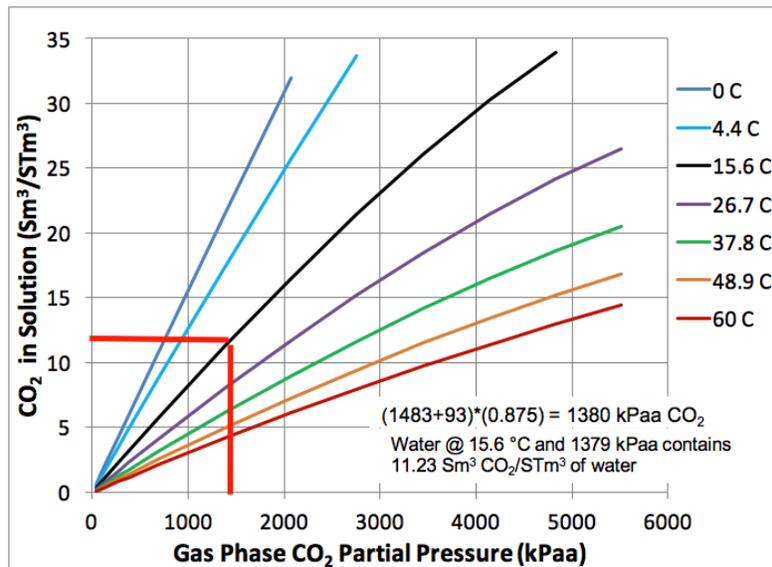
determinar las causas de las muertes de las personas. Se concluyó que la causa fue una repentina liberación de  $\text{CO}_2$  que se encontraba disuelto en el agua del lago bajo grandes presiones, a consecuencia de un evento climático que provocó un cambio en los estratos del lago (Giggenbach, 1989).

Pérez (2011) estima que excluyendo la contribución de  $\text{CO}_2$  producto del océano, el vulcanismo subaéreo emite alrededor de 300 Mt (millones de toneladas) por año de  $\text{CO}_2$ , según el volcán que se esté estudiando y el área de el lago. Este autor clasifica los lagos volcánicos en tres categorías, de acuerdo con su potencial de emisión de gas: ácidos, alcalinos y neutros. Los lagos ácidos tienen la capacidad de liberar a la atmósfera prácticamente el total de  $\text{CO}_2$  que entra al sistema, debido a sus altas temperaturas y bajas concentraciones de pH y el poco aporte de  $\text{CO}_2$  al sistema. Los lagos alcalinos son los que menos gas aportan a la atmósfera por su capacidad de almacenamiento por grandes períodos bajo grandes presiones, debido a que prácticamente todo el  $\text{CO}_2$  está presente en  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonato) y en  $\text{CO}_3^{2-}$  (carbonato) en el agua, del cual únicamente escapa una pequeña fracción y el resto queda atrapada por precipitación o filtración del carbonato. Asimismo, los neutros cuentan con capacidad de almacenar cantidades de  $\text{CO}_2$  en menor medida que los lagos alcalinos, debido a su baja actividad, emisión de gas, diferencias de temperatura y oxígeno a profundidad.

Por su parte, Querol et al. (2019) mencionan que el vulcanismo es uno de los principales mecanismos de transferencia de carbono y otros volátiles a la atmósfera, que han afectado el clima del planeta a través del tiempo geológico. En una investigación realizada entre 2005 y 2015, estos autores estudiaron la emisión de  $\text{CO}_2$  de 900 volcanes alrededor del mundo, divididos en 3 categorías para las emisiones pasivas en volcanes no desgasificadores, hidrotermales y magmáticos. De estos 900, 548 volcanes no presentaron ninguna emanación de gas, 278 son hidrotermales con un flujo de emisiones de 0,013 Tg/año (teragramos por año), siendo a escala mundial un total de 51,3 Tg/año de  $\text{CO}_2$ . Para los magmáticos se obtuvieron 74 volcanes con un flujo de 0,16 Tg/año; sin embargo, se encontraron otros 66 volcanes con emisiones fuertes de gas, con un total de 22,9 Tg/año de  $\text{CO}_2$ . Todos estos valores se estiman a partir de una relación C/S conocida (carbono/azufre).

Valencia et al. (2012), mencionan que la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua también es un factor importante por considerar en la acumulación de gas, debido a que depende de la temperatura y presión, es decir, el CO<sub>2</sub> en el agua a baja presión y temperatura es más soluble. Por ejemplo, con una temperatura de 15,6°C y una presión aproximada de 4900 kPaA (kilo pascales) la solubilidad es aproximada a 34 Sm<sup>3</sup>/STm<sup>3</sup> (Figura1). Esto también depende de la presencia de sales en el agua, ya que a mayor presencia de sales decrece la solubilidad del gas, por lo cual genera estratos a profundidad que permiten la acumulación de gas.

Figura 1  
Solubilidad del CO<sub>2</sub> según temperatura y presión



Tomado de: Valencia et al. (2012)

El lago de Río Cuarto en Costa Rica presenta una estratificación en dos capas denominadas epilimnion e hipolimnion (las cuales permiten una acumulación de gas a profundidad). La primera hace referencia a las aguas superficiales con un aumento en las temperaturas y grandes concentraciones de oxígeno, mientras que la hipolimnion son las aguas profundas donde las

temperaturas y el oxígeno disminuyen y el CO<sub>2</sub> hidrotermal aumenta (Cabassi et al. 2014). Asimismo, mencionan que el lago presenta una diferencia de densidad y de temperatura en la capa vertical a partir de los 40 m, con una variación de dos grados Celsius, por lo que presenta propiedades en estratos, es decir, que las capas superficiales y profundas no se mezclan entre sí (lo cual genera una acumulación de gas). Esto se denomina un proceso hipolimnion.

Alvarado et al. (2011) indican que el lago Río Cuarto es en realidad parte de un volcán muy joven con una edad aproximada de entre 3 y 4 Ka (mil años), que presentó erupciones gracias a una fractura cortical profunda que cruza la falla inversa de San Miguel y que se encuentra alineada con los volcanes Poás, Río Cuarto, Congo y Bosque Alegre (Denyer et al. 2009). Estas fracturas favorecen un ascenso del magma que al entrar en contacto con un cuerpo de agua superficial (tipo acuífero, río o lago) generan una vaporización repentina del agua y provocan grandes explosiones de tipo freatomagmáticas, que son responsables de la formación del cráter.

Recientes investigaciones han determinado que el lago de Río Cuarto presenta algunos puntos de emanación de gases. En una visita académica realizada por los doctores Gustavo Barrantes y Theofilo Turkeridis (de la Universidad Nacional de Costa Rica y la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador), en noviembre del 2015, observaron algunas emanaciones de gas en el lago, vistas también por pobladores y turistas de la zona.

A su vez, en Alvarado et al. (2011) se cita la aparición de evidencias de erupciones ocurridas en el pasado (no límnicas), con presencia de fragmentos juveniles vesiculares de composición andesítica, entre otros. Estos autores indican, a través de datos proporcionados por los habitantes, han ocurrido algunas erupciones límnicas en reiteradas ocasiones. La primera observación se dio en 1920, luego en 1971, 1991 y el último avistamiento de este fenómeno fue en el año 2010, caracterizado por cambios en el color y la temperatura del lago así como la muerte de peces. Estos hechos fueron narrados por el propietario de una finca donde se ubica parte del lago. Por su parte, la Red Sismológica Nacional (2008) indica que el lago de Río Cuarto no cuenta con una actividad importante o evidente por lo que consideran que es un volcán dormido, sin embargo presenta

algunas emanaciones de gases y cambios en la coloración de agua a tonos rojizos, que pueden ser atribuidos a un efecto limnológico climático o a una actividad volcánica.

A partir del análisis surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿qué composición presentan estos gases acumulados? ¿Cómo se originan estos gases? ¿Son producto de una inyección de magma a profundidad o de una desgasificación superficial (por ejemplo descomposición de materia orgánica)? Por otro lado, es importante conocer si estos gases presentan un potencial de peligro para los poblados aledaños al maar. Estos planteamientos son de vital importancia, tanto para la comunidad científica con el fin de comprender de mejor manera el comportamiento de estos sistemas, como para los ciudadanos que habitan en los alrededores del lago de Río Cuarto, ya que estas acumulaciones pueden tornarse potencialmente peligrosas si no se conoce la acumulación del gas y el alcance que tendrían ante un evento. La liberación de este tipo de gases puede ser invisible al ojo humano e incluso pueden presentarse incoloros, lo cual aumenta el peligro a la vida de los pobladores.

En Cabassi et al. (2014), se analiza un muestreo realizado únicamente en los meses de enero y febrero del año 2010. En este estudio será importante analizar diferenciaciones en la acumulación de gas en las dos épocas del año (seca y lluviosa), a través de una serie de tiempo que permita obtener datos más detallados y concretos recopilados con una estrategia de monitoreo para comprender los mecanismos de acumulación y liberación de gases asociado a esta laguna. Esto permitirá entender y estar preparados ante los cambios que pueden ocurrir en el lago ante una erupción límnic.

Lo ya mencionado se complementará con el análisis de peligrosidad sobre los habitantes y actividades agropecuarias desarrolladas en la zona de estudio.

El cantón de Río Cuarto tiene una población proyectada al año 2019 de 15484 habitantes (INEC, 2011), dedicada principalmente a actividades agropecuarias como el cultivo de girasol (23 mil hectáreas), el maíz (199300 hectáreas) y la soja (97500 hectáreas) (Municipalidad Río Cuarto,

2011). Por esta razón, una repentina liberación de gases puede provocar un impacto negativo y representa un peligro que ha sido poco estudiado.

## **1.2 Justificación**

Los gases volcánicos han provocado una gran cantidad de muertes, tanto humanas como animales en el siglo XX; sin embargo, han sido pocos los estudios relacionados con este tipo de actividades y Costa Rica no es la excepción. El país cuenta con una gran cantidad de volcanes con lagos cratéricos (como los volcanes Rincón de la Vieja, Poás e Irazú), con emanaciones fumarólicas y erupciones periódicas. También se encuentran volcanes con cráter de explosión como Bosque Alegre, Laguna Hule, Congo y Laguna Río Cuarto, los cuales presentan emanaciones pasivas de gas (Tassi et al. 2009).

Estos gases volcánicos liberados ( $\text{CO}_2$ ), ya sea por vulcanismo sub-aéreo o pasivo, son de los principales contribuyentes de  $\text{CO}_2$  no antropogénico a la atmósfera (Kusakabe et al. 2008), además representan un peligro alto para la población civil. Entre los más tóxicos se encuentra el  $\text{SO}_2$ , HCl,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ , HF,  $\text{CH}_4$  y CO (International Volcanic Health Hazard Network, S.F).

A partir del año 1900 se han registrado una gran cantidad de incidentes con emisión de gases volcánicos. Entre ellos está la explosión del lago Dieng en Indonesia en 1979, debido a un gran escape de  $\text{CO}_2$  que causó la muerte de 143 personas y más de 1000 heridos (International Volcanic Health Hazard Network, S.F.), la erupción límnic del lago Nyos en 1986 y también en 1985 en el lago Monoun, Camerún, que dejó como saldo alrededor de 100 fallecidos por la liberación espontánea de  $\text{CO}_2$  (Kusakabe et al. 2008).

A consecuencia de los incidentes, los gobiernos de Estados Unidos y Camerún realizaron obras en las que insertaron tuberías a unos 73 m de profundidad con la finalidad de generar una degasificación continua y controlada de los gases en varias capas (estratos de el lago), para evitar de esta manera la acumulación. Sin embargo, fue necesaria la instalación de dos tuberías más en

2003 debido a la gran cantidad de gases que se encuentran en el lago. De esta manera, se logró una reducción de CO<sub>2</sub> en las primeras capas, pasando de 607 mega moles a 422 mega moles en la desgasificación controlada (Kusakabe et al. 2008).

A la vez, es importante conocer acerca de los gases liberados por este proceso de lagos en cuanto a tipo y concentraciones de exposición. Uno de los principales gases es el CO<sub>2</sub>, que es incoloro e inoloro y puede encontrarse de forma diluida bajo presión como el caso de los lagos. También es una sustancia que puede causar quemaduras e irritación en la piel y ojos (NJ Health, 2016). Otra de sus principales características es que el CO<sub>2</sub> es 1,5 veces más pesado que el aire (1,80 g/L) por lo que se distribuye por debajo del mismo y permite una acumulación en depresiones (Metz, et al. 2005). En grandes cantidades, este gas puede causar temblores en el cuerpo y una intoxicación aguda que provocan problemas serios en el cerebro como cambios en la personalidad, convulsiones e incluso la muerte. El límite de exposición respiratoria para evitar los síntomas y daños anteriormente mencionados es de 300 000 ppm (NJ Health, 2016).

En el caso del medio ambiente, en Gerlach et al. (2000) se expone un estudio de concentraciones y flujos de CO<sub>2</sub> en el suelo sobre la montaña Mammoth en California, con el fin de determinar la muerte de gran cantidad de árboles y especies de fauna de la zona. En el estudio concluyeron que entre los años 1995 y 1999 existía un flujo de CO<sub>2</sub> de entre 46 y 236 toneladas diarias, con un promedio de 96 toneladas diarias. Estos mismo autores, por medio de análisis y evaluaciones, estimaron que las concentraciones causantes del daño y la muerte de flora eran a partir de una acumulación de CO<sub>2</sub> del 36 % diario (360 000 ppm). Esto provocó la infertilidad del suelo y aumentó la producción de ciertas bacterias dañinas para la flora.

En cuanto al metano (CH<sub>4</sub>), Etiope et al. (2013) mencionan que el metano biótico es de los reservorios más grandes que existen, mientras que es poco común encontrar reservorios de metano de tipo abiótico. Sin embargo, en estado natural estos dos se mezclan y es casi imposible diferenciarlos a pesar de la tecnología. Estas autoras mencionan que en los volcanes no solo se libera CH<sub>4</sub> abiótico en procesos posmagmáticos, sino que también se libera CH<sub>4</sub> biótico, producto de la descomposición orgánica atrapada en los sedimentos; por lo que se estima que en el mundo la liberación de este gas oscila entre 3 y 6 Tg/año (teragramo/año). Entre sus características se

encuentran que no presenta color, olor y en forma de gas en estado natural. Esta sustancia en grandes cantidades puede reducir el oxígeno en el aire y provocar mareos, vómito, asfixia; incluso puede provocar incendios debido a que es altamente inflamable en concentraciones superiores a 19,5% ( 195 000 ppm), (NJ Health. 2016).

Por lo tanto, basados en los estudios e incidentes presentados en otros países, esta investigación es de vital relevancia tanto para la comunidad de Río Cuarto como para la comunidad científica, ya que en estudios anteriores (Cabassi et al. 2014) únicamente se han realizado muestreos en dos meses del año sin ser tomados en cuenta factores como la época seca, lluviosa y el comportamiento dinámico del lago. A la vez, este estudio permitirá conocer la composición de los gases liberados por el lago de Río Cuarto, así como su procedencia (si son producto de una inyección profunda, lo que indica una actividad volcánica, o bien producto de una descomposición orgánica). A partir de los datos recolectados se logrará determinar el volumen de gas acumulado, con lo cual se analizará el posible peligro que representa para los habitantes de Río Cuarto y sus actividades agropecuarias, debido a que el CO<sub>2</sub> puede causar infertilidad del suelo y generar un aumento de bacterias tolerantes a este gas, lo que provocaría serios daños sobre las siembras e incluso una contaminación en el agua que puede causar la muerte al ganado si la ingiere (Gerarld et al. 2009).

El lago Río Cuarto cuenta con una desgasificación pasiva posiblemente de origen volcánico, ya que al realizar un análisis geológico a través de la sismicidad histórica se concluye que se asienta sobre una falla cortical profunda llamada Falla San Miguel, que se extiende desde Aguas Zarcas y pasa por el volcán Poás, Congo, Río Cuarto y Bosque Alegre (Alvarado et al. 1993).

Desde 1920 se generan liberaciones de gases repentinas cada cierto tiempo, producto de las emanaciones de gases y características estratigráficas presentes en Río Cuarto, avistadas por cambios en la coloración del lago, temperatura y muerte de peces. Estos eventos tienen un comportamiento cíclico, vistos posteriormente en 1977, 1997, 2001 y el último en 2010 (Alvarado et at. 2011). Este tipo de actividad en el lago se debe a una liberación repentina de gas (erupción límnic) que se ha dado cada cierto tiempo y se produce gracias a cambios anómalos en el clima,

que originan un enfriamiento del agua poco profunda y activan la salida del agua más profunda que cuenta con una carga importante de gases de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (Cabassi et al. 2014).

Sin embargo, estos mismos autores indican que las concentraciones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> pueden ser de origen meteórico (descomposición orgánica de los elementos a profundidad). Por otro lado, dentro del complejo Recreo Verde se encontró un 99,44% de concentración de CO<sub>2</sub> y 2,30 X10<sup>-04</sup> % de CH<sub>4</sub> (gases provenientes del manto), por lo que puede tener alguna similitud con las concentraciones de CO<sub>2</sub> en Río Cuarto (De Moor et al. 2017).

La presente investigación es también pertinente para la actividad turística, ya que es una zona que ofrece atractivos turísticos que pueden ser explotadas de manera responsable y sostenible, que pueden adaptarse a regulaciones y ofrecer seguridad a los visitantes a partir de la planificación y gestión del posible riesgo.

### **1.3 Viabilidad del proyecto**

Para esta investigación se cuenta con el apoyo del programa de Geomorfología Ambiental de la Escuela de Ciencias Geográficas a través del tutor propuesto para este proyecto de graduación: el Dr. Gustavo Barrantes Castillo. Así mismo, se dispone de la asesoría de académicos del OVSICORI, como el Dr. Maarten de Moor, experto en gases volcánicos, y el Dr. Geoffroy Avard, experto en petrología ígnea. A través de su participación se asegura el acceso a equipo especializado como el analizador de isótopos de carbono (Dióxido de Carbono) y metano (Picarro G2201-i) para el análisis de las muestras, así como balsas, tuberías, viales, bombas de extracción de agua para la recolección de datos en campo. Además, se encuentra con el apoyo del Dr. Alejandro Rodríguez personal del OVSICORI y del MSc. José Sibaja, director del departamento de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional.

Se contará con el transporte marítimo y terrestre con el acompañamiento del Dr. Maarten de Moor gracias al interés de este instituto sobre el proyecto.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Evaluar el peligro potencial sobre la población y actividades agropecuarias circundantes a el lago de Río Cuarto, mediante la identificación de la composición de los gases presentes en el lago y posible difusión de los datos obtenidos.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Determinar el origen de los gases disueltos mediante el análisis de su composición a través del analizador isotópico de carbono y metano Picarro G2201-i.
2. Evaluar la cantidad de gas acumulado en el lago de Río Cuarto y si su potencial de almacenamiento representa un peligro inminente.
3. Analizar el potencial de peligro que implica la acumulación y liberación de gas para la población y la actividad agropecuaria.

## 2. Marco teórico

### 2.1. El riesgo de desastre

La geografía es una ciencia que se encarga del estudio de las relaciones del ser humano entre sí y con la naturaleza, incorpora la complejidad social y su imaginario, a través de las diversas percepciones del entorno que les rodea, integrando diversos elementos presentes en la superficie terrestre que adquieren un significado y relevancia del espacio y las actividades humanas que en ella se desarrollan (Bayón, 2016).

Desde el siglo XVIII los científicos desarrollaron un mayor interés en temas de riesgo presentes en la sociedad, por lo que, según Martínez (2009), se empezó a trabajar y cuestionar tres posibles visiones: la primera únicamente tomando en consideración el estudio de los fenómenos naturales, la segunda por medio de una explicación teológica y la tercera realizando una relación entre los desastres y la participación del ser humano, en el que los procesos volcánicos es uno de los temas con mayor interés. Para Martínez, es a partir del siglo XIX que el papel del geógrafo en el riesgo evoluciona y adquiere una mayor relevancia, asumiendo mayores responsabilidades, considerando aspectos físicos y humanos en cuanto a afectación y dependencia se refiere, sobre la superficie a través estudios científicos.

El riesgo es una combinación de la amenaza con la vulnerabilidad, por lo que se debe de considerar la amenaza y el grado de exposición al que un individuo se encuentra expuesto ante algún evento. Reyes (2017) menciona que es importante estudiar la amenaza desde una perspectiva de exposición, de acuerdo con la distribución poblacional y las condiciones de infraestructura. La vulnerabilidad se entiende como la susceptibilidad de una comunidad ante el impacto de una amenaza.

El geógrafo Belkis (2011) indica que el riesgo es una posibilidad o probabilidad de que algo malo ocurra en un lugar determinado, causando daños. Dependiendo del tamaño y la afectación generada así será el tamaño del riesgo. Por lo tanto, cada vez que el ser humano saca cuentas de

los costos o beneficios de las decisiones tomadas, está evaluando el riesgo de que algo dañino pueda ocurrir ya sea con ventajas o desventajas.

Este concepto se ha ido introduciendo en la ciencia, poco a poco y con ayuda de las nuevas tecnologías, convirtiéndose en un concepto dinámico, multifacético y abarcado por muchas ramas de la ciencia (Belkis, 2011). Calvo y García (2001) definen el riesgo como *la capacidad de prevención, mitigación y recuperación tras el peligro que dispongan las poblaciones*, por lo que los acontecimientos naturales son capaces de incorporar una gran potencialidad de dañar o provocar peligro a la humanidad. Estos mismos autores mencionan que el riesgo depende también del punto de vista desde el que se trate, ya que si se mira desde la estadística este puede tomarse como una anomalía, pero si se mira desde el punto de vista genético se puede considerar un fenómeno natural que tiene avistamientos cada cierto periodo. Sin embargo, con el pasar de los años y la intervención humana, estos avistamientos son cada vez más repetitivos y agresivos.

El interés entre las comunidades científicas por estudiar los riesgos sobre las comunidades hoy día es mayor. Para Bayón (2016), esta rama interdisciplinaria se presenta en diversas dimensiones pero en un espacio determinado, en el cual el análisis del geógrafo juega un papel determinante desde la visualización sistemática de las condiciones naturales y sociales, lo que permite elaborar políticas dentro de la gestión basada en el concepto de “riesgo aceptable”. Sin embargo, a las personas, dentro de su percepción de riesgo, se les dificulta el enfrentar las amenazas naturales a las que pueden estar expuestas.

Para Ferrando y Francisco (2004), las ciudades y poblados no se asientan en espacios homogéneos o bien donde las malas decisiones no van a generar consecuencias, más bien se asientan sobre sistemas naturales complejos, operativos y permanentes donde la naturaleza posee su propia dinámica, por lo que el ser humano debe tener una conciencia de respeto hacia la naturaleza y con las actividades que en ella se desarrollan.

Según estos autores mencionados anteriormente, dentro del ambiente y la sociedad debe existir un mínimo de intervención con la finalidad de minimizar los riesgos. Sin embargo, las

ciudades cuentan con una dinámica de expansión, en la que no se ejecuta un plan donde las intervenciones del hombre sean mínimas, por lo que los efectos a corto, mediano y largo plazo son desastrosos (Ferrando y Francisco, 2004).

Ferrando y Francisco (2004), los desastres no son un tema en el que se deba culpar a los procesos naturales, más bien corresponden a la falta de planificación y respeto que la sociedad tiene hacia el ambiente. Los focos urbanos y su expansión están siendo dirigidos en la mayoría de casos hacia lugares en el que existe un riesgo inminente, por ejemplo, construcciones cerca de amenazas volcánicas con emanación de gases. Este tipo de circunstancias son las que en ocasiones generan pérdidas humanas y monetarias, que en el vulcanismo ascienden a los 300 mil millones de dólares en pérdidas materiales (Ferrando y Francisco, 2004).

### **2.1.1 Los componentes del riesgo: amenaza y vulnerabilidad**

La vulnerabilidad es un concepto que ha sido implementado por muchas disciplinas, por lo que sus definiciones pueden diferir. La vulnerabilidad con la amenaza puede ser entendida como *la exposición que se obtiene ante una amenaza ya sea natural o social y su capacidad de lidiar, recibir y superar el impacto* (Rivera et al. 2011). A la vez, la vulnerabilidad tiene una relación muy estrecha con la amenaza, ya que la unión de los dos genera la realidad del desastre, que da prioridad a dos elementos que son la intensidad del peligro y las condiciones materiales de los individuos (Rivera et al. 2011).

Este concepto surge con mayor fuerza en los años 90, cuando los desastres resultaron cada vez más frecuentes debido a la falta de planificación para minimizar el riesgo, entre otras razones. Dentro de la concepción de Rivera, la vulnerabilidad depende de la ubicación de ciudad, tipo de edificación construida y el estrato económico, los cuales tendrán como precursor la exposición ante algún evento.

Este concepto ha evolucionado para incorporar nuevos elementos. En las Ciencias Sociales es común que la vulnerabilidad sea representada por el grado de pobreza; sin embargo, Pizarro (2001) menciona que la vulnerabilidad puede ser analizada desde dos perspectivas. La primera hace

referencia al grado de inseguridad e indefensión por parte de la sociedad ante un daño económico o material. La segunda se refiere a la capacidad que tienen las sociedades para enfrentar un evento natural o social que puede presentar un daño a sus actividades, con el fin de diseñar estrategias y planes para minimizar esa vulnerabilidad.

Calvo y García (2001) se refieren a la vulnerabilidad *como el desequilibrio o desajuste que se puede dar entre la sociedad y el medio físico que los rodea*. La sociedad siempre es vulnerable ante cualquier grado de peligro, la estrategia es disminuir ese grado de vulnerabilidad y enfrentar de la mejor manera la amenaza. En este sentido algunos autores relacionan la vulnerabilidad con la situación económica de la persona, ya que a mayor pobreza hay mayor vulnerabilidad, obligándolos a vivir cerca de las amenazas potenciales, por ejemplo, de volcanes activos (Vidal et al. 2007).

Sin embargo, los altos niveles de vulnerabilidad que presenta el ser humano tienen como único responsable al hombre mismo, ya que se encuentra cegado y confiado en su capacidad intelectual para fabricar tecnología que lo ayude en sus ámbitos cotidianos. A pesar de todos sus esfuerzos, es evidente que el ser humano cada día aumenta su vulnerabilidad y el riesgo ante un evento determinado, ya que no cuenta con el interés necesario para planificar sus acciones y actividades en armonía con la naturaleza (Cartaya y Méndez, 2015).

La amenaza actualmente es entendida como el factor natural que tiene la capacidad de generar un daño sobre un lugar en particular. En siglos anteriores el peligro y la amenaza eran concebidos como un concepto único, lo que llevó a la comunidad científica a separarlos.

Según Barrantes y Márquez (2011), anteriormente se utilizaba el término “desastre natural” cuando el evento era generado por eventos naturales y “desastre antrópico” cuando el evento causante era producto de la actuación humana. Al respecto, ellos aclaran que los desastres son hechos sociales y no naturales, por lo que debe utilizarse únicamente la palabra “desastre”, independientemente del acontecimiento que lo dispare.

De esta forma, la amenaza es entendida “como la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio establecido” (Barrantes y Márquez, 2011). La amenaza puede desencadenar eventos potencialmente peligrosos para la sociedad, que al encontrarse con condiciones de vulnerabilidad pueden provocar un desastre, pero como este no ha ocurrido se constituye en un riesgo sujeto de la gestión, de donde surge el concepto de “gestión del riesgo”. (Barrantes y Márquez, 2011).

## **2.2 Amenazas y peligros volcánicos**

Los eventos volcánicos, sus amenazas y consecuencias se pueden ver reflejadas de diversas maneras, desde la exposición por gases hasta la afectación por flujos piroclásticos y balísticos (Osorio et al, 2014). La amenaza se entiende como el evento capaz de causar daños negativos sobre el ser humano, de acuerdo con el grado de exposición (Soares y Romero, 2014). Para Masías (1992), citado por Soares y Romero, la vulnerabilidad es dinámica y diferente frente a cada evento, debido a que un poblado o individuo puede ser más vulnerable ante los gases, pero menos vulnerable ante caída de balísticos de una actividad volcánica.

La vulcanología ha experimentado a partir del siglo XX un considerable avance que ha hecho posible el modelaje y escenarios que alerten a la población sobre los posibles daños que un volcán puede realizar (Llinares et al. 2004). Para Llinares y compañía, el vulcanismo es un fenómeno natural que puede ser previsto a través de sistemas de vigilancia que permitan a los demás entes generar planes de prevención y mitigación para la protección civil. A pesar de los esfuerzos tecnológicos y científicos aún no es posible determinar con exactitud la ocurrencia de una erupción, es por eso que algunos autores hablan de peligro y no de amenaza (Barrantes y Márquez, 2011). Miranda y Robles (2013) definen el peligro *como un evento intrínseco capaz de causar daño, sin tomar en cuenta la cuantificación y probabilidad de ocurrencia o daños de un evento.*

En el mundo existen alrededor de 1300 volcanes continentales con una actividad promedio de entre 50 y 60 eventos eruptivos por año, que generan una amenaza a las poblaciones aledañas donde 270 000 personas han percibido en algún momento una erupción (Ramos et al. 2014). Estos

mismos autores mencionan que la actividad volcánica genera mayor impacto en países pequeños y con pocos recursos, lo cual dificulta su pronta recuperación.

Por su parte, en Romero et al. (2017) se menciona que los sistemas volcánicos pueden generar un riesgo a la población, que puede ser alto o insignificante según la capacidad para enfrentar el evento. La evaluación del riesgo debe ser considerada una herramienta de gestión para determinar las posibilidades de daños, tomando en cuenta el peligro y la exposición.

El Índice de Explosividad Volcánica (IEV), desarrollado por Walket en 1973, es un parámetro que permite medir la explosividad de un volcán a través de la dispersión, fragmentación del material y daños generados (Gómez et al. 2017). Los peligros volcánicos que corresponden a la afectación directa de la actividad volcánica en un periodo muy corto, durante o posterior al evento son llamados primarios, según Gómez. Los secundarios son, por ejemplo, el deslizamiento, y corresponden a las amenazas que han sido desencadenadas por los eventos volcánicos primarios producto de la erupción. Para estos autores, reducir el riesgo consiste en minimizar los elementos expuestos de la sociedad sobre el área que puede presentar un evento natural.

La amenaza volcánica es todo aquel producto generado por estos sistemas, que representan un peligro para la sociedad civil. Una de las amenazas es la emanación de gases volcánicos, que pueden ser liberados a través de una fractura o debilidad de la tierra cercana a la estructura volcánica, dando como resultado las fumarolas. Dentro de los principales gases volcánicos se encuentra el CO<sub>2</sub>, que puede presentarse como una disolución en agua incluso lejos del área volcánica principal como, por ejemplo, en lagos hidrotermales y maares. Este tipo de amenazas pueden extenderse por meses y convertirse en un impacto negativo hacia la sociedad sobre elementos expuestos en un área (Llinares et al. 2004).

Según Loughlin et al. (2015), la amenaza volcánica debe ser calculada individualmente en términos de probabilidad, extensión y efecto, para ser intervenidos por medio de políticas públicas en tres niveles: identificación, reducción del riesgo y manejo del desastre. Ya que en las cercanías de estos sistemas donde se desarrolla la producción agrícola o ganadera, la población puede estar asentada en las cercanías de ríos o laderas por donde puede bajar material volcánico (lahares,

gases). Estudios arqueológicos han evidenciado que este tipo de desplazamientos se han dado en casi toda la historia y han originado constantes muertes por intoxicación con gases o cualquier otro producto volcánico (Alvarado, 2008).

Alvarado (2008) menciona que el nivel de amenaza y peligro que puede representar un volcán depende de variables como la geomorfología, tipo de volcán, clima del lugar, dirección del viento y principalmente frecuencia de erupciones. A escala global son diversos los peligros asociados a este tipo de actividades y Centroamérica no es la excepción. Alvarado menciona que en esta región se concentra una importante actividad volcánica a través de diferentes estructuras, ya sea tipo estratovolcán o caldera, entre otros. Para el autor antes mencionado, los principales peligros volcánicos en Costa Rica provienen de volcanes altamente activos como Rincón de la Vieja, Arenal, Irazú y otros en menor medida como Miravalles, Turrialba, Hule y Río Cuarto. En el caso de los dos últimos se requieren de más estudios para comprender mejor el riesgo que presentan.

### **2.2.1 Formación de maares y lagos crátericos**

En el mundo existen diversas formaciones volcánicas, entre las cuales se encuentran los maares. Alvarado (2008) los define como una estructura monogenética o poligenética capaz de producir erupciones explosivas, donde el magma en ascenso encuentra un manto acuífero y al entrar en contacto, genera una reacción explosiva denominada erupción freatomagmática. Lorenz (1975) menciona que estas formaciones, también denominadas diatremas, cuentan con una forma de cono o “zanahoria” en su interior, donde la parte superficial es la más ancha y la parte inferior es estrecha y conecta con una falla cortical por donde asciende el magma. A su vez, se menciona que estos volcanes liberaran gases debido al enfriamiento del magma a través de los años.

Los maares pueden tener un origen de caldera, que es una estructura formada por la rápida liberación de un considerable volumen de magma que al vaciarse la cámara magmática genera el colapso de la parte superficial del suelo y provoca un hundimiento (Llinares et al. 2004). Otros detallan que este tipo de formación se debe a la interacción del agua y el magma, la cual forma anillos de toba, calderas o bien cráteres de explosión volcánica con diámetros diversos y en algunos casos forman lagos con aporte de agua meteórica (Cruz et al. 2008).

En su mayoría estos volcanes cuentan con una composición basalto-andesítica, que ayuda a la permeabilidad del suelo y por ende a la acumulación del agua meteórica. Los lagos formados en el interior de un maar pueden presentar una estratificación donde las aguas superficiales no pueden mezclarse con las aguas profundas, lo cual causa una posible acumulación de gas volcánico (Cruz et al. 2008). Dicha estratificación puede deberse a una perturbación dinámica entre el agua y el ambiente, donde las propiedades físicas y mecánicas del lago pueden tener un comportamiento anómalo (estratos), causado por las características climáticas de la región, la altitud del lago o bien el viento (Hoyos & Wills, 2007). Sin embargo, los pocos estudios realizados sobre estos fenómenos no dejan en claro las causas de la estratificación del lago. Lo que sí se sabe de estos lagos es que la limitada presencia de oxígeno y las altas presiones existentes en el fondo producto de la estratificación pueden ser un riesgo inminente para la población en caso de liberación de gases volcánicos (Hoyos et al. 2007).

Tal como se afirma en Haberyan et al. (2003), los lagos con presencia de gas y estratos de agua deben ser estudiados con detenimiento con la finalidad de controlar y prevenir eventos, ya que estos sistemas cuentan con la capacidad de realizar erupciones límnicas, que para los autores consisten en explosiones de gas cargadas de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, generadas por cambios anómalos.

Los gases dentro de los lagos crátericos se encuentra formados en su mayoría por H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, entre otros compuestos (Delmelle et al. 2015). Para estos autores, la mayor parte del calor transferido por estos gases se debe al H<sub>2</sub>O mientras que el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, entre otros, son los responsables de los lagos ácidos, ya que la inyección a profundidad y su interacción con las rocas provocan que el gas sea liberado.

Delmelle et al. (2015), los lagos en ocasiones tienen la capacidad de retener el gas sin ser liberado, debido a cambios de presión, temperatura y oxígeno (Cabassi et al. 2014).

## **3. Metodología**

### **3.1. Tipo de investigación**

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo con diseño no experimental de tipo longitudinal con alcance tendencial (Hernández et al. 2014). Como mencionan estos autores, el enfoque cuantitativo conlleva un procedimiento muy estructurado en el que no se pueden saltar pasos para lograr el objetivo de la investigación. Es no experimental debido a que no hay control de las variables, en este caso de peligro y exposición; sino que estas se observan y miden tal y como se encuentran en su contexto natural, por ejemplo, pH, temperatura, concentraciones de gases, peligro, entre otras. El diseño se definió como longitudinal dado que se recolectarán datos en dos períodos del año, el seco y el lluvioso, para observar los cambios de acumulación y composición química de gas en el lago y así analizar el potencial de peligro que tienen estos hacia la población del área de estudio.

Para Arnau (2008) en los estudios longitudinales interesa observar los cambios en un proceso de estadía diferente. Dentro de la metodología longitudinal se puede hacer el muestreo repetido y el fijo, para esta investigación se seguirá la primera. El diseño longitudinal tendencial cuenta con la capacidad de desarrollar un análisis de las muestras en un periodo, lo que permite obtener una tendencia (Hernández et al. 2014). A la vez, es importante que el punto de medición de muestras sea el mismo debido al tipo de investigación y los resultados que se desean obtener.

### **3.2. Área de estudio**

#### **3.2.1 Ubicación geográfica**

El área de estudio comprende el lago Río Cuarto y su potencial área de influencia, correspondiente a la dirección y velocidad del viento predominante del año 2016 al 2020 (Mapa 1). La delimitación del área de estudio se realizó con base en tres estaciones meteorológicas, llamadas: Piñales las Delicias, Estación el Ceibo del MINAE y Comando Puerto Viejo de Sarapiquí del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). También, esta área de estudio se encuentra definida a partir del modelo de distribución de gases (AERMOD) del Laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional. A la vez, se toman como fundamento los artículos de Giggenbach et

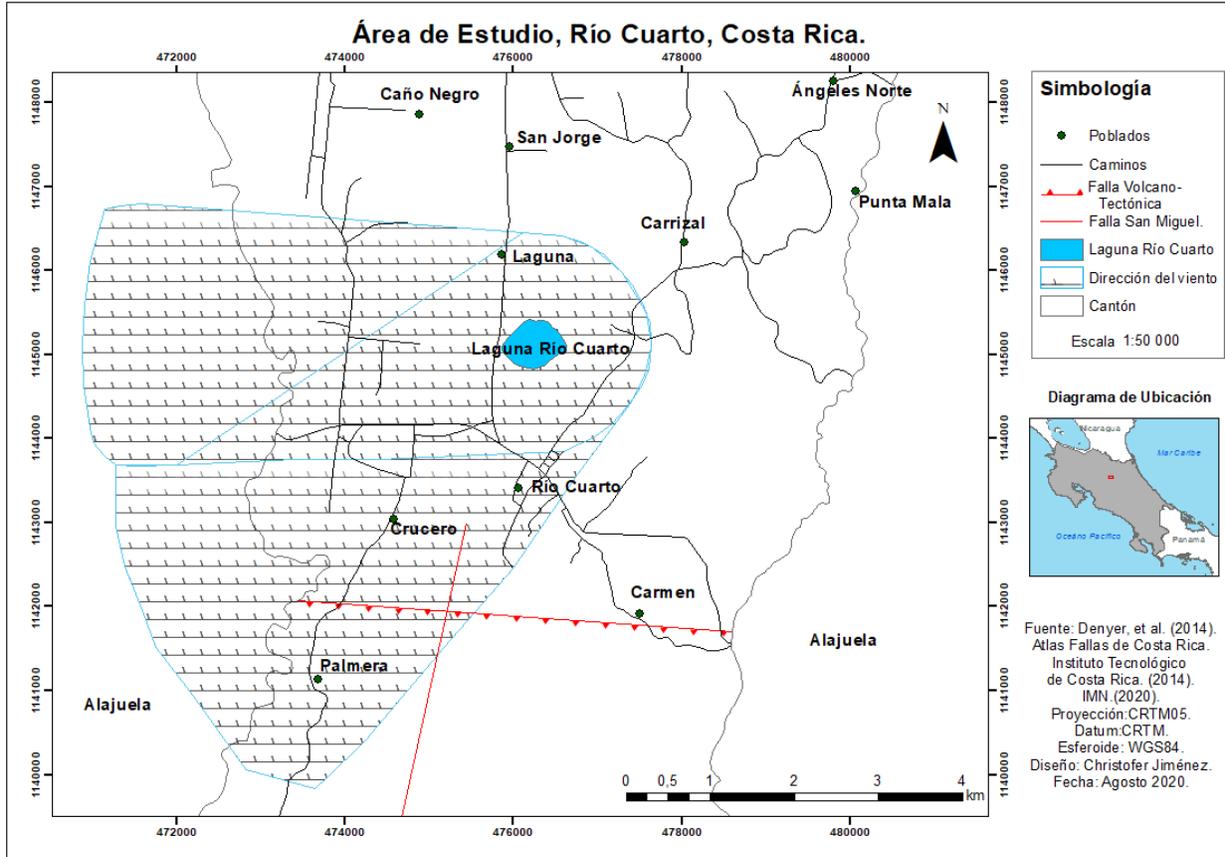
al. (1990) y Gerlach et al. (2000) los cuales hablan sobre los rangos de acumulaciones que han alcanzado otros lagos alrededor del mundo antes de una erupción límnic, así como sus potenciales peligros.

El lago Río Cuarto cuenta con una extensión de 33 hectáreas, una profundidad aproximada de 70 m y una elevación de 360 m sobre el nivel del mar (Cabassi et al. 2014). Se ubica a 1 km al noreste del centro urbano del actual cantón de Río Cuarto y a 8 km al noreste de San Miguel de Sarapiquí. En el sitio se puede encontrar actividad turística con caminos y senderos de acceso público, así como una vegetación tipo pre-montano.

Este lago tiene un volumen total de agua de  $15,12 \times 10^6 \text{ m}^3$ , del cual  $6,80 \times 10^6 \text{ m}^3$  es de agua aeróbica (el 45%) y un volumen de agua anóxica de  $8,31 \times 10^6 \text{ m}^3$  (el 55%), su drenaje o embalse comprende 17,4 hectáreas, cuenta con un cráter de explosión casi circular, con una dirección este-oeste (Alvarado, 2008). Su longitud es de 760 m y su ancho de 610 m (Gocke et al. 1987).

# Mapa 1

## Área de estudio y su contexto espacial



Fuente: Elaboración propia (2020)

### **3.2.2 Características físicas del área de estudio**

#### **Geología**

El maar de Río Cuarto es muy joven y surge rompiendo la continuidad del depósito del abanico que lo rodea, producto de erupciones pasadas (Alvarado et al. 2011). El área de estudio corresponde a un complejo volcánico tipo maar que se encuentra cubierto por una extensa área de lavas y corrientes de densidad piroclásticas (Ruiz et al. 2010). Estos afloramientos se encuentran principalmente en los alrededores del lago, en cortes de carreteras y quebradas. Según Ruiz et al. (2010), en algunas zonas se localizan espesores de 15 m de lava masiva, con una composición tipo basalto-andesítica. Estos autores, atribuyen este vulcanismo a la intersección de una fisura conocida como falla de San Miguel y una falla cortical profunda que atraviesa los volcanes Río Cuarto, Bosque Alegre y el complejo del Congo.

Los depósitos lávicos cuentan con un componente calco-alcalinas alto en potasio (k) y valores entre 4-5 w.t % MgO (Ruiz et al. 2010).

#### **Clima**

El área de estudio se encuentra localizada en la vertiente norte con un clima tropical muy húmedo, con precipitaciones prácticamente todo el año que disminuyen en los meses de febrero, marzo y abril (IMN, 2018). Estas condiciones, según el Instituto Meteorológico Nacional, son producto de una influencia de la vertiente caribeña debido a su ubicación geográfica.

Esta región presenta precipitaciones de casi 3200 milím en promedio anualmente, por lo que se encuentra entre las tres zonas más lluviosas de Costa Rica. Los vientos tienen una dirección predominante del este, con una velocidad promedio de 10.7 km/h, que aumenta en los meses de noviembre y enero lo cual genera una disminución de las temperaturas, que varían de los 28 °C a 21 °C.

### **3.2.3 Aspectos sociales del área de estudio**

#### **Población**

Río Cuarto era un distrito perteneciente al cantón de Grecia hasta el año 2017, cuando los ciudadanos decidieron convertirlo en cantón. Según datos del INEC (2011) para el año 2019 se proyecta una población de 15484 habitantes, de los cuales el 22% reside en poblados urbanos y el 68% en poblados rurales. Para el 2025, según esta misma institución se proyecta una población de 17536 habitantes, con una mayor población entre edades de 30 a 59 años.

#### **Aspectos socioeconómicos y agropecuarios**

Según el Instituto de Desarrollo Rural (INDER, 2015), el cantón de Río Cuarto presenta un desarrollo social muy bajo, con una clasificación de 39,9, lo que lo convierte en uno de los cantones con índice de desarrollo social más bajo de la Zona Huetar Norte, ya que los cantones con mayor índice de desarrollo social de la zona son los distritos de: Quesada 72 y Venecia con 63,02 del cantón de San Carlos. Sin embargo, en el año 2009, según el INDER Río Cuarto contaba con un índice de desarrollo cantonal de 40.

Esta misma entidad menciona que dentro de las actividades productivas principales se encuentran la ganadería de carne y de leche, producción de piña, así como la agricultura de tubérculos y raíces tropicales. Estas actividades son desarrolladas por el 30% de la población total del cantón, un 20% se dedica a las actividades secundarias y el restante 40% trabajan en actividades terciarias (INDER, 2015). Por su parte, la municipalidad de Río Cuarto registra en el 2011 una producción de maíz del 9%, del girasol un 25% y de soja el 3%.

El INDER (2015) menciona dentro de las actividades turísticas atractivos como el Refugio de Vida Silvestre Bosque Alegre, Laguna Río Cuarto y Puente Histórico Río Toro,

lo cuales deben ser explotados de mejor manera con el fin de aumentar la economía del cantón y mejorar los índices anteriormente mencionados.

### 3.3 Variables

Las variables planteadas en la investigación tienen como objetivo resolver los problemas formulados para la obtención de los resultados (Cuadro 1). Estos conceptos se asocian unos con otros según orden de prioridad, pues hasta que se avance en los resultados y toma de muestras de campo se podrá continuar con la etapa que corresponda a la siguiente variable.

Cuadro 1

*Variables consideradas en la investigación*

<b>Variables individuales</b>
Gases disueltos
Composición isotópica de gases
Peligro por acumulación y liberación de gas
Peligro por exposición física del ser humano y sus actividades

*Definición conceptual y operacional de las variables*

<b>Variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>
Gases disueltos	Emisión de gases volcánicos que puede generarse de manera directa y visible a través de las aberturas conocidas como cráter y que se pueden desarrollar de manera activa (Díaz, 2010).	Gas que se encuentra acumulado en forma de estrato en el lago, que aumenta conforme a su profundidad.
Composición isotópica de gases	“La composición isotópica, corresponde a los átomos de un mismo elemento con igual número de protones, pero diferente número de neutrones” Otero, Rosell y Barbieri (2015),	Origen de un elemento o compuesto (gas), que puede ser de origen magmático o bien de origen bacterial.
Peligro por acumulación y liberación de gas	El peligro son los daños que pueden generar un evento en particular sobre el ser humano o sus bienes, sin embargo, no es posible	Gas de origen volcánico acumulados en el lago, con efecto nocivo sobre el ser humano, los animales de pastoreo y cultivo.

	cuantificar su probabilidad de ocurrencia o daños. Miranda y Robles (2013)	
Peligro por exposición física del ser humano y sus actividades	La exposición se puede entender como aquella región, lugar, individuo o actividad que puede ser afectado ante la ocurrencia de algún evento (Bárcena et al. 2012)	Aquellas viviendas, comercios o actividades agropecuarias que se encuentren dentro del área de influencia por el gas de el lago se consideran en exposición.

Fuente: Elaboración propia (2020).

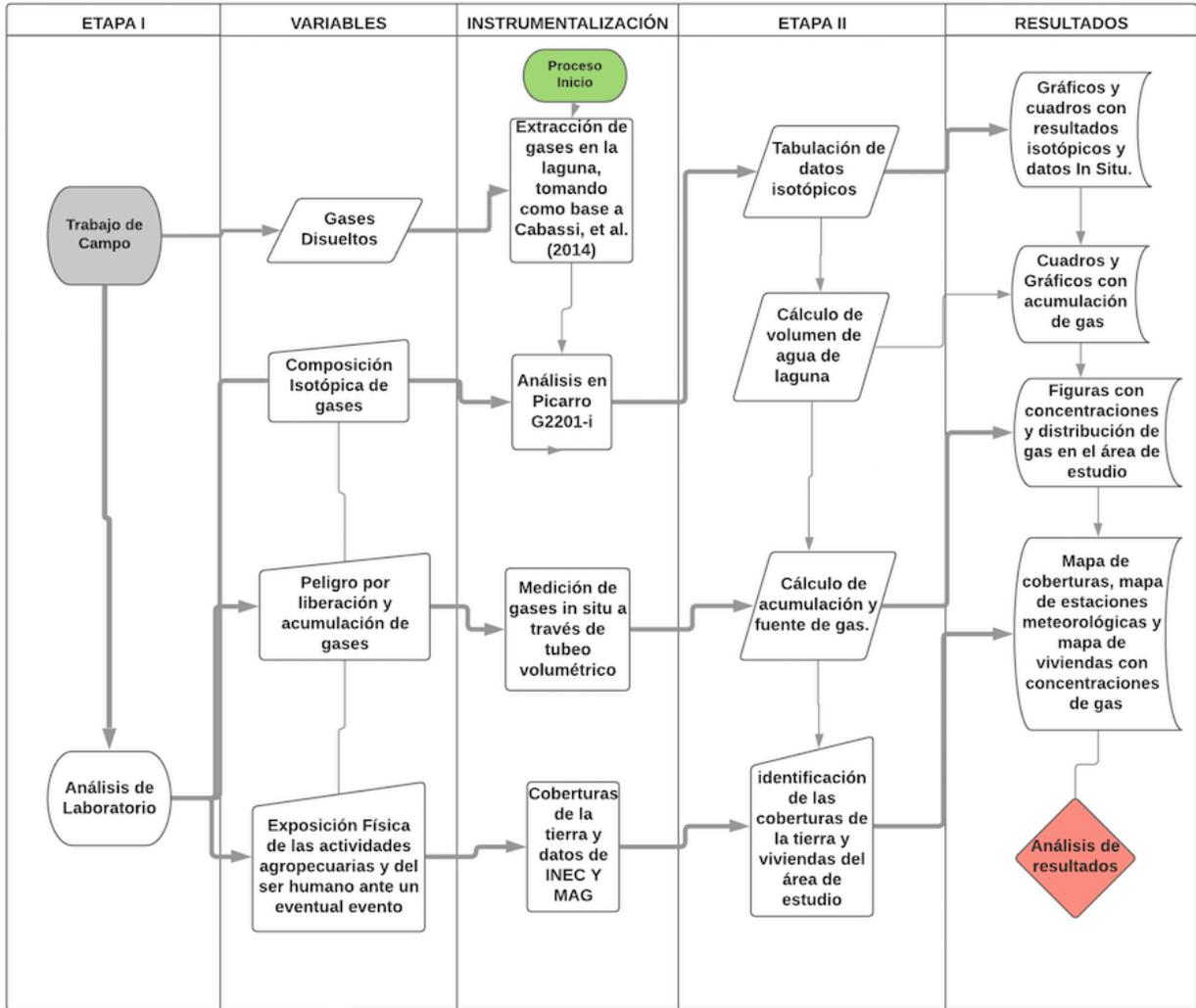
### 3.4. Métodos utilizados para la recolección de datos

Se plantearon dos etapas formuladas a partir de los objetivos y variables tanto conceptuales como operacionales (Figura 2). La primera consistió en la obtención de muestras y medición de datos *in situ*, para luego ser analizados en laboratorio a través de equipo especializado para obtener el nivel de la acumulación de gas y determinar la fuente del mismo. Esto, fue basado a partir de la metodología utilizada por Cabassi et al. (2014), que fue modificada en consideración de los métodos, equipo de campo e instrumentos disponibles en el OVSICORI-UNA.

La segunda etapa fue abordada a partir de los datos obtenidos en la etapa uno, que sirvieron como insumo para la evaluación y determinación del potencial de peligro que el lago puede representar sobre el área de estudio definida. Para esto, se procedió a realizar un mapa de coberturas de la Tierra con ayuda de imágenes satelitales y el Manual de clasificación de coberturas de la Tierra del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2015). Esto aportó para el análisis geográfico y evaluación del posible peligro sobre la comunidad del cantón de Río Cuarto asociado con la acumulación y fuente del gas presente en el lago de Río Cuarto.

Figura 2

Diagrama de la metodología por seguir



Elaboración propia (2020)

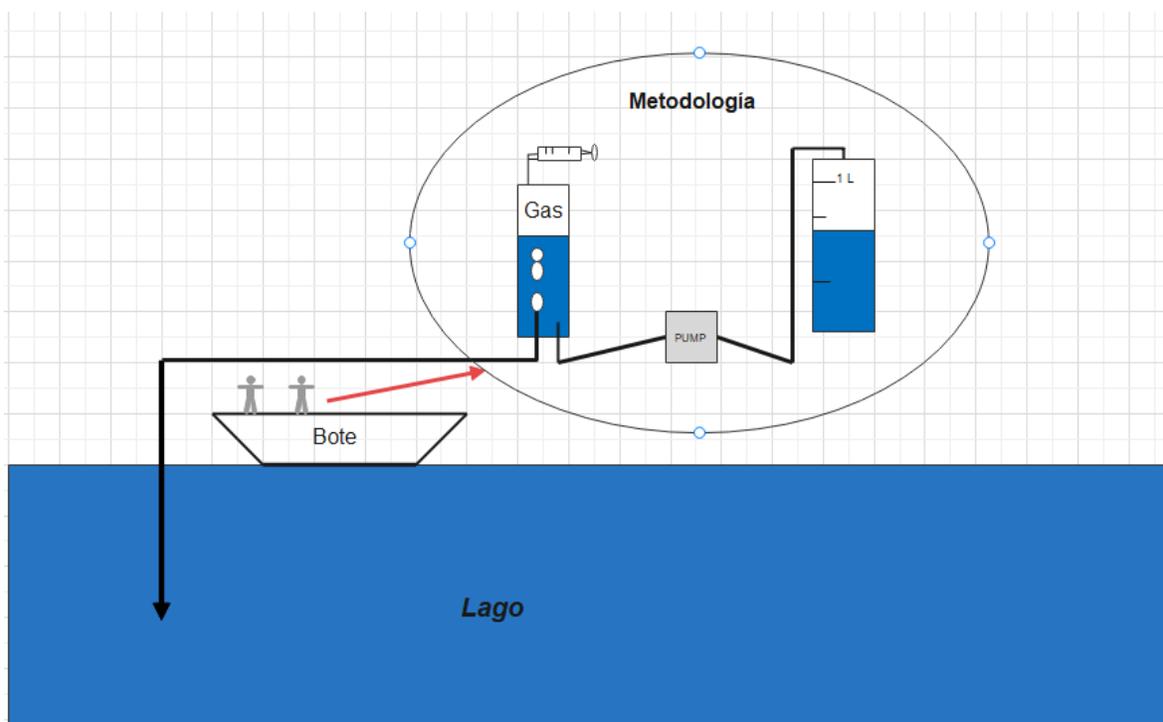
### **3.4.1 Medición de las concentraciones de gases disueltos emitidos en el lago Río Cuarto**

#### **3.4.1.1 Recolección de datos en campo**

Para la obtención de las muestras se tomó como base la metodología utilizada por Cabassi et al. (2014). No obstante, esta metodología requirió ajustes para adaptar recipientes volumétricos que permitieran la separación del agua del gas, así como el cálculo y la descripción de la acumulación de gas presente en el lago. Por esta razón las muestras de gases del fondo de el lago se extrajeron utilizando una tubería de 6 mm de diámetro y 80 m de longitud, jeringas, viales de 15 mL y 120 mL en vacío y con NaOH (hidróxido de sodio) y una bomba eléctrica capaz de bombear agua a la superficie. Además se tomó *in situ* la temperatura y pH, con ayuda de un medidor multiparamétrico (HANNA, modelo HI 9829). El muestreo se realizó mediante capas verticales cada 10 m para obtener distintas mediciones y cambios en la composición y acumulación del gas, entre ellos CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> (Figura 3). Para la anotación de datos de campo y laboratorio se utilizó una ficha técnica que puede ser consultada en el Anexo 1.

Figura 3

*Metodología para la extracción de muestras en lago*



Fuente: elaboración propia a partir del trabajo realizado por Cabassi, et al. (2014)

Se utilizó la batimetría elaborada por Göcke et al. (1987) para referenciar el punto más profundo del lago (Figura 4), ya que es ahí donde se extraen las muestras de gases en cada capa.

Los pasos para implementar la metodología fueron:

- Conocer la ubicación del sitio de mayor profundidad del lago con el uso del GPS.
- Utilizar un bote con el equipo necesario, que incluyó la tubería de aproximadamente 80 m de longitud, señalada cada 5 m y 10 m para controlar la profundidad en la cual se estaba tomando la muestra.
- Conectar dicha tubería a un recipiente volumétrico que se encarga de separar el agua del gas por medio de la gravedad (de aquí se extraen las muestras) con capacidad de 236 ml. De este recipiente sale otra tubería que se conecta a la bomba que sustrae el

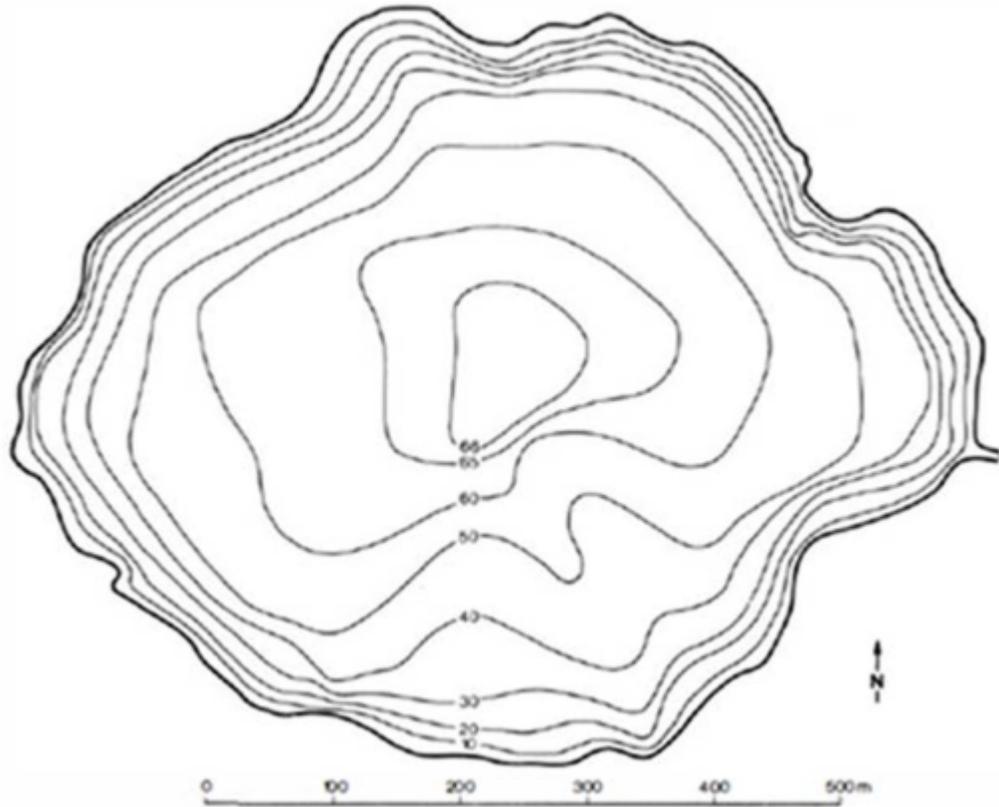
agua del fondo de el lago; de esta bomba parte otra tubería hacia un receptor volumétrico de un litro que permite tomar parámetros de pH y temperatura. En el tubo volumétrico de 236 ml se realiza la lectura de la cantidad de gas y agua que se encuentra en una profundidad determinada.

$$V. gas = 236 mL - V. agua$$

- Posteriormente, para el cambio de capa se utilizó el recipiente volumétrico de un litro con el fin de limpiar la tubería y evitar la contaminación de muestras de una capa a otra.
- Una vez que se limpió la tubería, se procedió a extraer gas con jeringas para inyectarlo en 4 viales de 15 mL por capa; también se utilizaron viales de 120 mL con una disolución de 2 mL de NaOH, el cual permite una absorción o captación del CO<sub>2</sub> para un mejor desempeño del análisis.
- Finalmente, se tomaron parámetros de temperatura y pH.
- Cada paso se repitió en cada profundidad (10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m y 70 m).

Figura 4

*Batimetría del lago Río Cuarto*



Fuente: Göcke, et al. (1987)

**3.4.2 Análisis de la composición de gases recolectados para la identificación y fuente de los gases potencialmente peligrosos sobre la población y actividades agropecuarias**

**3.4.2.1 Análisis isotópico de CH<sub>4</sub> de las muestras recolectadas en campo**

Recientemente se ha incorporado en la ciencia una nueva tecnología de espectroscopía de anillos de cavidad para analizar isótopos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en la atmósfera (Malowany, et al. 2015). Esta técnica es una herramienta para comprender procesos de desgasificación

vinculando las variaciones temporales de los isótopos de carbono con el potencial eruptivo de un volcán (Malawany et al. 2017). Estos autores indican que la composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) proporciona un enlace en la composición isotópica del magma sin necesidad de un muestreo directo de las fumarolas, lo que da como resultado un análisis de la fuente del magma. Por esta razón, dentro de la metodología se utilizó un analizador de isótopos de carbono Picarro G2201-i, que también mide metano.

Fue necesario realizar varias pruebas de análisis con el fin de establecer el mejor método y procesamiento de las muestras, como parte del tratamiento de las muestras en laboratorio. Para ello se utilizó nitrógeno de ultra alta pureza ( $\text{N}_2$ ) como disolvente, debido a que la muestra de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  sobrepasaban la capacidad de análisis del Picarro, que cuenta con un rango de precisión para  $\text{CH}_4$  de 0,1 ppm a 25 ppm y un rango de precisión para  $\text{CO}_2$  de 500 ppm a 2000 ppm. Finalmente se determinó que ese rango se alcanza con una disolución de 0,2 mL de muestra en 500 mL de  $\text{N}_2$  (Figura 5).

Cabe mencionar, que los resultados de los análisis son controlados a partir de estándares certificados dentro del instituto (OVSICORI-UNA) llamado Tanque NOAA con valores específicos tanto de  $\text{CH}_4$  como de  $\text{CO}_2$ , que pueden ser consultados en la sección de anexos 7.2.1. Estos estándares fueron corridos una vez cada cinco muestras analizadas, para así obtener una curva de calibración, correlacionar y corregir los datos obtenidos de una buena manera.

Estos resultados, deben de ser expresados en términos de valor delta ( $\delta$ ) como notación para reportar la composición isotópica de carbono y metano en per miles (‰). Esta notación (delta) es utilizada para expresar en este caso cambios en valores muy pequeños o microscópicos para ver la variación de la razón de isótopos estables con respecto a un estándar, debido a que los isótopos presentan un mismo número atómico pero poseen un diferente número de masa (Kemel et al. 1995). Esta notación está dada de la siguiente manera:

$$\delta = \left[ \frac{\left[ \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right]_{\text{sample}}}{\left[ \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right]_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000$$

Sharp (2007) menciona que esta fórmula describe la relación entre la abundancia del isótopo pesado y ligero, tanto de la muestra como del estándar, para reportar los datos de todos los isótopos estables, excepto el polvo interestelar.

### 3.4.2.2 Análisis isotópico de CO<sub>2</sub> de las muestras recolectadas en campo

En el caso de la composición isotópica de CO<sub>2</sub>, con el fin de obtener un resultado con mayor contundencia, se utilizó el mismo instrumento (Picarro G2201-i), pero utilizando el método de automuestreador. Que consiste en colocar la muestra en un plato giratorio, donde la maquina inyecta automáticamente pequeñas cantidades de ácido fosforico (2mL) y agua desionizada (2mL) para analizar la muestra dentro del rango de precisión. Dentro de estos análisis se corrieron estándares certificados de BCS 395 (limosnita), OVSI 1 y OVSI 2 (ambos de bicarbonato de calcio), con valores de 0,31‰, -4,18‰ y -14,54‰, respectivamente, para calibrar y corregir los datos de manera adecuada. Este detalle de análisis puede ser consultado en la sección de anexos 7.2.2.

A partir de los resultados es posible interpretar la fuente del gas, la cual varía según su composición isotópica. Sharp (2007) menciona que para el CO<sub>2</sub> magmático o proveniente del manto, posee un valor de δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> entre -5‰ y -7‰; y un valor de δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> entre -8‰ a -31‰ se considera de composición microbiana. Según este mismo autor, para el caso del CH<sub>4</sub> con una composición isotópica entre -20‰ y -55‰ corresponde gas hidrotermal y valores debajo de -56‰ corresponde a composición microbiana.

### **3.4.3. Análisis de la acumulación de gas como peligro potencial para la población y actividad agropecuaria**

Para determinar el peligro de los gases encontrados en el lago de Río Cuarto, sobre la población local y los cultivos, fue necesario primero calcular el volumen de gas total que se encuentra acumulado en el lago para así conocer la amenaza de que ocurra una erupción límnic (libración de gases acumulados). Para esto, se realizaron dos métodos de análisis diferentes: el primero siendo la acumulación de gas disponible para ser liberado sin mayor problemas y el segundo siendo el cálculo del gas disuelto que se encuentra en el agua. En el primer análisis fue necesario tomar *in situ* la cantidad de gas que se encontraba en cada capa muestreada con ayuda de un recipiente volumétrico con capacidad de 236 mL que separa el gas de agua por medio de la gravedad. También, se realizó un modelo digital del terreno con ayuda del Arc Map y la batimetría de Göcke et al. (1987). Estos resultados son mostrados en cuadros que detallan el volumen de agua por capa muestreada, en el Anexo 7.3.2, un cuadro de resultados que muestra el volumen total de agua en m<sup>3</sup> por capa estratificada (Hipolimnion y Epilimnion) y un cuadro con el volumen de gas total liberable presente en el lago por capa estratificada en L, m<sup>3</sup> y km<sup>3</sup>.

En el cálculo de la acumulación de gas disuelto, fue necesario utilizar la fórmula del gas ideal:  $P \times V = (n \times r) \times T$ , con el fin de seguir una serie de procedimientos como lo son: la temperatura en K (kelvin), presión atmosférica, moles de gas, constante del gas ideal. El detalle de este análisis puede ser consultado en el Anexo 7.3.2. Con este análisis se obtiene un cuadro con el volumen total de gas disuelto en el lago, tanto de CO<sub>2</sub> como de CH<sub>4</sub>. Posteriormente, tomando en cuenta la acumulación total de gas liberable de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> más la acumulación total de gas disuelto en el agua, se obtiene el gas total que se encuentra acumulado por capa estratificada en el sistema de el lago de Río Cuarto.

Finalmente, con el volumen de total de gas acumulado presente en el lago de Río Cuarto se realizó un cuadro comparativo entre el lago de Río Cuarto y otros lagos del mundo que presentan las mismas características, entre ellos, lago Nyos, Monoun y Kivu, así como una comparación de gas acumulado que se encuentra en cada lago. Algunos autores establecen

que este tipo de erupciones ocurren por lo general cuando se encuentra una acumulación de gas disuelto superior a  $1 \text{ km}^3$  (Giggenbach et al. 1990 y Tittle et al. 1986). Estos autores también indican que para el caso del lago Nyos y Monoun en Camerún, así como el lago Corta Guadina en España, se presentó una acumulación de gas entre  $1 \text{ km}^3$  y  $1,5 \text{ km}^3$  antes del desastre que afectó alrededor de  $29 \text{ km}^2$  a la redonda desde el foco de emisión, debido a la gran cantidad de gas que almacenaba.

### **3.4.4 Exposición física de las actividades agropecuarias y ser humano ante un eventual evento**

#### **3.4.4.1 Estimación de la dirección predominante del viento**

Como parte del análisis de exposición sobre las actividades agropecuarias y personas, se utilizaron las direcciones predominantes del viento. Para hacer esto se solicitó al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) los datos de dirección y velocidad del viento desde el año 2016 hasta el año 2020, con especificaciones de mes, día y hora, de las 3 estaciones que se encontraban en los alrededores de el lago (entre ellas: Reserva El Ceibo del MINAE, Piñales Las Delicias y Comando Puerto Viejo).

Con las tres estaciones que disponen de datos suficientes se elaboraron los siguientes cálculos:

- Ubicar las estaciones meteorológicas en relación con el lago.
- Calcular la velocidad promedio anual del viento en cada estación utilizada y el promedio de la dirección del viento.
- Se unifican los valores de las estaciones para obtener un promedio general, respecto a los años del 2016 al 2020.
- Se transforman los datos de acuerdo con los puntos cardinales, en el siguiente orden: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW.
- Se construye una rosa de los vientos que indica la dirección y velocidad promedio del viento para el periodo de registro.

#### **3.4.4.2 Elaboración del mapa de coberturas de la Tierra**

Seguidamente se procedió a elaborar un mapa de coberturas de la Tierra para utilizarlo en el análisis de peligro ante una erupción límnica. Para esto se utilizaron las siguientes herramientas:

- Manual de Clasificación de Coberturas de la Tierra del MAG (2015), como guía para la elaboración del mapa en cuanto a tipo de cobertura, representación de colores y simbología.
- Para la edición y clasificación de las coberturas de la Tierra se utilizaron las imágenes satelitales de Google Earth, pertenecientes a Maxar Technologies del año 2020, con una resolución de 1280 x 720 píxeles a una escala de digitalización de 1:1500, para una mejor visualización y reconocimiento del terreno.
- Para la corroboración y validez del mapa se realiza una gira en setiembre del 2020, en la cual se verifican las coberturas clasificadas, tomando un registro fotográfico en los alrededores de el lago, con un dron modelo DJI Phantom 4 Pro, con un sensor de 1” de 20 m (píxeles efectivos), un lente de 8,8 mm/24mm (equivalente al formato 35 mm) con tamaños de imagen 5472x3078 y con sistema de detección infraroja con un rango sensorial de obstaculos de 0,2-7 m.
- Finalmente, el mapa se realizó a una escala 1:30 000.
- También se realizó un cuadro que muestra las hectáreas que contiene cada cobertura identificada con el fin de realizar un mejor análisis geográfico.

#### **3.4.4.3 Determinación de la cantidad de viviendas en el área de estudio.**

Si bien es cierto en caso de una liberación repentina del gas acumulado del lago no causará daños significativos sobre las infraestructuras, pero si lo hace en las personas que las habitan, por lo que resulta imprescindible estimar las viviendas o comercios que pueden encontrarse potencialmente amenazadas por la liberación de gases. Para esto fue necesario hacer uso de las unidades estadísticas mínimas proporcionadas por el INEC (2019). No fue posible saber la cantidad de personas que se encuentran en cada distrito del cantón debido a

que Río Cuarto fue declarado cantón en el año 2017 y el INEC aún no cuenta con datos que puedan ser compartidos porque están siendo depurados para el próximo censo. Con este fin se siguieron estos pasos:

- Solicitar información al Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) acerca de las unidades estadísticas mínimas así como la población que se encuentra en el cantón de Río Cuarto.
- Estas UGM fueron trabajadas en el programa Arc-Map, para conocer la ubicación de las viviendas, así como la cantidad de estas según puntos cardinales. Con esto, se realizó un cuadro donde muestra la cantidad de viviendas que hay en cada punto cardinal para obtener un análisis adecuado.
- También, se realizó un mapa general, mostrando las viviendas dentro del área de estudio.

#### **3.4.4.4 Escenarios de concentración y distribución de gas potencialmente peligrosos en la atmósfera.**

Se elaboraron escenarios de concentración y distribución de los gases CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, por medio del Aermol facilitado por el laboratorio de Química de la Atmósfera de la Universidad Nacional. Este modelo permite realizar una representación espacial de la distribución y concentración de gas, considerando la topografía, tipo de gas y los datos meteorológicos del área de estudio. A continuación se describe el procedimiento:

- Se prepararon datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa, presión, dirección y velocidad del viento, precipitación y radiación, en días y horas, del año 2016 al 2020, correspondientes a las estaciones meteorológicas utilizadas.
- Se utilizaron los datos de volumen de gas liberados y disueltos, calculados anteriormente como se indicó en la sección 3.4.3.
- Se modelaron dos escenarios:

- El primero, con liberación de gases tanto de CO<sub>2</sub> como de CH<sub>4</sub>, únicamente de la capa hipolimnion (capa entre los 40 m y 70 m);
- El segundo, con la liberación de todo el gas acumulado (gas disuelto en el agua), tanto de CO<sub>2</sub> como de CH<sub>4</sub>.
- Ambos escenarios fueron realizados para una erupción límnic a mediodía y otro a medianoche, lo cual aumenta a ocho los modelos por escenario.
- Con el Arc Map y la batimetría citada en Cabassi et al. (2014), se calculó el diámetro del foco emisor. Con los datos de volumen de gas se calculó el porcentaje de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> que hay acumulado, así como la concentración de los gases en m<sup>3</sup>/s. Estos valores fueron introducidos en el modelo para la estimación de la concentración/dispersión.
- Para calcular la velocidad de salida de los gases (m/s) en caso de erupción, se convirtió de moles (tanto de metano como de dióxido de carbono de la capa hipolimnion) a gramos, por lo que se multiplicó el valor del mol de gas por la masa molecular de cada gas (para el CO<sub>2</sub>=44,01g/mol y CH<sub>4</sub>= 16,04 g/mol).
- El flujo de gas CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en g/s se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Flujo de gas (g/s)} = \text{Masa de gas (g)} \div (\text{duración de erupción (s)} \times 60)$$

- Este paso se repite tanto para el CO<sub>2</sub> como para el CH<sub>4</sub> y para cada duración de erupción estimada. Cabe recalcar que estas duraciones son únicamente una estimación de cuánto puede durar la erupción con base en erupciones freáticas como las del cráter principal del Poás.
- Como resultado se obtienen ocho escenarios en ppm: cuatro escenarios con una erupción límnic de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> con la acumulación de gas liberable de la capa hipolimnion, tanto a mediodía como a medianoche, con una duración del evento de 10 min y una concentración de gas durante una hora y cuatro escenarios de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, con erupción límnic de todo el gas disuelto de la capa hipolimnion, con duración de 10 min y con una concentración durante una hora, tanto a mediodía como a medianoche.

A partir del modelo Aermoc se identificaron las zonas de mayor peligro, donde la población se vería más afectada en caso de una erupción límnica, así como el porcentaje de ppm (partículas por millón) que se concentraría en cada lugar. Como referencia para el análisis de la amenaza se utilizaron las referencias aportadas por Giggenbach, et al. (2000) y New Jersey Department of Health (2016), con base en los cuales se establecen los rangos límites de exposición tanto de CO<sub>2</sub> como de CH<sub>4</sub>, en relación con los cultivos, animales y personas (Cuadro 2 y 3).

Cuadro 2

*Rangos de exposición para el ser humano y animales*

<b>Gas</b>	<b>Rango de exposición en humanos</b>	<b>Rango de exposición en animales</b>	<b>Síntomas o causa de muerte</b>
CO <sub>2</sub>	300 000 ppm (30%)	500 000 ppm (50%)	Causa la muerte
CO <sub>2</sub>	50 000 y 10 0000 ppm (entre 5% y 10%)	350 000 (35%)	Malestares y problemas de salud como mareos, vómitos, problemas cerebrales.
CH <sub>4</sub>	195 000 ppm (19,5%)	195 000 ppm (19,5%)	Causa la muerte e incendios
CH <sub>4</sub>	100000 y 180000 ppm 10% a 18%	100000 y 180000 ppm 10% a 18%	Puede causar intoxicación, mareos, vómitos y problemas respiratorios.

Fuente: Permentier et al. (2017) y NJ Health (2016)

Cuadro 3

*Rangos de exposición de gas para los cultivos*

<b>Gas</b>	<b>Rango de exposición</b>	<b>Problemas</b>
CO <sub>2</sub>	36% diario (360 000 ppm)	Muerte de cultivos
CH <sub>4</sub>	36% diario (360 000 ppm)	Muerte e intoxicación de cultivos

Fuente: Gerlach et al. (2000)

Al sobreponer los escenarios de concentración y distribución de gases al mapa de coberturas de la tierra se puede analizar el grado de peligro potencial en el territorio, tanto para las actividades productivas como para los residentes del área de estudio. A partir de este insumo se elabora un cuadro en donde se muestra la cantidad de viviendas afectadas según escenario y concentración de gas.

## **4. Resultados**

### **4.1 Datos recolectados en campo**

#### ***4.1.1 Volumen de gas liberado en el lago***

Según los datos, tomados en las cuatro campañas realizadas durante la investigación como se observa en el cuadro 4, la mayor acumulación de gas medido por capa muestreada para agosto del 2019 se estable a 70 m de profundidad con un total aproximado de 0,046 L/L de agua extraído. En diciembre del 2019, la mayor acumulación de gas medido se registró también a 70 m con 0,046 L/L (de gas por litro agua extraído). En febrero 2020 es de 0,047 L/L a 70 m y en setiembre de 2020 se registró un máximo de acumulación de gas de 0,047 L/L. Por lo tanto, se puede concluir que las mayores acumulaciones de gas se encuentran a 70 m de profundidad con valores que no varían mucho de una campaña a otra. Cabe mencionar, que en la campaña de febrero del 2020, a 20 m de profundidad no se encontró gas acumulado por lo que no hay un registro del dato.

Cuadro 4

*Resultados de gas acumulado en L/L en el lago de Río Cuarto*

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Gas liberado L/L (1/8/19)</b>	<b>Gas liberado L/L (6/12/19)</b>	<b>Gas liberado L/L (28/2/20)</b>	<b>Gas liberado L/L (3/9/20)</b>	<b>Promedio total de gas liberado en L/L</b>
<b>20</b>	0,009	0,004	*	0,002	0,005
<b>30</b>	0,021	0,004	0,013	0,002	0,010
<b>40</b>	0,036	0,024	0,024	0,003	0,22
<b>50</b>	0,042	0,038	0,034	0,038	0,038
<b>60</b>	0,044	0,044	0,035	0,055	0,044
<b>70</b>	0,046	0,046	0,040	0,047	0,045

Fuente: elaboración propia (2021)

Los datos de acumulación de gas liberable en cada capa muestreada, que se encuentran en el cuadro 4 presentado anteriormente, son la base para calcular el gas total liberable que se encuentra en cada capa estratificada (Epilimnion 0-40 m e Hipolimnion 40-70 m de profundidad) de el lago de Río Cuarto, que será presentado más adelante.

#### ***4.1.2 Medición de parámetro de temperatura y pH in situ***

La temperatura es un parámetro fundamental en el análisis de la acumulación de gas presente en el lago, ya que según Cabassi, et al. (2014), a mayor temperatura mayor presencia de oxígeno, debido a la proliferación de bacterias que son capaces de modificar el CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>, mientras que a menor temperatura, menor presencia de oxígeno lo que dificulta la presencia de bacterias. Los datos de temperatura por cada capa muestreada pueden ser consultadas en el cuadro 5. De acuerdo con este cuadro, la temperatura máxima es de 33,5

°C y se presenta a una profundidad de 60 m, y la mínima de 27,5 °C a una profundidad de 10 m. El promedio de la temperatura para la capa epilimnion es de 30,2°C y de 30,1°C en la capa hipolimnion.

En cuanto al pH, el máximo de 8 se reporta a los 50 m y un mínimo de 3,5 a 40 m. El detalle puede ser consultado en el Anexo 7.3.1

Cuadro 5

*Datos de temperatura a diferentes profundidades, en el lago de Río Cuarto*

<b>Profundidad (m)</b>	<b>°C (Campaña 1/8/19)</b>	<b>°C (Campaña 6/12/19)</b>	<b>°C (Campaña 28/2/20)</b>	<b>°C (Campaña 3/9/20)</b>
0	32,2	29,9	27,5	30,4
10	31,6	30,5	27,5	30,5
20	31,5	28,4	27,6	31,2
30	32,7	29,3	27,8	31,3
40	32,2	28,1	31,8	31,1
50	29,7	30,2	31,4	31,4
60	29,4	29,8	28,3	33,5
70	28,5	27,9	28,3	32,1

Fuente: elaboración propia (2021)

## 4.2 Concentración de CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>.

### 4.2.1 Razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>

La relación CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> permite conocer y correlacionar entre si estos dos gases (metano y dióxido de carbono), con el fin de conocer cual de los dos se encuentra en mayor abundancia y las razones de los mismos. Por lo tanto, a partir del análisis realizado en el Picarro, la razón más alta se da a 20 m con un valor de 0,29 y la razón más baja se ubica a una profundidad de 30 m con un valor de 0,05 (cuadro 6). A una profundidad de 10 m no hay datos debido a la poca o casi nula presencia de gas. No obstante, en términos generales entre las cuatro campañas realizadas, a mayor profundidad mayor presencia de CO<sub>2</sub>, mientras que en la capa epilimnion (capa más superficial) el CO<sub>2</sub> disminuye y aumenta la presencia de CH<sub>4</sub>.

Cuadro 6

*Resultados de la razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>*

<b>Profundidad. (m)</b>	<b>Razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (Campaña 1/8/19)</b>	<b>Razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (Campaña 6/12/19)</b>	<b>Razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (Campaña 28/2/20)</b>	<b>Razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> (Campaña 3/9/20)</b>
10	*	0,20	*	*
20	0,29	0,16	0,07	0,14
30	0,16	0,08	0,05	0,13
40	0,16	0,10	0,10	0,12
50	0,20	0,12	0,10	0,10
60	0,18	0,14	0,12	0,12
70	0,20	0,16	0,15	0,12

Fuente: Elaboración propia (2021)

#### 4.2.2 Composición isotópica $\delta^{13}C_{CH_4}$

La composición isotópica, permite determinar a través de isótopos estables el origen del gas que se está estudiando, en este caso de  $CH_4$  (metano), los cuales son dados en términos de valor delta carbono trece ( $\delta^{13}C$ ); estos resultados asociados a  $\delta^{13}C_{CH_4}$  de las muestras recolectadas en viales de 30 ml en las diferentes visitas de campo, así como los datos encontrados por Cabassi et al. (2014) se encuentran en el cuadro 7. En el cual se encontró una composición máxima de  $\delta^{13}C_{CH_4}$  de  $-63,9 \pm 0,5$  ‰ a 70 m y un valor mínimo de  $-68,4 \pm 0,18$  ‰ a 20 m. Por su parte, Cabassi et al. (2014) encontraron una composición isotópica máxima de  $\delta^{13}C_{CH_4}$   $-60,7$  ‰ a 70 m y una mínima de  $-77,2$  ‰ a 20 m

Cuadro 7

*Resultados obtenidos de  $\delta^{13}C_{CH_4}$  de las muestras recolectadas en campo y los datos de Cabassi et al. (2014), de el lago de Río Cuarto*

<b>Profundidad. (m)</b>	<b><math>\delta^{13}C_{CH_4}</math> (‰) (Campaña 1/8/19)</b>	<b><math>\delta^{13}C_{CH_4}</math> (‰) (Campaña 6/12/19)</b>	<b><math>\delta^{13}C_{CH_4}</math> (‰) (Campaña 28/2/20)</b>	<b><math>\delta^{13}C_{CH_4}</math> (‰) (Campaña 3/9/20)</b>	<b><math>\delta^{13}C_{CH_4}</math> (‰) Cabassi et al. (2014)</b>
10	*	$-65,3 \pm 0,40$	*	*	*
20	$-68,4 \pm 0,18$	$-65,0 \pm 0,21$	$-65,8 \pm 0,19$	$-64,04 \pm 0,48$	$-77,2$
30	$-66,1 \pm 0,21$	$-64,7 \pm 0,17$	$-65,1 \pm 0,18$	$-66,7 \pm 0,27$	$-74,8$
40	$-65,2 \pm 0,27$	$-64,2 \pm 0,17$	$-64,7 \pm 0,32$	$-67,8 \pm 0,35$	$-72,3$
50	$-65,0 \pm 0,23$	$-64,5 \pm 0,29$	$-64,5 \pm 0,18$	$-67,7 \pm 0,29$	$-63,8$

60	-64,2 ± 0,23	-64,7 ± 0,18	-64,6 ± 0,30	-67,9 ± 0,63	-61,9
70	-64,8 ± 0,21	-64,1 ± 0,26	-63,9 ± 0,25	-67,2 ± 0,27	-60,7

Fuente: Elaboración propia (2021)

#### 4.2.3 Composición isotópica $\delta^{13}C_{CO_2}$ .

Igual que el metano, la composición isotópica del carbono, ayuda a determinar el origen del gas (si es producto de la descomposición orgánica o inyección magmática) y también es dada en terminos de valor delta del carbono trece ( $\delta^{13}C$ ). En cuanto a los resultados de  $\delta^{13}C_{CO_2}$ , en dos de las cuatro giras realizadas se logró extraer suficiente gas hasta los 40 m, debido a que en menor no había suficiente gas para la prueba. Estos resultados se resumen en el Cuadro 8. Los datos expresan una mayor composición isotópica a los 70 m de profundidad, con un valor  $\delta^{13}C_{CO_2}$  de  $-5,1 \pm 0,29$  ‰ y una menor composición a 20 m con un valor  $\delta^{13}C_{CO_2}$   $-20,6 \pm 0,73$  ‰. Por su parte, en Cabassi et al. (2014) encontraron una mayor composición isotópica a los 60 m con  $\delta^{13}C_{CO_2}$   $-6,5$  ‰ y un mínimo a 20 m de  $\delta^{13}C_{CO_2}$   $-14,3$  ‰.

Cuadro 8

#### Composición isotópica de $CO_2$

Profundidad (m)	$\delta^{13}C_{CO_2}$ (‰) (Campaña 1/8/19)	$\delta^{13}C_{CO_2}$ (‰) (Campaña 6/12/19)	$\delta^{13}C_{CO_2}$ (‰) (Campaña 28/2/20)	$\delta^{13}C_{CO_2}$ (‰) (Campaña 3/9/20)	Cabassi 2014. (‰)
20	$-20,6 \pm 0,73$	*	*	*	-14,3
30	$-11,7 \pm 0,32$	$-8,4 \pm 0,39$	*	*	-14,2
40	$-7,8 \pm 0,36$	$-9,1 \pm 0,51$	$-10,7 \pm 0,32$	$-10,0 \pm 0,60$	-13,9
50	$-6,7 \pm 0,31$	$-7,5 \pm 0,30$	$-5,2 \pm 0,41$	$-6,6 \pm 0,42$	-11,6
60	$-6,6 \pm 0,31$	$-6,8 \pm 0,42$	$-6,5 \pm 0,31$	$-6,8 \pm 0,36$	-6,5
70	$-5,1 \pm 0,29$	$-6,8 \pm 0,39$	$-5,4 \pm ,29$	$-5,4 \pm 0,27$	-6,6

Fuente: elaboración propia (2021)

### 4.3 Volumen de agua y gas acumulado en el lago de Río Cuarto

Como se indicó en la metodología, para calcular el volumen de gas se utilizó ArcMap, principalmente para estimar el volumen de agua total que se encuentra entre cada capa muestreada de el lago, y posteriormente el volumen total de agua y la extensión en ha (hectáreas) (cuadro 9 y figura 5) con ayuda de la batimetría elaborada por Göcke et al. (1987). De acuerdo con este procedimiento, se estima un aproximado de  $10,7 \times 10^6 \text{ m}^3$  de agua en las casi 32 ha de extensión que posee el lago. La capa epilimnion (0 m-40 m) es la que posee mayor volumen de agua, con un aproximado de  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ , mientras que la capa hipolimnion tiene  $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Figura 5

*Modelo 3D, del fondo de el lago con volumen y hectáreas de agua que posee*



Fuente: elaboración propia (2021)

Cuadro 9

*Volumen de agua total de el lago de Río Cuarto*

Capa	Volumen de agua m <sup>3</sup>	Extensión en ha
Epilimnion	8x10 <sup>6</sup>	19
Hipolimnion	2,7x10 <sup>6</sup>	13
<b>Total</b>	<b>10,7 x10<sup>6</sup></b>	<b>32</b>

Fuente: elaboración propia (2021)

A partir de estos datos, se obtuvieron los valores de gas acumulado liberable de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> presente en el lago de Río Cuarto, por cada capa vertical muestreada que puede ser consultada en el Cuadro 6 de anexos y el gas total liberable por cada capa estratificada (Cuadro 10). Para el CO<sub>2</sub>, en la capa epilimnion se obtuvo un total aproximado de 5,6x10<sup>7</sup> L de gas, mientras que en la capa hipolimnion se encontro un total aproximado de 1,6x10<sup>7</sup> L, dando un total de CO<sub>2</sub> acumulado en el sistema de el lago de 7,2x10<sup>7</sup> L (0,000072 km<sup>3</sup>) de gas. Para el CH<sub>4</sub>, se obtiene, en la capa epilimnion, un total aproximado de 4,6x10<sup>8</sup> L de gas y; en la capa hipolimnion se encuentra un total aproximado de 1,13x10<sup>8</sup> L dando un total de gas acumulado de 5,74x10<sup>8</sup> L (0,00573 km<sup>3</sup>).

Cuadro 10

*Volmen total de gas acumulado liberable según capa.*

Capa	Volumen CO <sub>2</sub>	Volumen CH <sub>4</sub>
Epilimnion (L)	5,6x10 <sup>7</sup>	4,6 x10 <sup>8</sup>
Hipolimnion (L)	1,6x10 <sup>7</sup>	1,13 x10 <sup>8</sup>
Total (L)	7,2x10 <sup>7</sup>	5,73 x10 <sup>8</sup>
Total en km <sup>3</sup>	0,000072	0,00573

Fuente: elaboración propia (2021)

Como resultado de la acumulación del gas disuelto presente en el lago de Río Cuarto (Cuadro 11), se obtiene para el CO<sub>2</sub> un aproximado de 1,09x10<sup>10</sup> L de gas, mientras que para la capa hipolimnion se obtiene un aproximado de 3,55x10<sup>9</sup> L, para un total de gas acumulado disuelto de CO<sub>2</sub> de 1,44x10<sup>10</sup> L (1,44 km<sup>3</sup>). En el caso del CH<sub>4</sub>, se encuentra en la capa epilimnion un aproximado de 4,46x10<sup>8</sup> L y en la capa hipolimnion 2,54x10<sup>8</sup>L de gas; dando un total de 7x10<sup>8</sup>L (0,0007 km<sup>3</sup>) de gas. El detalle de los datos por capa muestreada puede ser consultada en el Cuadro 24 en el Anexo 7.3.2.

Cuadro 11

*Volumen total de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> disuelto según capa y volumen total del sistema*

<b>Capa</b>	<b>Volumen total de CO<sub>2</sub> disuelto</b>	<b>Volumen total de CH<sub>4</sub> disuelto</b>
Epilimnion (L)	1,09x10 <sup>10</sup>	4,46x10 <sup>8</sup>
Hipolimnion (L)	3,55x10 <sup>9</sup>	2,54x10 <sup>8</sup>
Total (L)	1,44x10 <sup>10</sup>	7x10 <sup>8</sup>
Total en km <sup>3</sup>	0,0144	0,0007

Fuente: elaboración propia (2021)

Finalmente, tomando en cuenta tanto el gas liberable como el gas disuelto en el agua, en la capa epilimnion (capa más superficial) se obtiene un total de gas acumulado de 1,19x10<sup>10</sup> L mientras que en la capa hipolimnion (capa más profunda) 3,9x10<sup>9</sup> L. Con un resultado en todo el sistema del lago de 5,09x10<sup>10</sup> L (0,059 km<sup>3</sup>) (cuadro 12).

Cuadro 12

Volumen total de gas acumulado en el lago (gas disuelto + gas liberable)

Capa	Volumen total aproximado
Epilimnion (L)	$1,19 \times 10^{10}$
Hipolimnion (L)	$3,9 \times 10^9$
Total (L)	$5,09 \times 10^{10}$
Total en $\text{km}^3$	0,059

Fuente: Elaboración propia (2021)

#### ***4.3.1 Acumulación de gas en el lago de Río Cuarto con respecto de otras lagunas volcánicas.***

Es importante comparar la cantidad de gas que se encuentra en Río Cuarto con respecto de otros lagos que presentan las mismas características (cuadro 13), con el fin brindar una referencia sobre el potencial de peligro que pueda presentar el lago de Río Cuarto para el cantón. De acuerdo con Trevor (2018) el lago Nyos, antes de su erupción en 1986, tenía un total de  $1,2 \text{ km}^3$  de gas acumulado. Kusakabe (2015), menciona que para el lago Monoun se encontró una acumulación de gas de  $0,68 \text{ km}^3$ . El lago con mayor cantidad de gas es el Kivu en la República Democrática del Congo, con un total de  $45 \text{ km}^3$ , a lo largo de 800 a 1000 años de actividad y acumulación (Shimid et al. 2002). Sin embargo, en Tassi et al. (2009), mencionan que en el lago Kivu se han encontrado acumulaciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  entre  $55 \text{ km}^3$  hasta los  $300 \text{ km}^3$  (Tassi et al. 2009). En este lago no se han registrado, hasta la fecha, erupciones límnicas debido a la extracción de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  para uso industrial, lo que genera una desgasificación controlada (Shimid et al. 2002). Estos mismos autores indican que existe un peligro inminente de que el gas que se encuentra acumulado sea liberado debido a las erupciones producidas por los volcanes cercanos

Cuadro 13

*Comparación de gas acumulado de Río Cuarto con respecto a otros lagos*

Nombre del lago	Área del lago m <sup>2</sup>	Profundidad de lago (m)	Acumulación de gas en km <sup>3</sup>
Lago Río Cuarto	3,18x10 <sup>3</sup>	70	0,059
Lago Nyos	1,58x10 <sup>4</sup>	208	1,2
Lago Monoun	1,4x10 <sup>6</sup>	100	0,68
Lago Kivu	2,7x10 <sup>9</sup>	485	45-300

Fuente: Elaboración propia (2021)

#### 4.4 Evaluación del peligro por liberación y acumulación de gas

##### 4.4.1. Dirección y velocidad predominante del viento.

Como objetivo de la investigación se planteó un análisis del potencial de peligro ante una posible liberación de gas en el lago de Río Cuarto y las repercusiones sobre la comunidad y las actividades agropecuarias que en ella se desarrollan. Datos publicados, mencionan que para la emergencia del lago Nyos, en 1986, las principales muertes de seres humanos se dieron en el primer kilómetro de distancia con respecto del lago y afectó hasta los 5 km o más de distancia (Giggenbach et al. 1990).

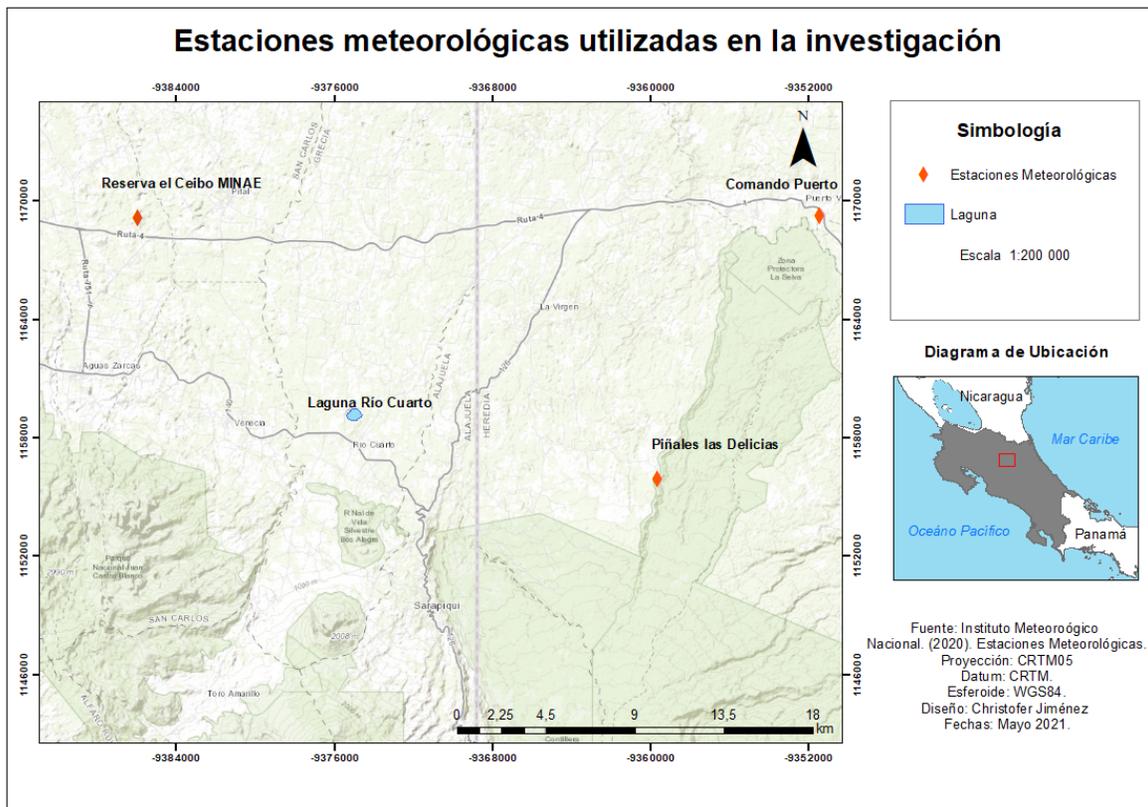
A partir de los datos de tres estaciones meteorológicas que se encuentran cercanas al lago (Reserva el Ceibo MINAE, ubicada al Noroeste con respecto al área de estudio; Comando Puerto Viejo ubicada al Noreste y Piñales las Delicias ubicada al Sureste) (Mapa 2), se extrajo la velocidad y dirección del viento diaria y horaria, desde el año 2016 hasta el 2020.

Dentro de los resultados, se obtuvo que para la época seca la dirección del viento predominante es del este con una velocidad que varía de los 1,2 m/s a los 1,3 m/s. En la época

lluviosa el viento cambia ligeramente, proveniente del noreste con una velocidad que varía de los 0,8 m/s a los 1,1 m/s (Cuadro 14, Gráfico 1).

Mapa 2

*Estaciones meteorológicas utilizadas para promediar la dirección y velocidad del viento*



Cuadro 14

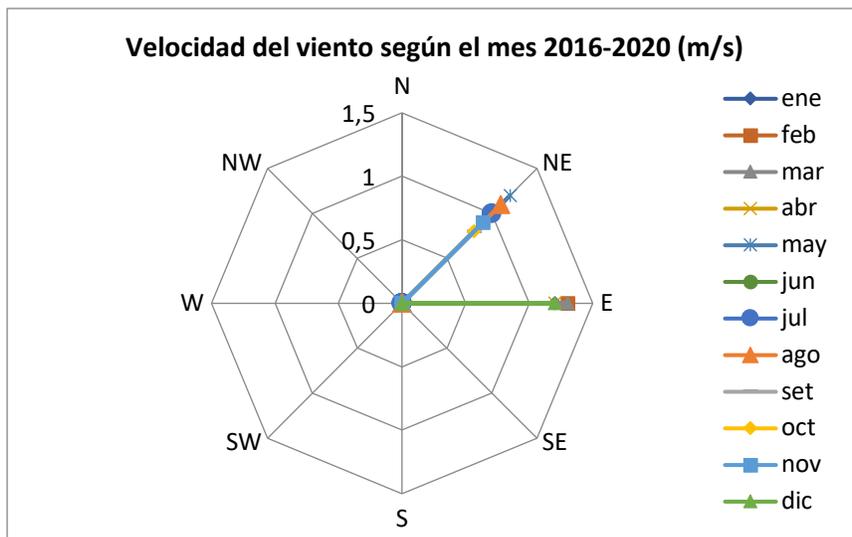
*Promedio mensual de la velocidad y dirección del viento m/s del 2016 hasta el 2020*

Velocidad y dirección del viento 2016-2020 m/s								
mes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
ene	0	0	1,2	0	0	0	0	0
feb	0	0	1,3	0	0	0	0	0
mar	0	0	1,3	0	0	0	0	0
abr	0	0	1,2	0	0	0	0	0
may	0	1,2	0	0	0	0	0	0
jun	0	1	0	0	0	0	0	0
jul	0	1	0	0	0	0	0	0
ago	0	1,1	0	0	0	0	0	0
set	0	0,8	0	0	0	0	0	0
oct	0	0,8	0	0	0	0	0	0
nov	0	0,9	0	0	0	0	0	0
dic	0	0	1,2	0	0	0	0	0

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2020)

Gráfico 1

*Dirección y velocidad del viento predominante del 2016 al 2020*

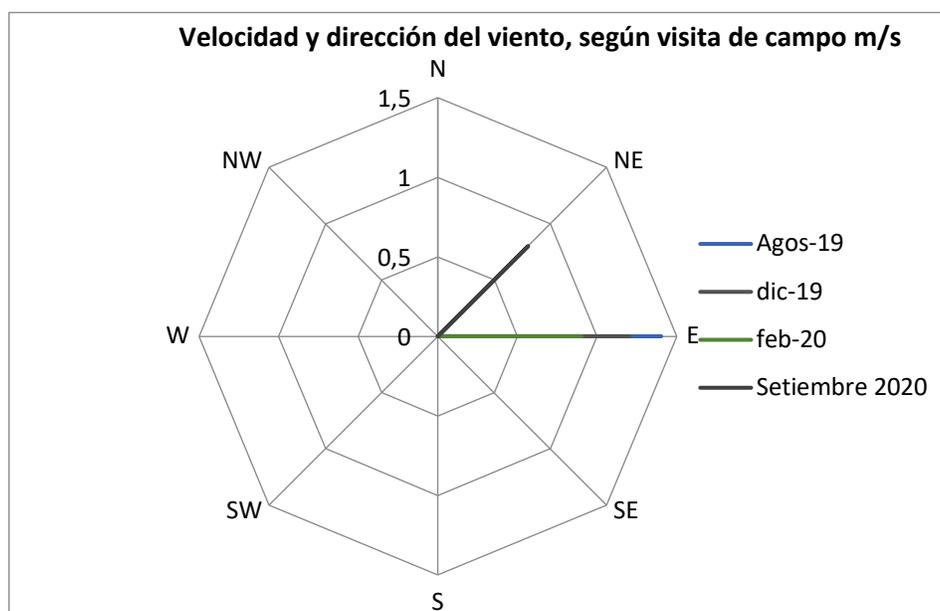


Fuente: IMN (2020)

El gráfico 2, muestra la dirección y velocidad del viento en los meses en los cuales se realizó la recolección de muestras en el campo. En agosto y diciembre 2019 y febrero del 2020 la dirección predominante fue del este con velocidades entre 1,3 m/s a los 0,9 m/s. En setiembre del 2020 la dirección predominante fue del noreste con una velocidad promedio de 0,8 m/s.

Gráfico 2

*Velocidad y dirección del viento m/s según visita de campo realizada a el lago de Río Cuarto*



Fuente: IMN (2020)

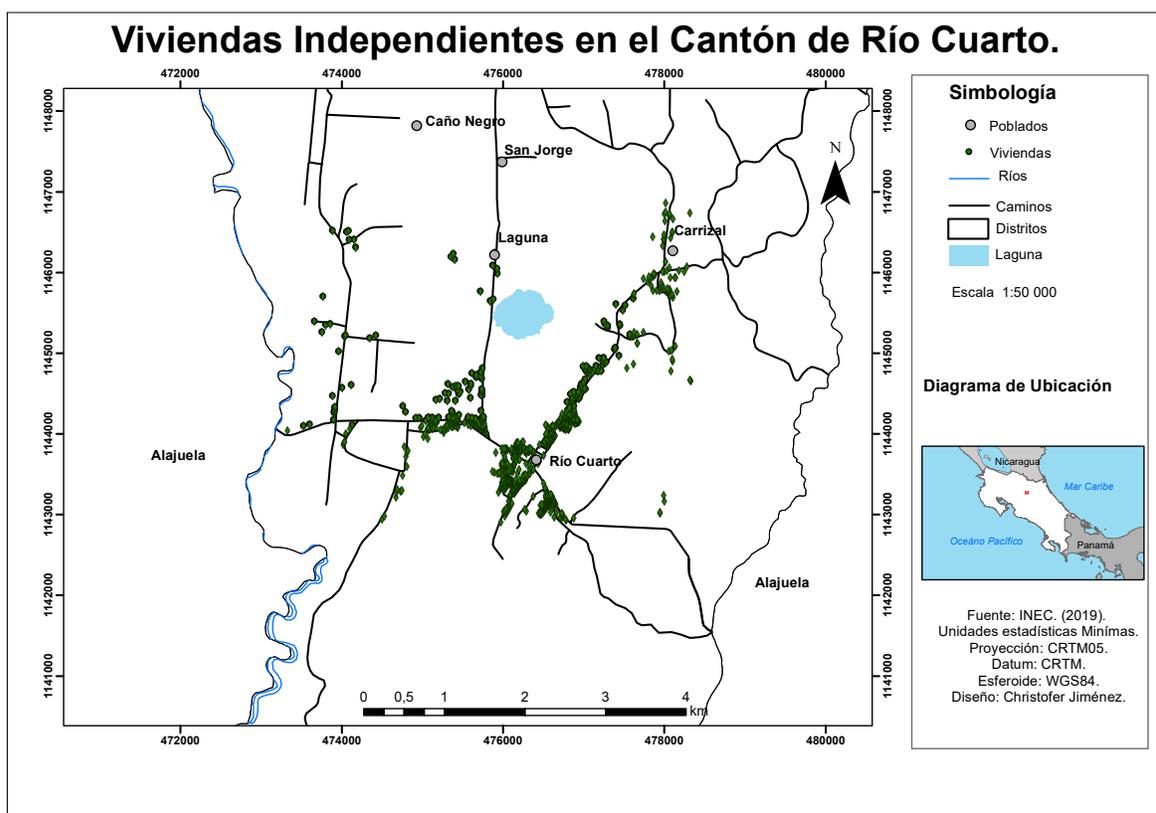
#### ***4.4.2 Localización de viviendas y coberturas de la tierra en el área de estudio.***

Las Unidades Estadísticas Mínimas (UGM) proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (2019) indican que en el cantón de Río Cuarto hay 4 431 viviendas (Mapa 3). De estas viviendas, 116 se encuentran en un radio de 1 km de distancia con respecto al lago, 15 al oeste, 148 al sureste, 492 al sur y 71 al este (cuadro 15). Estos datos son de vital

importancia, debido a que permiten correlacionar la cantidad de viviendas en las cuales viven familias con la distribución y concentración de gas tanto de CO<sub>2</sub> como de CH<sub>4</sub>, las cuales serán mostradas en la sección 4.4.3.

Mapa 3

*Muestra las viviendas dentro del cantón de Río Cuarto*



Fuente: Elaboración propia (2019)

Cuadro 15

*Muestra las viviendas en cada área del cantón y del área de estudio*

Viviendas totales en el cantón de Río Cuarto	Viviendas en el primer km a la redonda de el lago	Viviendas al oeste de el lago	Viviendas al suroeste	Viviendas al sur	Viviendas al este
4431	116	15	148	492	71

Fuente: INEC (2019)

Para identificar las diversas actividades agropecuarias que se realizan en el área de estudio se procedió a elaborar un mapa de coberturas de la Tierra, de acuerdo con el manual establecido por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) del 2015 y con ayuda de imágenes satelitales y vuelos con dron. Las imágenes satelitales corresponden al año 2020, tienen una resolución de 1280 x 720 pixeles y una escala de edición 1:1500. Las imágenes del dron fueron tomadas alrededor del lago en el año 2020 (Anexo 7.4). De esta forma se logró identificar que hay pastos de ganadería en un total de 2822 ha, cultivos estacionales (maíz y soja, principalmente) con 42 ha, cultivos permanentes como la piña en 476 ha, los terrenos que mezclan los cultivos con los pastos cubren 170 ha, el bosque secundario corresponde a 550 ha (principalmente en los alrededores de el lago) y 649 ha con cobertura urbana discontinuas. Estos datos pueden observarse en el cuadro 20 y el mapa 4.

Cuadro 16

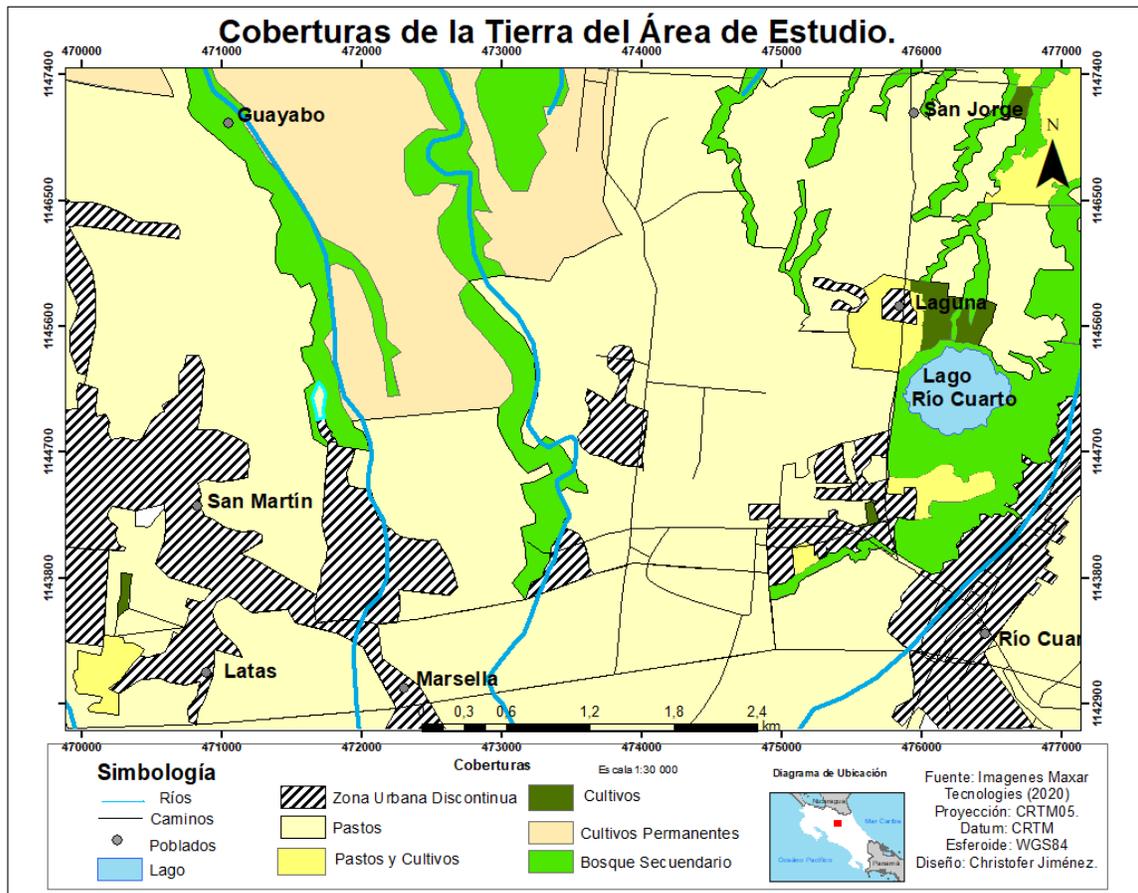
*Muestras las hectáreas de cada cobertura identificada en el área de estudio*

Zona urbana discontinua (ha. / %)	Pastos (ha. / %)	Pastos y cultivos (ha. / %)	Cultivos permanentes (ha. / %)	Bosque secundario (ha. / %)	Cultivos (ha. / %)
649 (13)	2822 (59)	170 (4)	476 (10)	550 (11)	42 (3)

Fuente: elaboración propia (2021)

Mapa 4

Mapa de coberturas de la Tierra del área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2021)

En cuanto al porcentaje de extensión de cada cobertura, se identificó que: la zona urbana discontinua, abarca el 13% del área de estudio con una parte ubicada aproximadamente a 1 km sureste (centro del cantón), noroeste y suroeste del lago y otra parte más hacia el este del lago. Los pastos con 59%, se encuentran distribuidos por casi toda el área de estudio y la cobertura con menor extensión es la de cultivos ubicada al norte y sur del lago principalmente, representando únicamente el 3% (Cuadro 16).

Cabe mencionar también, el bosque secundario es la cobertura que se encuentra más cerca del foco emisor, estando a solo pocos metros, por lo que la flora y fauna serían los primeros seres en ser afectados por los gases en caso de que ocurra una erupción límnic.

#### ***4.4.3 Potencial de dispersión de gas en el área de estudio***

Por medio del modelo AERMOD se elaboran dos escenarios de dispersión de gas. El primero representa únicamente el escape de gas liberable que se encuentra en la capa hipolimnion. Esta erupción supone una duración de 10 minutos y una exposición de las personas y animales frente al gas durante una hora, este escenario se divide en dos, correspondiente con una erupción a mediodía y otra a medianoche. La intención de utilizar estos momentos del día fue considerar si las personas se encontraban en sus casas de habitación durmiendo o se encontraban en sus labores diarias fuera de las mismas, así como el efecto montaña-valle en el cual puede producir una mayor concentración de gas en horas de la noche.

El segundo grupo de escenarios corresponde a una erupción límnic, del gas disuelto que se encuentra acumulado en el lago, durante una erupción de 10 min y una exposición de las personas y animales durante una hora, tanto a mediodía como a medianoche tomando en cuenta los datos de dióxido de carbono expuesto por Cabassi et al. (2014).

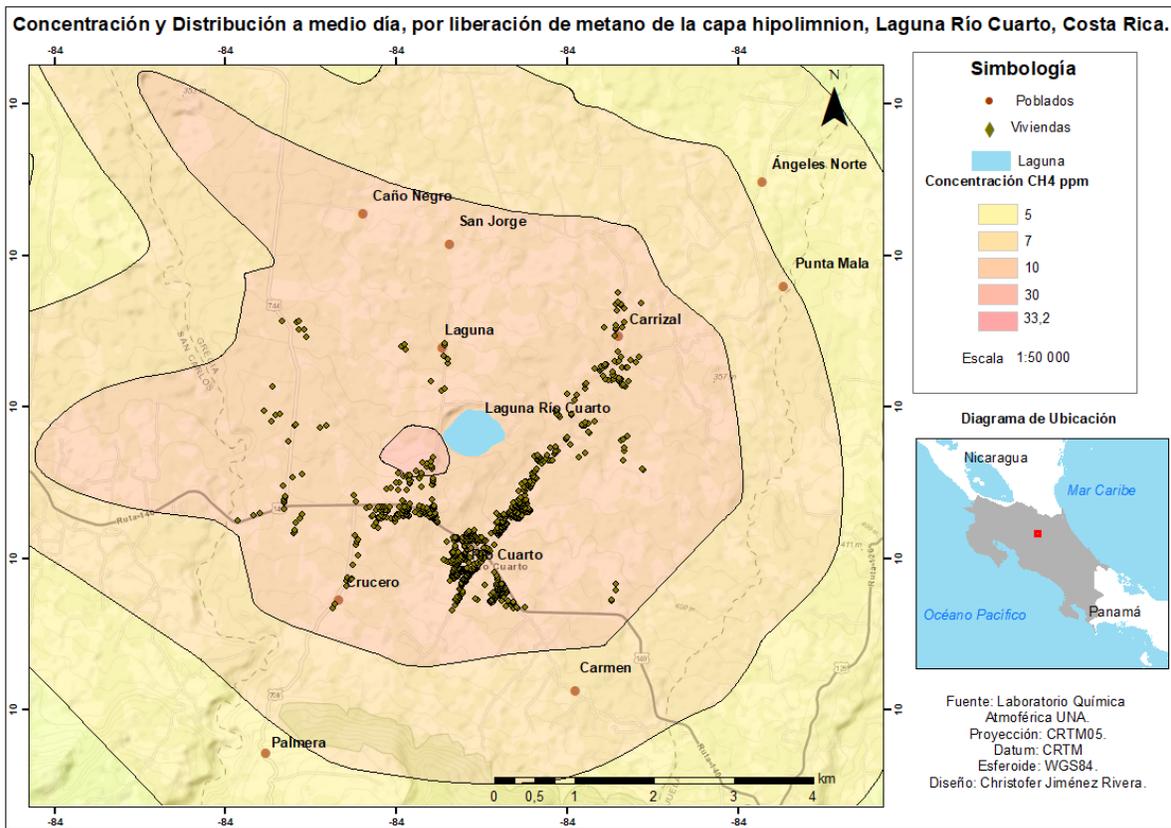
##### ***4.4.3.1 Escenario erupción límnic con liberación del gas de la capa hipolimnion.***

En el escenario 1 (mapa 5) se muestran las concentraciones y distribuciones de metano al mediodía. La mayor concentración se encuentra en los alrededores de el lago, aproximadamente en el primer kilómetro, con un valor de 33,2 ppm (0,00333%). La segunda mayor concentración es de 30,0 ppm (0,0030%) y se puede identificar con un color naranja oscuro. La tercera concentración es de 10,0 ppm (0,0010%) y la cuarta es de 7,0 ppm (0,0007%). Las restantes zonas se encuentran fuera del cantón de Río Cuarto y sus concentraciones son muy bajas con respecto de las que se presentan alrededor del lago.

En el mapa 6 se presentan las concentraciones y distribuciones de CH<sub>4</sub> a medianoche. En el se observa una distribución de los gases hacia el suroeste de el lago, con una concentración máxima de 304 ppm (0,0304%) y una mínima de 5 ppm (0,0005%).

### Mapa 5

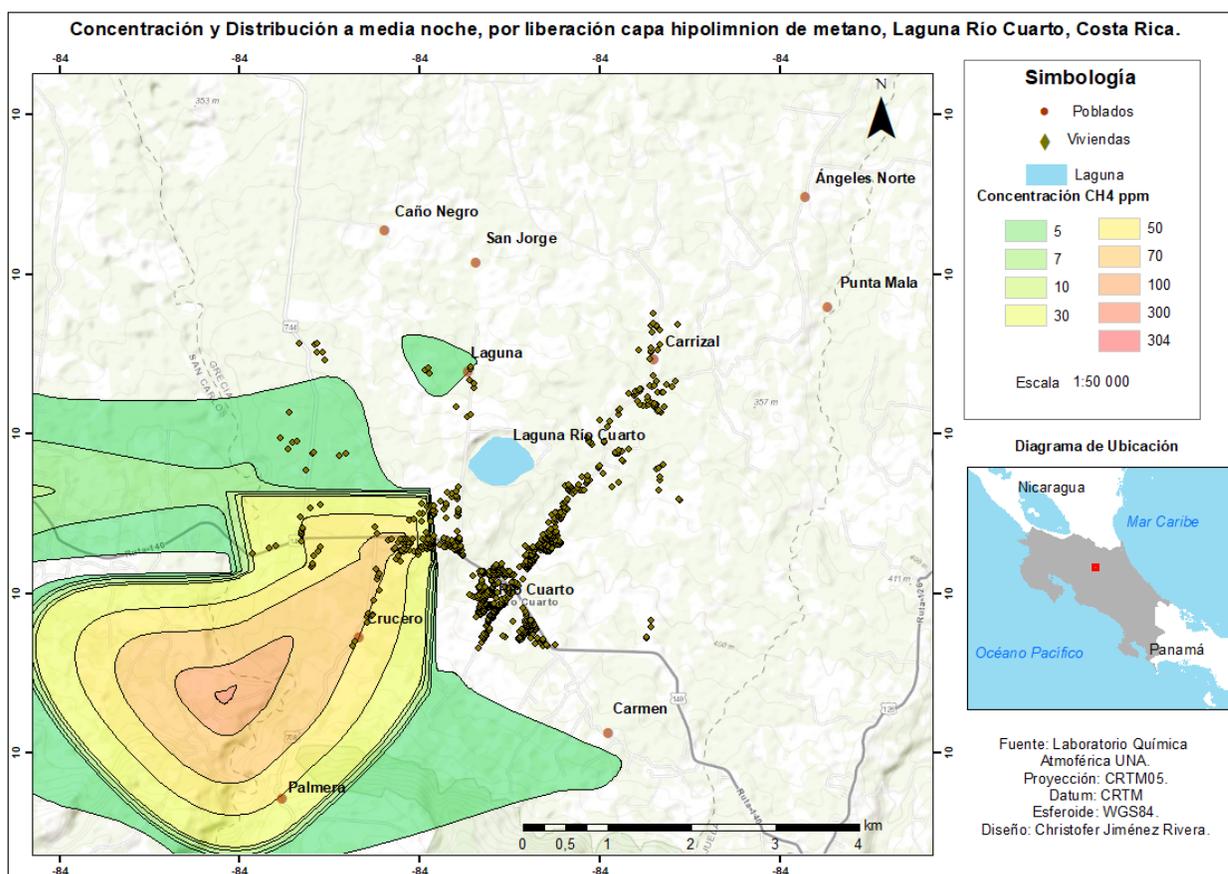
Escenario 1: *modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a mediodía*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 6

Escenario 1: *modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

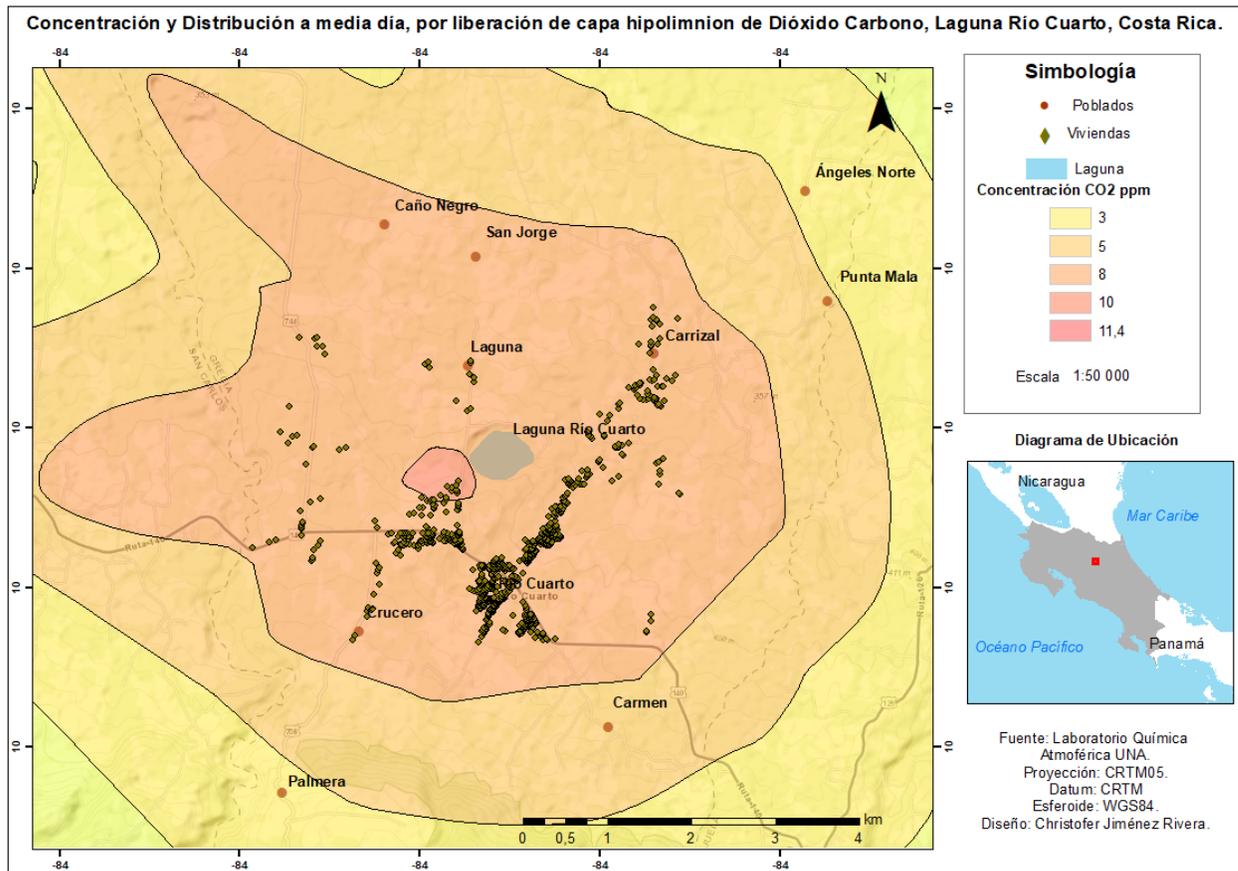
En el escenario 1 (mapa 7) la mayor concentración de dióxido de carbono al mediodía es de 11,4 ppm (0,0011%) en los alrededores de el lago, con un segundo anillo de 10,0 ppm (0,0010%) entre 1 y 2 km de distancia del lago. La tercera concentración de CO<sub>2</sub> más alta es de 8,0 ppm (0,0008%) con un anillo que rodea al lago tomando principalmente hacia el oeste y noroeste de el lago; hay otro anillo que toma dirección oeste, noreste y norte con una concentración de 5,0 ppm (0,0005%). El resto se encuentran fuera del área de estudio.

En el mapa 8 se presentan los datos de una erupción a medianoche cuando la mayor concentración de gas se presentaría hacia el suroeste de el lago con un total de 104 ppm

(0,0104%). La segunda concentración es de 100 ppm, (0,01%) y la tercera zona cuenta con una concentración 80 ppm (0,008%).

### Mapa 7

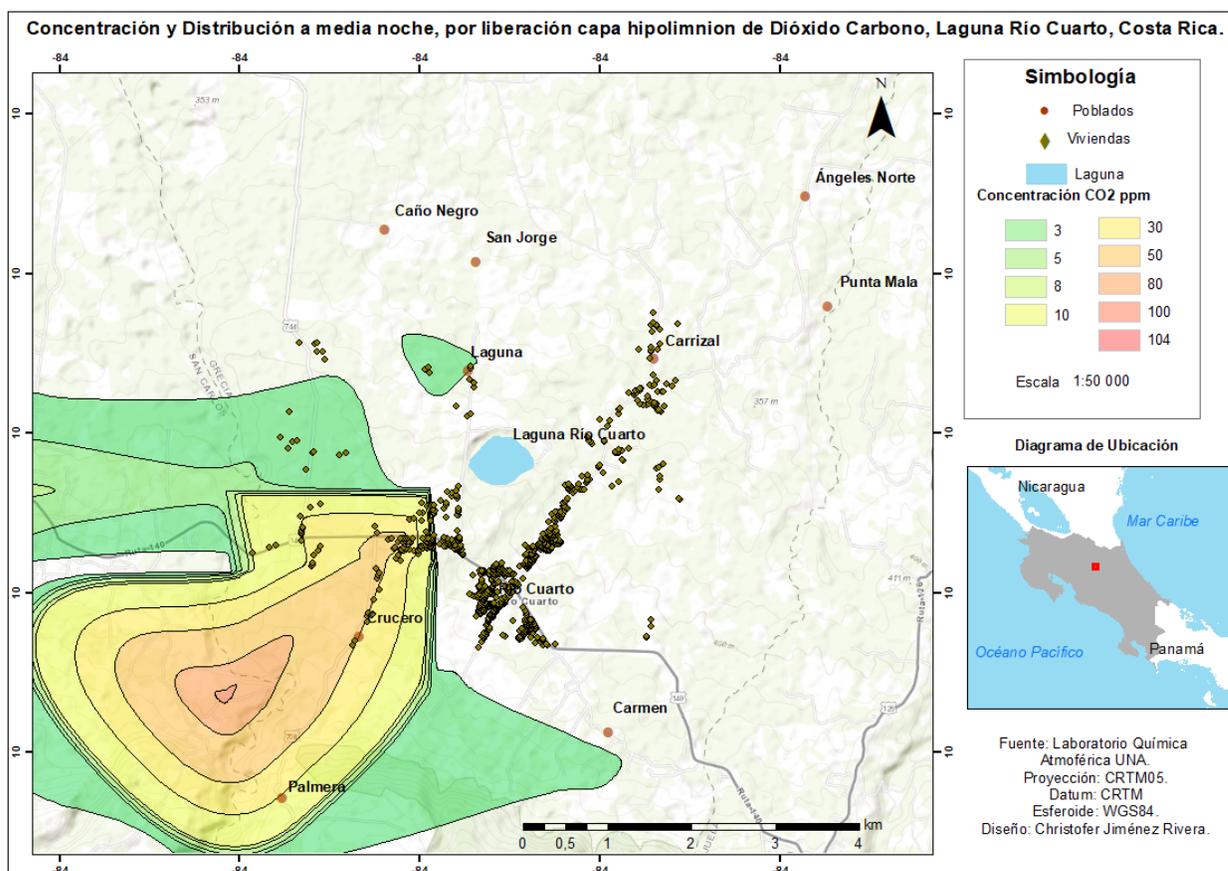
Escenario 1: *modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a mediodía*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 8

Escenario 1: *modelo Aermoc con concentración y distribución de dióxido de carbono, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

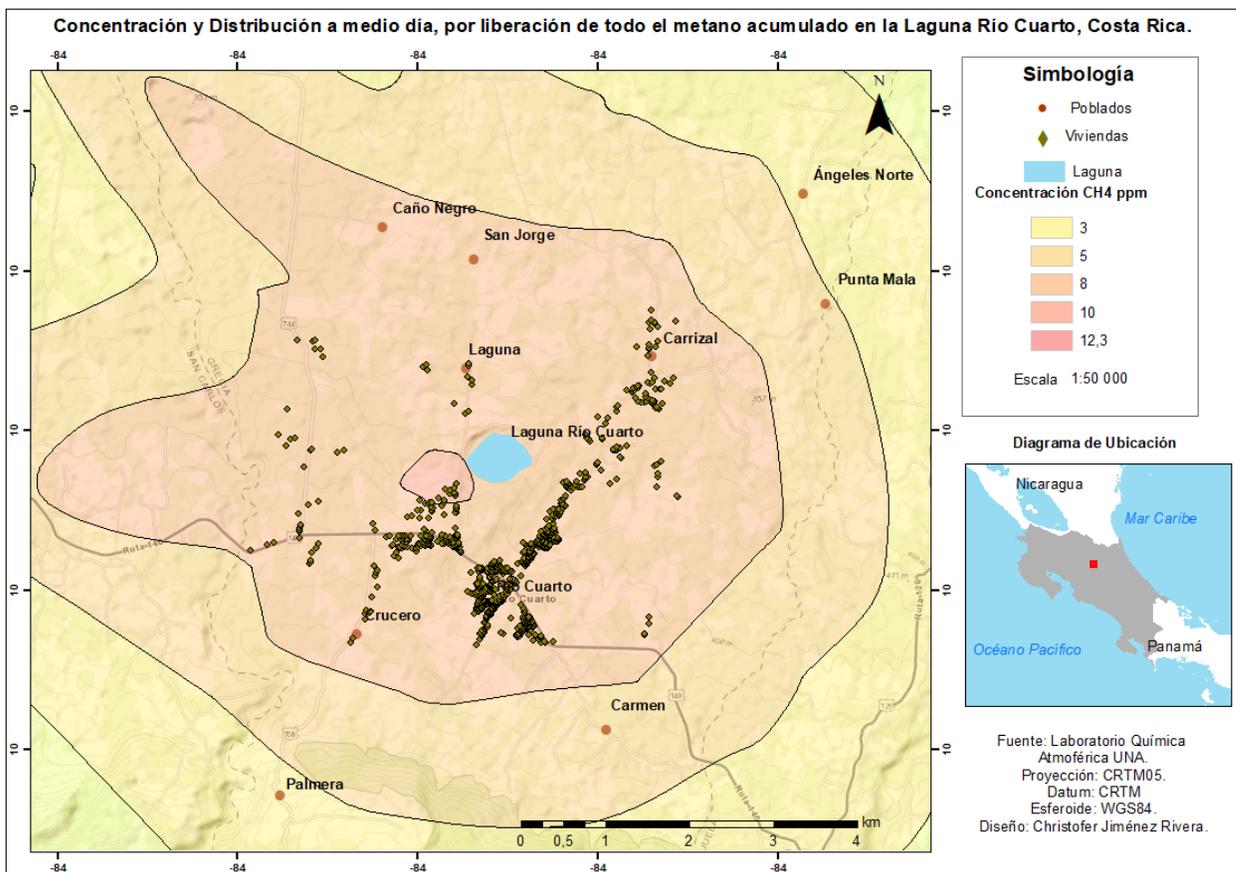
### 4.4.3.2 Escenario dos: *erupción límnica con liberación de todo el gas acumulado en el sistema del lago*

En el escenario 2 se considera una erupción límnica del lago con la liberación de todo el gas disuelto que se encuentra acumulado, una erupción de 10 minutos y una exposición de las personas y animales ante el gas de una hora. En una erupción a mediodía (mapa 9) se encuentra una mayor concentración de metano alrededor del lago con un total de 12,3 ppm (0,012%). Hay una segunda zona con una concentración de 10,0 ppm (0,010%), la tercera

zona presenta 8,0 ppm (0,008%) con dirección oeste y noreste. Para medianoche (mapa 10) la mayor concentración de metano es hacia el suroeste de el lago con un total de 113 ppm (0,0113%), una segunda zona tiene una concentración de 100 ppm (0,01%), la tercera zona presenta 80 ppm (0,008%) y la cuarta 50 ppm (0,005%).

### Mapa 9

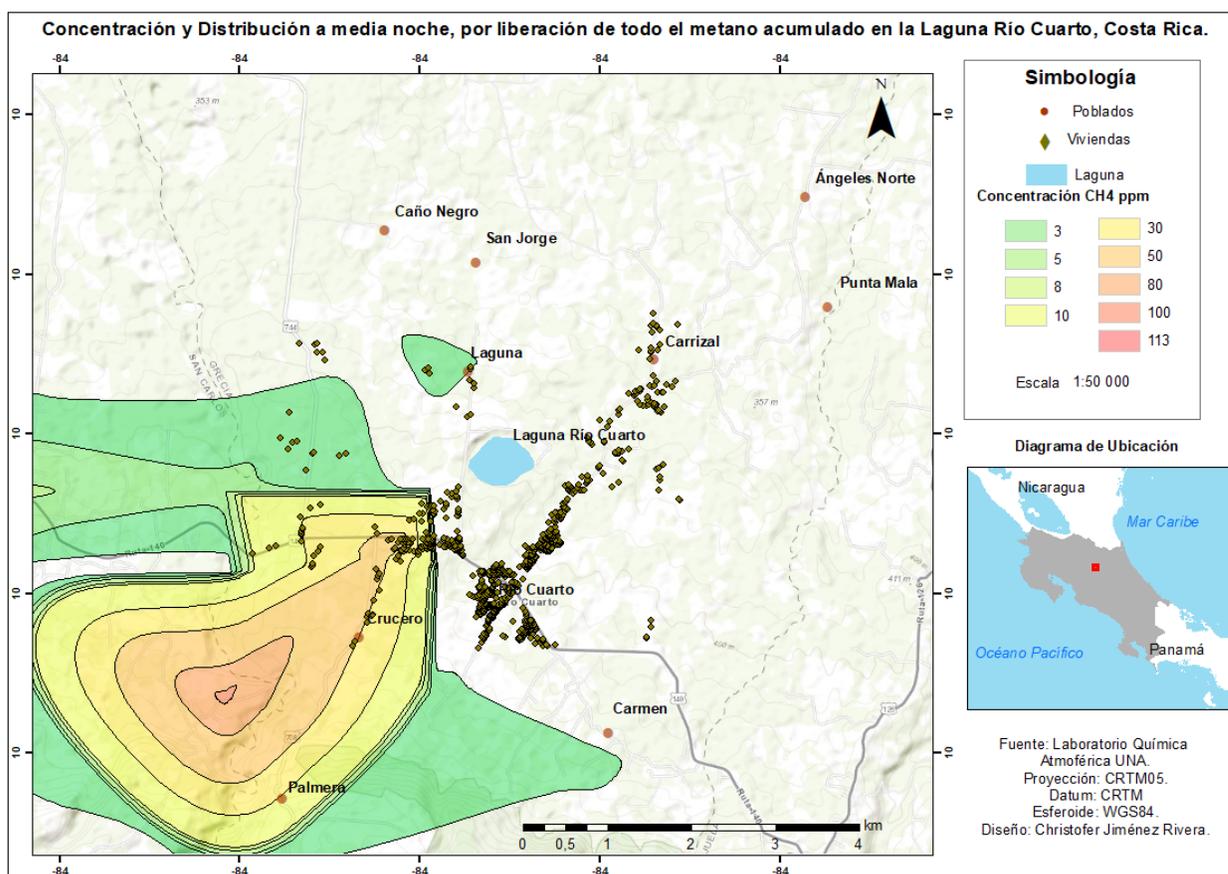
Escenario 2: *modelo Aermod del segundo escenario con concentración y distribución de metano, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora durante el mediodía*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 10

Escenario 2: *modelo Aermod del segundo escenario con concentración y distribución de metano, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche*



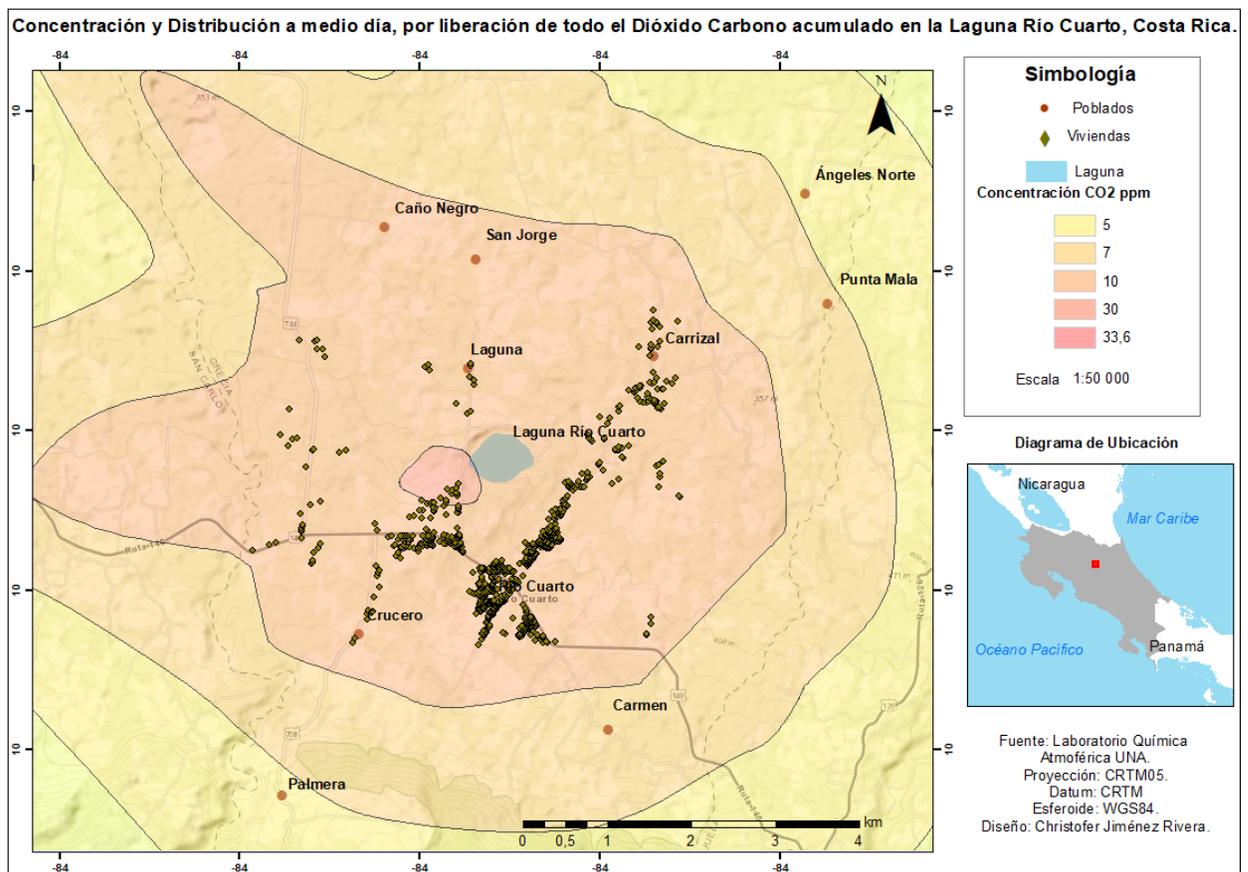
Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

El dióxido de carbono presenta una mayor concentración de 33,6 ppm (0,0033%) al Suroeste, para el escenario 2 a mediodía (mapa 11), hay una segunda zona de aproximadamente 1 kilómetro a la redonda de el lago con una concentración de 30,0 ppm (0,003%) con dirección oeste y noreste. La tercera zona de afectación sigue el mismo patrón de distribución que la zona dos, sin embargo, esta cuenta con una concentración de 10,0 ppm (0,0010%) y abarca una mayor área. La cuarta zona cuenta con una concentración de 7,0 ppm (0,0007%) con dirección oeste, noroeste y norte de el lago. A medianoche (mapa 12) la mayor

concentración se encuentra hacia el suroeste de el lago, en un área muy pequeña, con un total de 308 ppm (0,0308%), la segunda área se encuentra hacia la misma dirección con una concentración de 300 ppm (0,03%) y cubre casi todo el cantón hacia el suroeste de el lago. Hacia el este, se encuentra una pequeña zona con una concentración que ronda los 3 ppm (0,0003%).

Mapa 11

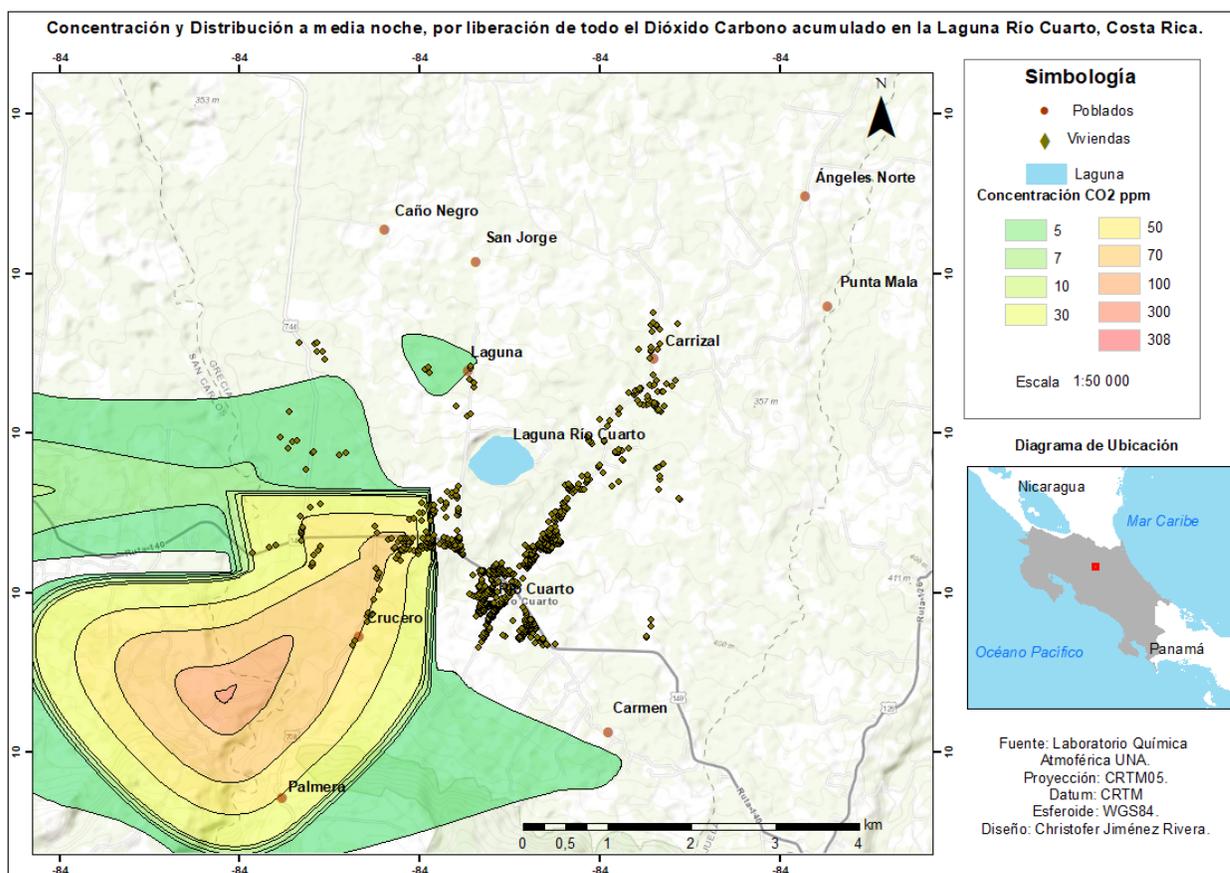
Escenario 2: *modelo Aermod del segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora, a mediodía*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 12

Escenario 2: *modelo Aermod del segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche*



Fuente: propia con apoyo del Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

#### 4.4.4 Viviendas y zonas agropecuarias afectadas ante una posible erupción límnic

Si bien es cierto, en caso de una erupción límnic el gas no afectará o causará daños sobre las infraestructuras del área de estudio, pero si estarán expuestas las personas que se encuentran dentro de ellas.

Para el primer escenario de distribución y concentración de CH<sub>4</sub> a mediodía, hay 842 que se ven expuestas a una concentración de 33,2 ppm (0,0033%) (cuadro 21). Para un evento de CH<sub>4</sub> a medianoche, 107 viviendas se exponen a concentraciones que varían entre los 300 ppm (0,03%) y los 5 ppm (0,0005%). Ante un evento de dióxido de carbono a mediodía, 842 viviendas se verán expuestas a una concentración de 11,4 ppm (0,0011%). 107 viviendas se podrían ver expuestas con concentraciones que varían entre los 100 ppm (0,01%) y 3 ppm (0,0003%) en un evento a medianoche (Cuadro 17). Cabe mencionar que estas concentraciones de CO<sub>2</sub> son por encima de las concentraciones de CO<sub>2</sub> que posee el aire, las cuales son aproximadamente de 400 ppm.

De acuerdo al segundo escenario, 842 viviendas se podrían ver expuestas a concentraciones de 12,3 ppm (0,0012%) ante un evento con metano a mediodía. Para medianoche, 107 viviendas se verían expuestas con concentraciones que varían entre los 100 ppm (0,01%) y los 3 ppm (0,0003%). Para un evento de día con dióxido de carbono, 842 viviendas estarían expuestas a una concentración de 33,6 ppm (0,033%); para medianoche, 107 viviendas se verían expuestas con concentraciones que van de los 300 ppm (0,03%) a los 5 ppm (0,0005%) (cuadro 18).

Cuadro 17

*Número de viviendas expuestas a las concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> para el escenario 1*

<b>Escenario</b>	<b>N° Viviendas</b>	<b>Concentración ppm</b>	<b>Concentración %</b>
CH <sub>4</sub> día	842	33,2	0,0033
CH <sub>4</sub> noche	22	300	0,03
	25	100	0,01
	45	70	0,0070
	15	5	0,0005
CO <sub>2</sub> día	842	11,4	0,0011
CO <sub>2</sub> noche	22	100	0,01
	25	80	0,0080
	45	50	0,0050
	15	3	0,0003

Fuente: Elaboración propia (2021)

Cuadro 18

*Número de viviendas expuestas a las concentraciones de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> para el escenario 2*

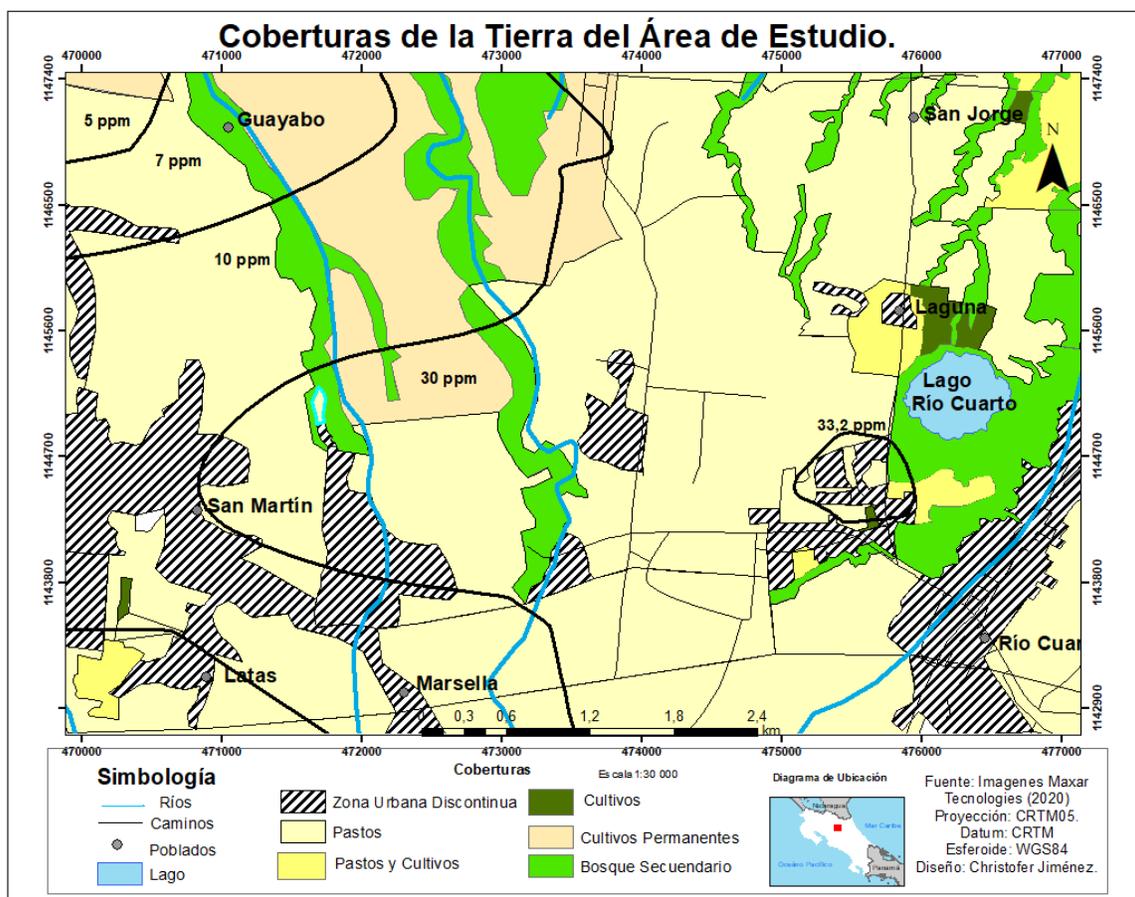
<b>Escenarios</b>	<b>N° Viviendas</b>	<b>Concentración ppm</b>	<b>Concentración %</b>
CH <sub>4</sub> día	842	12,3	0,0012
CH <sub>4</sub> noche	22	100	0,01
	25	80	0,0080
	45	50	0,0050
	15	3	0,0003
CO <sub>2</sub> día	842	33,6	0,0033
CO <sub>2</sub> noche	22	300	0,03
	25	100	0,01
	45	70	0,0070
	15	5	0,0005

Fuente: Elaboración propia (2021)

Para un escenario de día la mayor concentración de gas de CH<sub>4</sub> se encontrará al Suroeste de el lago con una concentración máxima de 33,2 ppm tal y como se muestra en el Mapa 13, esta concentración se posicionaría principalmente sobre la zona urbana discontinua. Seguido, hacia el Oeste se encontraría una concentración aproximada de 30 ppm abarcando practicamente todas las coberturas identificadas en el área de estudio.

Mapa 13

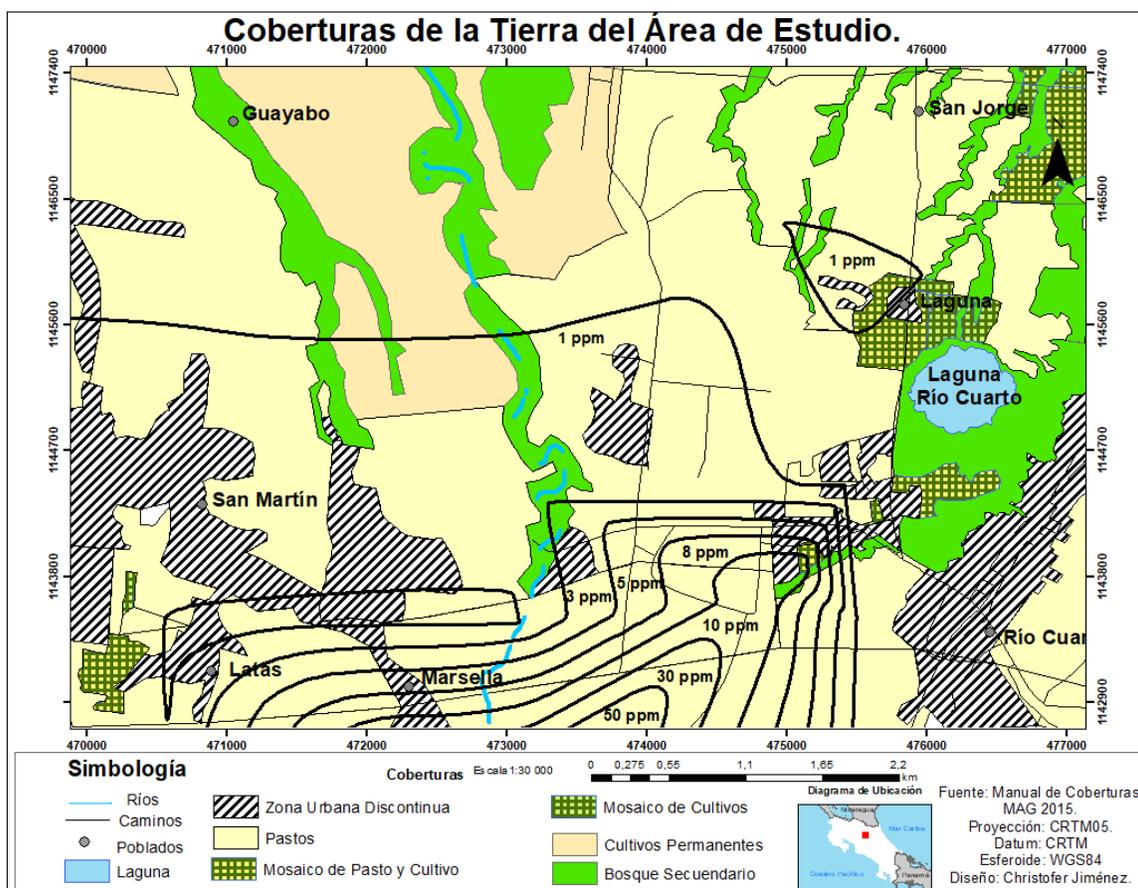
*Coberturas de la tierra con una sobreposición de un escenario de día, donde se muestra las concentraciones de CH<sub>4</sub>.*



Para un escenario de noche, donde se libere todo el gas acumulado del sistema (Mapa 14), la cobertura de pastos ubicada al Suroeste del lago será la más afectada con concentraciones aproximadas a los 50 ppm y la cobertura que se verá expuesta a una menor concentración (8 ppm y 3 ppm) son los bosques, zonas urbanas discontinuas y algunos zonas de pastos ubicadas al Oeste del lago, hacia el Este del lago ninguna cobertura será afectada. Esto, debido a que la distribución del gas tiende a una predominante hacia el Suroeste del lago; cabe resaltar, que estas concentraciones no son perjudiciales ni para el ser humano, ni para los animales y actividades agropecuarias desarrolladas en el área de estudio.

Mapa 14

*Mapa de coberturas de la Tierra del área de estudio, escenario de noche.*



Fuente: Elaboración propia (2021)

## 5. Discusión de resultados

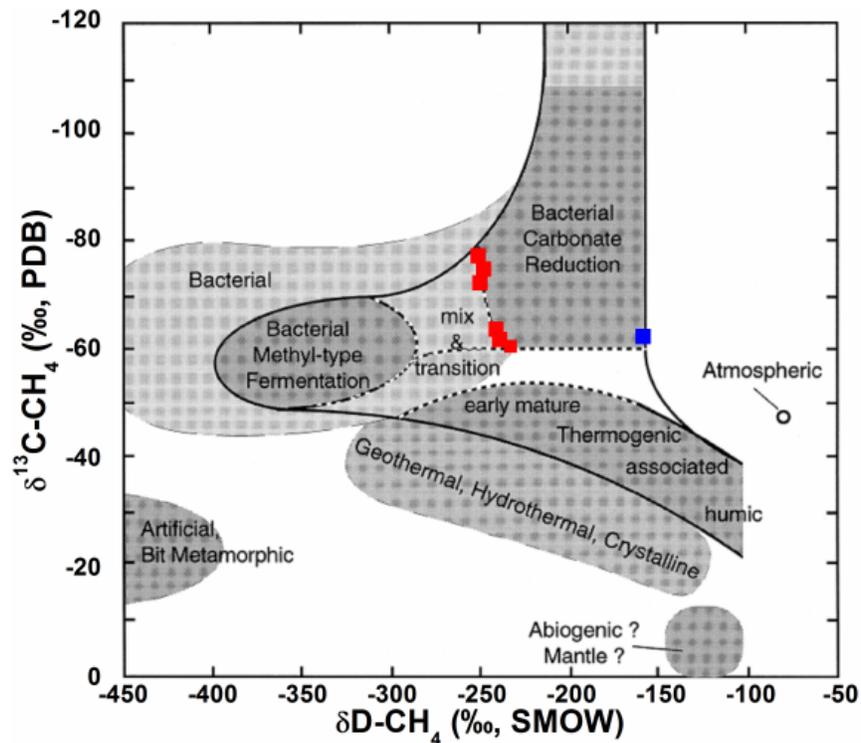
### 5.1. Origen y composición del gas encontrado en el lago de Río Cuarto

El CO<sub>2</sub> con una composición hidrotermal puede presentar valores desde los -2‰ hasta los -8‰; valores inferior a -9‰ corresponde a un dióxido de carbono de origen orgánico, según su entorno (Bini et al.2019). El CO<sub>2</sub> de origen magmático tiene una composición isotópica con un valor de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  entre -5‰ y -7‰, un valor inferior a los -8‰ , generalmente corresponde a un origen orgánico (Sharp, 2007). Los resultados obtenidos en la investigación son de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  entre -5,1‰ y -7,5‰ en la capa hipolimnion que da como referencia una composición del CO<sub>2</sub> magmático (Bini et al. 2019). En la capa epilimnion se obtuvieron composiciones de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  entre -7,8‰ a 40 m y -20,6‰ a 20 m, por lo que se puede concluir que en esta capa el CO<sub>2</sub> es de origen bacteriano, con excepción del -7,8‰ encontrado en la primera gira. Esta diferencia de composición del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  entre cada capa puede atribuirse a que en la capa hipolimnion se encuentran una menor cantidad de bacterias capaces de descomponer el CO<sub>2</sub>. En la capa epilimnion hay mayor cantidad de agentes que descomponen el CO<sub>2</sub> y lo transforman en CH<sub>4</sub>.

El metano producido por procesos abióticos genera los reservorios más comunes en la tierra y es de los más explotados a escala comercial (Etiopie et al. 2013). Por su parte, los reservorios de metano biótico formados por reacciones químicas son muy pequeños, por lo que es raro que se exploten a escala comercial. Estos autores mencionan que para diferenciar el origen del CH<sub>4</sub> es necesario realizar estudios isotópicos, en los cuales un resultado  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  a partir de -57‰ indica una composición orgánica, mientras que una composición magmática puede variar entre -9‰ hasta los -33‰, siempre y cuando el metano no interaccione con microorganismos (cuando se encuentra en “estado ultra puro”). Por su parte, Sharp (2007), también menciona diferentes composiciones isotópicas según la fuente de gas y el agente que lo modifique. Para el caso del metano, este autor menciona que un CH<sub>4</sub> hidrotermal tiene una composición isotópica con un valor  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  entre -20‰ y -50‰, mientras que una composición isotópica entre -50‰ y -79‰ es producto de la interacción de agentes microscópicos capaces de producir metano (bacterias) que pueden sobrevivir a entornos con altas presiones y poca presencia de oxígeno (Figura 6). Para la capa hipolimnion a partir de

estos valores se encontró una composición isotópica  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  entre  $-63,9\%$  y  $-67,9\%$ . En la capa epilimnion se encontró una composición isotópica entre  $-67,8\%$  y  $-65,3\%$  a 10 m de profundidad, lo que da como resultado una composición orgánica en ambas capas. Estos resultados pueden deberse a dos factores: el primero indica que en el lago de Río Cuarto existe una gran cantidad de bacterias tanto metanotrofo como deltaproteobacterias, siendo las primeras capaces de modificar el  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$  y las segundas fijadoras de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  que las modifican a  $\text{CH}_4$  (Cabassi et al. 2014). El segundo factor indica que el  $\text{CH}_4$  es inestable en condiciones del manto, por lo que este gas se produce en la corteza debido a la descomposición térmica de sedimentos y materiales orgánicos (Miller et al. 1992).

Figura 6  
*Clasificación del origen de  $\text{CH}_4$  basado en su composición isotópica  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$*



Fuente: Cabassi et al. (2014)

A partir de los resultados anteriormente discutidos se obtiene la razón entre el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, con valores para la capa hipolimnion entre 0,10 y 0,21 y para la capa epilimnion de 0,05 hasta 0,29. Con una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> con respecto de CH<sub>4</sub> en la capa más profunda de el lago y una menor cantidad de CO<sub>2</sub> con respecto del CH<sub>4</sub> en la capa más superficial. Este resultado se debe posiblemente a dos factores: la presencia de bacterias modificadores que reducen el CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>, en su mayoría en la capa epilimnion, que generan una menor presencia de CO<sub>2</sub> en esta capa. El segundo factor se le puede atribuir a la solubilidad de cada gas. Según el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes de España (2020), el CO<sub>2</sub> en agua meteóricas a 25°C y 30 °C posee una solubilidad de 1,45 g/L, mientras que el metano posee una solubilidad de 227 g/L , lo que lo hace un gas poco soluble en el agua, debido a que las proporciones de sus componentes no son constantes y generan variaciones de una muestra a otra.

Si se comparan los resultados de la investigación con los expuestos por Cabassi (2014), existe una leve variabilidad en la composición isotópica de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. En el caso del CH<sub>4</sub> hay una diferencia de -8,8‰ a 20 m entre los datos expuestos por el autor mencionado y los datos de la investigación; a 70 m hay una diferencia de -6,5‰, con una composición de origen bacteriana. Para el CO<sub>2</sub>, a 20 m existe una variabilidad de -6,3‰ y a 70 m una diferencia de 0,2‰, con una composición orgánica en la capa epilimnion y una composición magmática en la capa hipolimnion. A partir de los datos de ambas investigaciones se puede concluir que existe una inyección de gases de origen magmático a profundidad. Las variaciones encontradas en ambos estudios se deben a que en esta investigación se utilizaron distintos parám, como la recolección de datos en el tiempo según las dos épocas del año, la metodología de muestreo y el análisis de los mismos, los cuales permitieron tener un mayor detalle del origen del gas y de evolución en el tiempo.

## 5.2 Estratificación de capas en el lago

A partir de los datos tomados *in situ* del gas liberable se puede apreciar que entre los 50 y 70 m de profundidad la cantidad de gas acumulado es mayor que la cantidad de gas encontrado entre los 20 y 40 m (gráfico 1). Esto permite confirmar la existencia de dos capas que no se mezclan entre sí. Por su parte, se menciona una tercera capa de transición a 40 m, llamada metalimnion, debido a que las temperaturas entre 20 y 40 m son mayores a las temperaturas entre 50 y 70 m, así como los cambios en la acumulación de gas (Cabassi et al. 2014). Sin embargo, en los resultados de esta investigación la temperatura fue cambiante e inestable tanto en el tiempo como entre cada capa, debido a que las muestras fueron tomadas desde horas de la mañana hasta horas de la tarde y hay un calentamiento del agua debido a los rayos de sol durante el día, lo cual genera variaciones en los resultados de las muestras tomadas. En este sentido se considera que la capa metalimnion se encuentra entre los 40 y los 50 m de profundidad (gráfico 1)

Por otra parte, el pH también es variable en el tiempo, ya que en los meses de agosto y setiembre se obtuvieron resultados entre 6,3 y 6,5 en la capa hipolimnion, mientras que en la capa epilimnion se encontró un pH entre 6,5 y 6,9. En los meses entre diciembre y febrero en la capa hipolimnion el pH era mayor al de la capa epilimnion, con resultados entre 7,6 y 6,8 a profundidad y entre 6,8 y 6,3 en superficie. Ampuero, (2018) menciona que estos cambios de pH en el tiempo pueden atribuirse a la reproducción y crecimiento de las algas, ya que en este proceso las algas necesitan consumir mayor  $\text{CO}_2$ , lo que genera una disminución del pH.

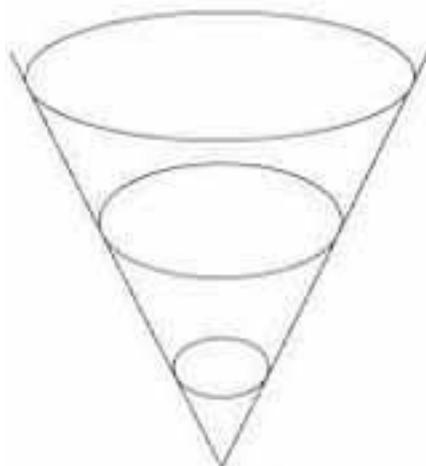
### **5.3 Gas acumulado en el lago y su posible potencial de peligro sobre la comunidad de Río Cuarto y sus actividades agropecuarias**

Las amenazas naturales, en este caso de origen volcánico, deben ser tratadas a través de los gobiernos locales y las autoridades correspondientes, los cuales son los encargados de la toma de decisiones y determinar la ubicación estratégica de los asentamientos y demás actividades que se puedan desarrollar cerca de una amenaza de esta índole (Toulkeridis, 2015). Este mismo autor indica que los resultados iniciales ante una evaluación ayudan a conducir a las diversas necesidades de información para determinar si un volcán presenta o no una amenaza o riesgo.

En el lago de Río Cuarto se indentificó una mayor cantidad de agua en la capa epilimnion, con un aproximado de  $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ , mientras que en la capa hipolimnion la cantidad de agua es menor, con un aproximado de  $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Esto se debe a que el lago tiene una forma cónica, con el área más angosta a mayor profundidad (figura 7). Este hecho también es mencionado por otros autores (Cabassi et al. 2014) y expuesto en la batimetría de Göcke et al. (1987). Alvarado (2008) reporta en el lago un volumen total de agua de  $15 \times 10^6 \text{ m}^3$  y el volumen de agua estimado en la investigación es de  $10,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; lo que da un error de  $\pm 4,42 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Esta diferencia puede atribuirse a los mecanismos utilizados para realizar el cálculo final, ya que en esta investigación dicho cálculo se elaboró a partir de parám expuestos en la batimetría de Göcke (1987).

Figura 7

*Forma batimétrica aproximada que presenta el lago de Río Cuarto*



Fuente: Elaboración propia 2021

En este volumen de agua que posee el lago se identificó un total de  $0,059 \text{ km}^3$  de gas acumulado hasta las fechas de campaña. Las erupciones límnicas ocurren cuando los lagos tienen una acumulación de gas igual o superior a un  $1 \text{ km}^3$ , tal y como sucedió en los lagos de Nyos y Monoun (Giggenbach et al. 1990) y (Kusakabe et al. 2015). De acuerdo con estos datos, se estima que en el lago de Río Cuarto hace falta  $0,94 \text{ km}^3$  de acumulación de gas para llegar al punto de saturación y causar una erupción límnic.

A pesar de que el lago no presenta una acumulación significativa para provocar una erupción límnic como las ocurridas en Camerún, sí existen evidencias de que en el pasado han ocurrido eventos limnológicos en reiteradas ocasiones, con cambios en la coloración del lago, muertes de peces y olores desagradables percibidos por la población producto de la liberación de gases acumulados. Según Jones (2010), esta liberación de gas puede estar asociada a eventos climáticos que pueden desplazar la capa epilimnion por acción del viento, dando paso a la capa hipolimnion. También, estos cambios de estratos pueden ser provocados por un fuerte sismo que genere una fracturación de la superficie del lago y dé paso a la liberación de todo el gas que se encuentra acumulado.

Los cambios en la coloración del agua pueden atribuirse a la sobresaturación de las bacterias (fotoplanton) que viven en el lago, o bien a la oxidación del dióxido de carbono (Lizcano et al. 2014). Alvarado (2011) indica que la muerte de los peces puede estar asociada al cambio de estratos, ya que cuando la capa hipolimnion se sitúa sobre la capa epilimnion es posible que pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>S asciendan desde lo más profundo del lago y causen la muerte de los animales que viven en las aguas del lago. Este gas tiene su origen en las fuentes volcánicas con materias sulfuradas, que se combinan con el ácido carbónico y provocan un olor a “huevo podrido”, causan la muerte de peces y demás organismos en concentraciones muy reducidas (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2014). Este mismo autor menciona que estos gases son más densos que el aire y pueden almacenarse en la capa más baja de la atmósfera, por lo que pueden ser transportados fácilmente por el viento y percibidos por la población.

Según el informe del INDER del 2015, el porcentaje de personas que viven dentro del cantón según edad se puede observar en el cuadro 19: donde el mayor porcentaje corresponde a jóvenes con un 44% con edades entre los 13 y 35 años y el menor porcentaje es de adultos mayores de 65 años representando apenas el 4%

Cuadro 19

*Porcentaje de personas según edades que viven en el cantón de Río Cuarto.*

<b>Categoría</b>	<b>Edad (años)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Niños	0-12	28
Jóvenes	13-35	44
Adultos	36-64	24
Adultos mayores	>65	4

Fuente: INDER (2015).

Las personas que cuentan con problemas respiratorios como el asma no pueden estar expuestas a concentraciones de CO<sub>2</sub> mayores a 800 ppm (0,08) ya que podrían experimentar problemas en su salud (principalmente en su sistema respiratorio) de acuerdo con el Instituto para la Salud Geoambiental (2018). Estos datos son importantes para las autoridades encargadas de la toma de decisiones, ya que las escuelas, oficinas, centros de atención para adultos mayores, entre otros, en ocasiones cuentan con lugares poco ventilados y es fundamental crear normativas que permitan actuar ante una exposición o evento del lago que sobrepase los límites de saturación.

De acuerdo con el Mapa 4, los bosques secundarios son los que se encuentran los más próximos a el lago, en el cual se puede encontrar una gran cantidad de fauna como lo son los monos *Alouatta palliata* llamados popularmente “mono congo”, aves, insectos y demás especies que pueden interactuar directamente con los gases al ser liberados (Municipalidad de Río Cuarto, 2011). Asimismo, en las áreas de cultivos se producen principalmente soja, maíz y girasol (Municipalidad de Río Cuarto, 2011). Al sureste se encuentra una pequeña cobertura urbana discontinua en la que se encuentran pocas viviendas, está zona se ubica a 1 km de distancia del foco emisor. En cuanto al centro del cantón, donde se localiza la zona comercial (supermercados, tiendas, clínicas, entre otros) se ubican aproximadamente a un 1km hacía el Sureste de el lago. Ya en zonas más alejadas (hacia el Oeste) se pueden encontrar cultivos permanentes (principalmente el cultivo de piña). Por su parte, los pastos donde se da la actividad ganadera, se ubican principalmente al Oeste de el lago.

Por otro lado, cabe mencionar que la Municipalidad de Río Cuarto en el año 2021 lanzó una campaña con el fin de activar con mayor fuerza el turismo del cantón, ofreciendo sus bellezas naturales tales como, cataratas, lagunas (Hule y Río Cuarto) y toda la belleza de flora y fauna, con actividades de senderismos en el lago, paseos en bote, actividades de competencia de nadado, entre otros. De esta forma, Río Cuarto busca ser percibido como una zona de disfrute para paseos familiares o grupos de turistas.

A partir de los escenarios desarrollados con el programa Aermol, se obtuvo que la concentración máxima de CH<sub>4</sub> es de 33,2 ppm (0,00332%) para el escenario 1 en el día y 304

ppm (0,0304%) para la noche, lo cual no presentaría ningún peligro para la población. Algunos autores mencionan que las concentraciones de CH<sub>4</sub> a partir de 100 000 ppm (10%) pueden causar problemas de salud tanto en humanos como en animales y a partir de 195 000 ppm (19,5%) causa la muerte (Etiope et al. 2013) y (NJ Health, 2016). La pérdida y daños en la vegetación y cultivos suceden cuando las concentraciones de metano superan los 360 000 ppm (36%) (Gerlach et al. 2000).

En cuanto al CO<sub>2</sub> en el escenario 1 de día, la concentración máxima es de 11,4 ppm (0,00114%). A partir de 50 000 ppm (5%) de concentración de CO<sub>2</sub> puede causar problemas en la salud y sobre 350 000 ppm (35%) causar la muerte (Permentier et al. 2017). Con estos datos se concluye que tampoco hay un peligro para la población.

En el segundo escenario al medio día la concentración máxima de CH<sub>4</sub> es de 12,3 ppm (0,00123%). Para el dióxido de carbono, la concentración máxima es de 33,6 ppm (0,0033%). En este caso tampoco representa peligro para los pobladores ni para sus actividades agrícolas. Asimismo, las mayores concentraciones de gas se restringen únicamente al cráter de el lago.

Estas diferencias de concentraciones de gas en el día y en la noche se debe a que en la noche las corrientes ascendentes del aire son menores a las del día por la falta de radiación (efecto montaña-valle). Las emisiones que provienen de la superficie se acumulan en una capa de la atmósfera más pequeña, lo que hace que las concentraciones de gas sean mayores y se distribuyan por un área mayor (Rodríguez et al. 2012).

De acuerdo con los datos aportado por el INEC (2020), se estima que en un evento durante el día, un total de 842 viviendas pueden percibir el olor con concentraciones que van desde los 33,6 ppm (0,033%) hasta los 11,4 ppm (0,0011%), mientras que por las noches únicamente estarían expuestas 22 viviendas con concentraciones que varían de los 300 ppm (0,03%) a los 3 ppm (0,0003 %). A pesar de que en la noche la cantidad de familias que puede ser expuestas a estos olores es menor, la concentración sería mayor a la del día. Según datos del IMN (2020), los meses con mayor velocidad del viento son de diciembre a agosto entre 1 m/s y 1,3 m/s con dirección proveniente del este de diciembre a abril y de mayo a

noviembre con dirección proveniente del noreste. Para los meses de setiembre a noviembre las velocidades varían entre 0,8 m/s y 0,9 m/s.

## 6. Conclusiones

- El estudio se realizó con un enfoque cuantitativo, con aportes disciplinarios desde la física y química, desde una perspectiva geográfica. Esta interdisciplinaria permitió enriquecer el conocimiento sobre la composición y origen de los gases del lago Río Cuarto, así como su difusión y potencial de peligro para las comunidades y actividades agropecuarias en el área de estudio.
- Las técnicas utilizadas, la longitud de estudio y análisis realizados, representan un aporte por sí mismo debido a que en la literatura no se registran investigaciones similares con un análisis interdisciplinario del peligro desde una perspectiva geográfica. La metodología desarrollada puede ser aplicada en otros lagos que presenten características similares, con el potencial de acumulación de gases volcánicos.
- La fuente del gas que se encuentra en el lago de Río Cuarto posee un componente de CO<sub>2</sub> de origen magmático a profundidad, el cual conforme asciende a la superficie cambia a un componente isotópico más microbiano, producto de la actividad bacteriana. En términos generales, la mayoría del CH<sub>4</sub> posee una composición isotópica que lo asocia a un origen bacteriano.
- Los resultados confirman la presencia de dos capas de estratificación sobre y bajo los 40 m de profundidad, denominadas epilimnion (0 a 40 m) e hipolimnion (40 a 70 m) respectivamente. Entre ambas se localiza una capa de transición conocida como metalimnion (alrededor de los 40 m), responsable de que la capa superficial y profunda no se mezclen.

- En el lago de Río Cuarto se presentan acumulaciones aproximadas de 0,059 km<sup>3</sup> de gas, menores a las expuestas en la literatura, por lo que resulta poco probable una erupción límnic que amenaza a la vida y actividades agropecuarias, como las ocurridas en los lagos de Nyon y Monoun. No obstante, el potencial de acumulación de gas puede variar por la inyección de gas a profundidad, así como por un evento sísmico que desestabilice el sustrato del lago y permita una mayor liberación de gas volcánico.
- De acuerdo con los escenarios construidos, en caso de una erupción o emanación repentina de los gases acumulados en el lago de Río Cuarto su difusión no representa un peligro importante sobre la población, animales y actividades agropecuarias que se desarrollan en los alrededores del lago. De acuerdo con éstos escenarios las mayores concentración de los gases de CO<sub>2</sub> en el día, no supera los 11,4 ppm (0,0011%) y en la noche no supera los 100 ppm (0,01%); mientras que para el CH<sub>4</sub> las concentraciones en el día no son superiores a los 33,2 ppm (0,0033%) y en la noche no son superiores a los 300 ppm (0,03%). No obstante, existe un peligro directamente sobre el lago, debido a que ahí si es posible encontrar altas concentraciones de gas en el instante en que ocurra una erupción límnic.
- Las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, en caso de una erupción límnic, se presentarían durante la noche. Esto debido al efecto montaña-valle, en el cual las emisiones provenientes de la superficie se concentran en un volumen más pequeño de la atmósfera. En un escenario de noche, 22 viviendas se encuentran dentro de la zona de mayor concentración de gas. En caso de que el lago libere todo el gas acumulado en el día, 842 viviendas podrían experimentar olores desagradables, pero sin problemas de salud importantes.
- La cobertura de la tierra que más afectación recibirían durante una eventual erupción límnic es el bosques secundarios, debido a su proximidad con respecto del foco

emisor. En segundo lugar se encuentra los pastos y cultivo, así como algunas viviendas que se encuentran aproximadamente 1 km de distancia del foco emisor.

## **7. Recomendaciones**

- Que los resultados de esta investigación orienten la gestión del riesgo al aportar información sobre la amenaza por gases y los elementos expuestos y sean tomados en cuenta en la elaboración de un plan de ordenamiento territorial para el recién formado cantón de Río Cuarto.
- Se recomienda generar escenarios que consideren las variaciones estaciones, en el caso de Costa Rica el periodo seco y lluvioso y los cambios en la dirección y velocidad del viento.
- Desarrollar una base de datos de los eventos que ocurran sobre este tipo de lagos, para mejorar la delimitación y modelaje de los posibles peligros y daños a los que las poblaciones puedan enfrentarse en este tipo de actividad.
- Elaborar mapas de modelaje por concentración y distribución de gases para otros lagos volcánicos presentes en el territorio costarricense, que sirvan de base para la toma de decisiones en gestión de riesgo, así como para los planes de ordenamiento territorial.
- Mantener un monitoreo sobre el lago de Río Cuarto para obtener datos de acumulación de gases de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y así conocer si con el tiempo la cantidad de gases acumulados en el lago aumentan, especialmente después de un sismo importante, o si hay evidencias de intrusiones magmáticas que puedan cambiar la dinámica del lago.

- El lago de Río Cuarto actualmente es un lugar que está siendo explotado turísticamente por la Asociación de Desarrollo de la Comunidad, con el fin de generar recursos económicos. Es importante establecer el peligro que una erupción lumínica podría representar para los turistas que se encuentren en el lago durante la misma, aspecto que debe ser considerado en la planificación de la actividad turística, de modo que se evite una exposición mayor de personas. Por consiguiente, es importante informar y geoalfabetizar al turista sobre la actividad de este maar y los peligros potenciales.

## **7. Anexos**

### **7.1 Fichas técnicas y simbología utilizada en la investigación**

En el cuadro 20 se puede apreciar la ficha técnica en donde se anotarón todos los datos tomados durante la recolección de muestras en el campo. En ella se puede encontrar factores como la profundidad de cada capa muestreada, la capacidad del recipiente volumétrico en donde se tomó la acumulación de gas, el volumen de gas y la diferencia entre el volumen del recipiente volumétrico y el volumen de gas medido, entre otras.

Por su parte, en el cuadro 21 se encuentran la simbología con su respectiva abreviatura, la cual fue utilizada tanto en este documento como en el análisis de laboratorio. Esto para que el lector tenga una idea más clara de los términos utilizados durante todo el proceso de la investigación.

Cuadro 20  
*Ficha técnica para recolección de muestras*

<b>Fecha</b>							
Profundidad (m)	CRV (ml)	VG (ml)	CRV-VG (ml)	Temperatura °C	pH	Vial 30 ml	Vial 120ml en (6 ml de NaOH)
70							
60							
50							
40							
30							
20							

**Simbología**

CRV: Corresponde a la capacidad del recipiente volumétrico.

CRG-VG: Corresponde al volumen de gas que se encuentra en determinada profundidad. Es la diferencia entre el recipiente volumétrico y el volumen de gas de el lago

VG: Volumen de gas proveniente de el lago y que se almacena en el recipiente volumétrico.

Cuadro 21

*Símbolos y abreviaturas utilizadas en el proyecto con su respectivo significado*

Abreviatura	Significado
<b>m</b>	<b>Metros</b>
<b>‰</b>	<b>Per miles</b>
<b>δ</b>	<b>Delta</b>
<b>%</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>ppm</b>	<b>Partículas por millón</b>
<b>m.s.n.m</b>	<b>Metros sobre el nivel del mar</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Dióxido de carbono</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Metano</b>
<b>Km</b>	<b>Kilómetros</b>
<b>I.E.V</b>	<b>Índice de explosividad volcánica</b>
<b>Km<sup>3</sup></b>	<b>Kilómetros cúbicos</b>



## **7.2 Procedimientos detallados del análisis de las muestras recolectadas en el campo.**

### ***7.2.1 Análisis isotópico de CH<sub>4</sub>***

El análisis de la composición isotópica fue utilizada con el fin de determinar el origen del gas del cual se está estudiando (en este caso metano), ya sea proveniente de una inyección magmática o bien por la descomposición de la materia orgánica. Para esto fue necesario seguir una serie de pasos la cual se detalla a continuación

- Primero, es necesario contar con una bolsa hermética que debe limpiarse al menos tres veces con N<sub>2</sub> (Nitrogeno de ultra alta pureza). Una vez finalizado, se debe aplicar vacío a la bolsa. La misma, debe contar con una prensa especial que no permita que entre ni salga nada del exterior para evitar contaminación y fugas de la muestra.
- Seguidamente, con los viales de 15 mL de muestra obtenidas en campo, se extrae en laboratorio la cantidad de 1,2 mL de muestra que es inyectada en la bolsa hermética con vacío. A esto se le inyecta la cantidad de 500 mL de N<sub>2</sub>. Este proceso se realizó para cada vial de 15 mL obtenido (en total 4 viales por capa muestreada cada 10 m).
- Una vez que se tiene la muestra preparada en la bolsa, se conecta al analizador isotópico Picarro G2201\_i en modo alta precisión para obtener resultados de mayor calidad. El análisis dura alrededor de 10 minutos, tiempo en que tarda el equipo en

absorber y procesar la muestra. Antes de analizar una muestra se corrió el estándar para metano (Tanque NOAA), el cual se repite cada 8 muestras procesadas.

- Una vez que se obtiene el resultado, se anota el valor de CH<sub>4</sub> en ppm, en per mil y sus desviaciones estándar. Ya anotados los valores obtenidos del CH<sub>4</sub> en per mil, estos son corregidos con el estándar analizado. Para agosto y diciembre del 2019 se utilizaron los estándares AL1 y AL2 con valores de -69 ‰ y -45‰ respectivamente; para los meses de febrero y setiembre del 2020 se utilizó el estándar Tanque NOAA (con valor de -47,389‰), debido a que AL1 y AL2 se habían agotado. Para dicha corrección es necesario aplicar las siguientes fórmulas (Cuadro 3).

1. Promedio de los estándares analizados.

2. –( composición isotópica estándar) – (el promedio del análisis de los estándares)

Cuadro 22

Ejemplo de calibración del estándar. Caso de análisis de diciembre del 2019

Estándar	Resultado de Picarro (‰)	Promedio (‰)	Valor del estándar (‰)	Diferencia entre resultado y valor del estándar (‰)
AL1	-64,69	-64,91	-69	-69-(-64,91)= -4,09
AL1	-64,87		-69	
AL1	-65,17		-69	

Fuente: elaboración propia (2019)

3. Resultado δ<sup>13</sup>CH<sub>4</sub> (-4,09‰) + la diferencia calculada del estándar

- Una vez corregido el valor del metano, se grafican los resultados con su desviación estándar calculada, usando la formula  $STD = x = \sqrt{\frac{\sum(\text{desviaciones})^2}{\text{número de datos}}}$ .
- Luego, es necesario conocer la razón entre CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, por lo que se procedió a dividir la concentración de CO<sub>2</sub> en ppm entre la concentración de CH<sub>4</sub> ppm (razón=

CO<sub>2</sub> ppm ÷ CH<sub>4</sub> ppm). Para ser graficado y comprender de mejor manera el sistema de el lago en cuanto a gases se refiere.

### 7.2.2 Análisis de la composición isotópica del CO<sub>2</sub>.

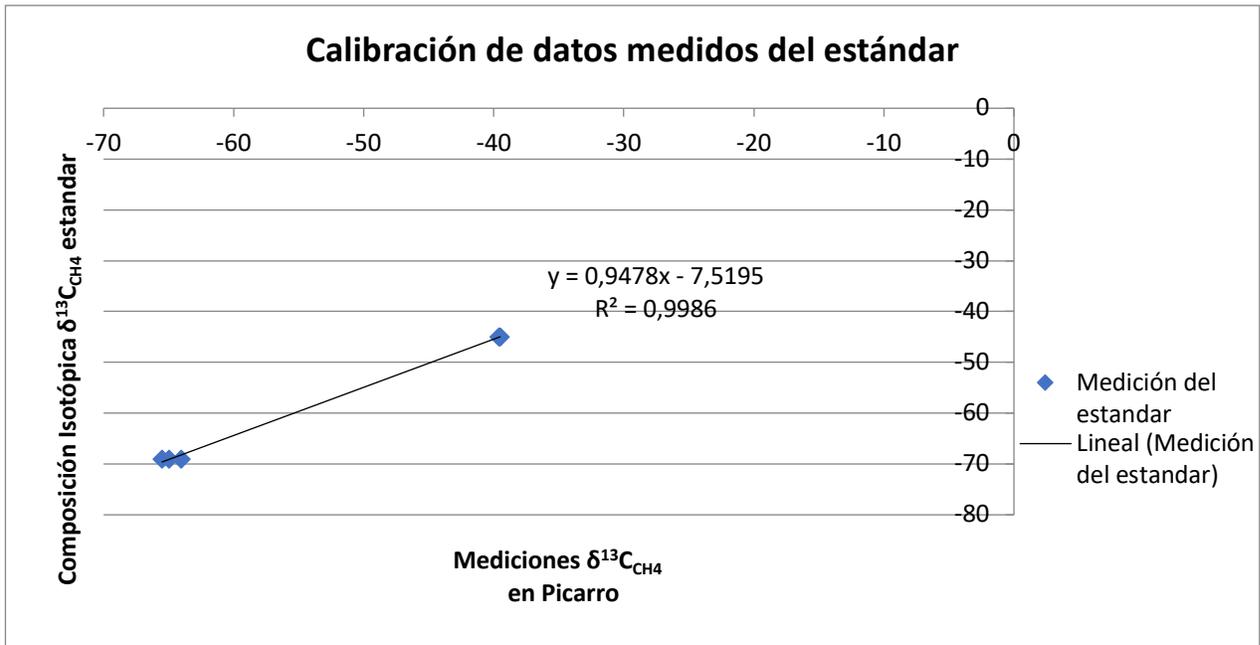
En el caso de la composición isotópica de CO<sub>2</sub>, con el fin de obtener un resultado con mayor contundencia, se utilizó el mismo instrumento, pero con diferente método, es decir, con el automuestreador isotópico acidificando la muestra del vial de 120 mL con NaOH.

- En primera instancia, antes de salir al campo se deben preparar los viales aplicándoles vacío por un tiempo aproximado de 2 a 3 minutos con una bomba especial, para asegurar que no contengan ningún tipo de gas dentro. Luego de aplicar vacío, se inyectan los 2 mL de NaOH con el fin de captar de mejor manera el CO<sub>2</sub> que se recolecta en el lago (tal y como se explicó en párrafos anteriores).
- Con las muestras recolectadas en los viales de NaOH ( de 120 mL), en el laboratorio se extrae con una micropipeta la cantidad de 0,2 mL de NaOH, con el fin de tener una excelente precisión. Estos 0,2 mL se inyectan en viales de 15 mL, los cuales fueron colocados en el automuestreador del Picarro, donde la máquina automáticamente inyecta pequeñas cantidades (2 mL) de agua milli Q y 2 mL de ácido fosfórico para equilibrar la muestra dentro del rango de medición del instrumento y ser analizados con un mayor desempeño.
- Junto a estas muestras se colocaron seis estándares distribuidos entre los estándares certificados de BCS 395 (limosnita), OVSI 1 y OVSI 2 (ambos de bicarbonato de calcio), con valores de 0,31‰, -4,18‰ y -14,54‰, respectivamente.
- Una vez obtenidos los resultados, es necesario calibrarlos con la ecuación de la recta, a partir de los resultados analizados de los estándares y sus valores ya conocidos:

1. Calcular la ecuación de la recta (Figura 8), con su pendiente e intersección:  
$$y=mx+b$$

Figura 8

*Curva de calibración para la corrección de los análisis, a partir de la ecuación de la recta*



Fuente: elaboración propia (2019)

2. Para corregir los datos de  $\text{CO}_2$  analizados, es necesario multiplicar la pendiente de la recta por la composición isotópica de  $\text{CO}_2$  medido + la intersección de la recta, por ejemplo:  
 $0,9607 \times \text{la composición isotópica de } \text{CO}_2 + -0,5671.$

### 7.2.3 Cálculo de la acumulación de gas liberable en el lago de Río Cuarto.

Para obtener los datos de la acumulación total de gas del lago se realizaron en dos etapas: la primera corresponde al volumen total de gas liberado y la segunda al volumen total de gas disuelto. Para el primero caso, fue necesario calcular el volumen de agua que hay entre cada capa medida (0-15/15-25/25-35/35-45/45-55/55-65 y >65), para esto se utilizó el programa Arc-Map siguiendo los siguientes pasos:

1. Utilizar un modelo batimétrico, en este caso desarrollado el citado por Cabassi, et al. (2014) para calcular el volumen de agua del lago.

2. Se realiza una representación morfológica del terreno (TIN) a partir de la batimetría mencionada y se convierte en polígono.
3. Se calcula el volumen de agua que posee esa capa a través de la herramienta “polygon volume”.
4. Estos pasos se realizaron para cada capa mencionada anteriormente.

Los resultados se obtuvieron en m<sup>3</sup> por lo que es necesario convertirlos en litros para un mejor manejo y estandaridad con todos los datos que se obtienen. El valor de la capa se multiplica por 1000 (dado que 1 m<sup>3</sup> equivale a 1000 L). Para estimar la acumulación de gas total liberado son necesarios los valores de la razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, (valor de gas liberado) que se obtuvo *in situ*, para realizar los siguientes pasos.

1. Es necesario tener las variables de la capa, volumen de agua de la capa calculada, razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, fracción molar de CO<sub>2</sub>, fracción molar de CH<sub>4</sub>, volumen de gas total liberado, volumen de gas total, volumen total de CO<sub>2</sub> y volumen total de CH<sub>4</sub>, respectivamente. Todos los datos dados en litros.
2. Calcular la fracción molar del CO<sub>2</sub>, por lo que se divide la razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> entre el mismo valor más 1, es decir:

$$CO_2 = \frac{\text{valor de } CO_2/CH_4}{\text{valor de } CO_2/CH_4 + 1}$$

3. Con el resultado de la fracción molar del CO<sub>2</sub> calculado anteriormente se calcula la fracción molar del CH<sub>4</sub>:

$$CH_4 = 1 - (\text{resultado de la fracción molar de } CO_2)$$

4. Calcular el gas total:

$$\text{Gas total} = (V. \text{ gas de capa}) \times (V. \text{ gas liberado})$$

5. Finalmente, se calcula el volumen de CO<sub>2</sub> liberado con la siguiente fórmula, de igual manera para el volumen de CH<sub>4</sub> únicamente que se utiliza la fracción molar de CH<sub>4</sub>:

$$V. CO_2 \text{ liberado} = (V. \text{ de agua}) \times (V. \text{ gas liberado}) \times (\text{Fracc. Molar de } CO_2)$$

6. El gas total acumulado, que es liberable, se obtiene de la siguiente manera

$$G. T. L = (V. \text{ gas } CO_2) + (V. \text{ gas de } CH_4)$$

#### ***7.2.4 Cálculo de la acumulación de gas disuelto en el lago de Río Cuarto.***

Para calcular el gas disuelto de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> que hay en el agua es necesario seguir los siguientes pasos:

- Antes de salir a campo, hay que colocar en las botellas de Giggenbach al vacío una cantidad de 50 ml de NaOH para atrapar con mayor facilidad el CO<sub>2</sub> que se encuentra disuelto, el CH<sub>4</sub> quedará en la zona de vacío ya que el NaOH no capta el metano. Luego se toma la masa inicial de la botella antes de salir a campo.
- Después de regresar de campo se toma la masa de la botella Giggenbach para conocer la masa total de la muestra tomada y se sustrae la diferencia entre masa inicial y la masa final.
- La muestra es colocada en el cromatógrafo de gases para ser analizada, por lo que al finalizar se obtienen los valores de metano mmol (milimol); el dióxido de carbono se obtiene por medio de la técnica de titulación.
- Para convertir este valor en moles/L de gas, es necesario tomar el valor obtenido del gas determinado (CO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub>) en mmol y dividirlo entre la masa de la muestra calculada en el paso 2: *masa de la muestra = MI – MF*, donde:

MI= A la masa inicial de la botella Giggenbach

MF=masa final de la botella Giggenbach

- Estos pasos se realizan para cada gas y para cada capa muestreada.

Después de obtener los valores de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en mol/L de agua, se procede con el cálculo del volumen de gas que se encuentra disuelto en el agua de el lago de Río Cuarto, de acuerdo con las variables de: capa de el lago, volumen de agua que hay en cada capa, CH<sub>4</sub> en moles/L, CO<sub>2</sub> en moles/L, masa de CO<sub>2</sub> disuelto, moles de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, temperatura tomada en cada capa en k, presión en bares, volumen total de CO<sub>2</sub> dados en litros y resultado del gas disuelto. Después se continúa con los siguientes pasos:

1. Los datos de volumen de agua del lago se obtienen de los cuadros y cálculos realizados previamente.
2. Los moles de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, son obtenidos de la titulación realizada a las muestras recolectadas en campo con NaOH (4 molar), con el fin de determinar la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto que se encuentra en el agua.
3. Es necesario calcular los moles de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en el lago.

$$\text{Moles de CO}_2 \text{ o CH}_4 = (\text{moles/L de gas}) \times (\text{V. de agua de cada capa})$$

4. La temperatura es obtenida a partir de las mediciones en campo, las cuales fueron tomadas en grados Celsius, por lo que se debe de convertir a “k” sumando el valor de °C más 273,5.
5. La presión atmosférica es de 1 atm (bares).
6. En el cálculo final se utiliza la fórmula del gas ideal, que consiste en :

$$P \times V = (n \times r) \times T$$

Donde:

P= presión (bares)

V=volumen (L)

n=moles de gas

r= constante de gas ideal 0,0831446 L atm/(K mol)

T= temperatura en K

7. Finalmente, se necesita despejar en la fórmula el volumen, de la siguiente

$$\text{manera: } V = \frac{nr*T}{P}$$

8. Esta fórmula se utiliza tanto para el CH<sub>4</sub> como para CO<sub>2</sub>, con la variación del valor de “n”.

### 7.3 Resultados de los análisis detallados.

#### 7.3.1 pH tomado in situ.

En el cuadro 4, se muestra los pH tomados in situ en cada vista al campo realizada en los meses de Agosto y Diciembre 2019 y Febrero y Setiembre del 2020.

Cuadro 23

*Resultados in situ de pH en el lago de Río Cuarto*

Profundidad (m)	pH (Campaña 1/8/19)	pH (Campaña 6/12/19)	pH (Campaña 28/2/20)	pH (Campaña 3/9/20)
0	6,8	6,5	6,3	6,8
10	6,8	6,8	6,2	7,3
20	6,9	6,5	6,4	6,7
30	6,5	6,6	6,4	6,6
40	6,4	6,8	6,7	6,5
50	6,5	7,8	7,0	6,3
60	6,5	8	7,3	6,3
70	6,5	7,6	7,2	6,3

Fuente: elaboración propia (2021)

### ***7.3.2 Resultados detallados del cálculo de agua y acumulación de gases presente en el lago de Río Cuarto.***

En el cuadro 5, se muestran el volumen de agua en m<sup>3</sup> por cada capa muestreada. Este cálculo se realizó por medio del programa Arc Map 10.5, en el cual se elaboró un modelo digital del terreno en 3D con ayuda de la batimetría elaborada por Göcke et al. (1987).

Por otro lado, en el cuadro 6 y 7 se puede observar los cálculos detallados para conocer la acumulación de liberable y acumulación disuelto en el agua, respectivamente.

Cuadro 24

*Volumen de agua que se encuentra entre cada capa muestreado en el lago de Río Cuarto*

<b>Capa (m)</b>	<b>Volumen de agua en m<sup>3</sup></b>
<b>0-15</b>	<b>2x10<sup>6</sup></b>
<b>15-25</b>	<b>2x10<sup>6</sup></b>
<b>25-35</b>	<b>2x10<sup>6</sup></b>
<b>35-45</b>	<b>2x10<sup>6</sup></b>
<b>45-55</b>	<b>1x10<sup>6</sup></b>
<b>55-65</b>	<b>1x10<sup>6</sup></b>
<b>&gt;65</b>	<b>7x10<sup>5</sup></b>

Cuadro 25.

*Resultados y cálculos para obtener el volumen total de gas acumulado liberable de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.*

Capa (m)	Volumen de agua en laguna (L)	Razón CO <sub>2</sub> /C H <sub>4</sub>	Fracción molar CO <sub>2</sub>	Fracción molar CH <sub>4</sub>	Volumen de gas liberable (L/L agua)
0-15	2x10 <sup>6</sup>	0,2	0,17	0,83	0,002
15-25	2x10 <sup>6</sup>	0,16	0,14	0,86	0,009
25-35	2x10 <sup>6</sup>	0,1	0,09	0,91	0,017
35-45	2x10 <sup>6</sup>	0,12	0,11	0,89	0,215
45-55	1x10 <sup>6</sup>	0,13	0,12	0,88	0,038
55-65	1x10 <sup>6</sup>	0,14	0,12	0,88	0,0445
<b>Volumen de gas total</b>		<b>Vol total de CO<sub>2</sub> (L)</b>	<b>Vol Total de CH<sub>4</sub> (L)</b>		
5x10 <sup>6</sup>		9x10 <sup>5</sup>	4x10 <sup>6</sup>		
21x10 <sup>6</sup>		3x10 <sup>6</sup>	18x10 <sup>6</sup>		
37x10 <sup>6</sup>		3x10 <sup>6</sup>	33x10 <sup>6</sup>		
456 x10 <sup>6</sup>		48x10 <sup>6</sup>	407x10 <sup>6</sup>		
49x10 <sup>6</sup>		5x10 <sup>6</sup>	43x10 <sup>6</sup>		
44x10 <sup>6</sup>		5x10 <sup>6</sup>	39x10 <sup>6</sup>		
35x10 <sup>6</sup>		4x10 <sup>6</sup>	30x10 <sup>6</sup>		

Cuadro 26

*Acumulación de gas disuelto en el lago según capa muestreado*

<b>CH<sub>4</sub> mol/L</b>	<b>CO<sub>2</sub> mol/L</b>	<b>Mols de CH<sub>4</sub></b>	<b>Mols CO<sub>2</sub></b>	<b>Temperatura K</b>	<b>Presión atmosférica en bares</b>	<b>V de CO<sub>2</sub> L</b>	<b>V de CH<sub>4</sub> en L</b>
3,57x10 <sup>-3</sup>	4,20 x10 <sup>-2</sup>	9,68 x10 <sup>6</sup>	1,14 x10 <sup>8</sup>	303,7	1	2,87 x10 <sup>9</sup>	2,44 x10 <sup>8</sup>
1,15 x10 <sup>-4</sup>	5,07 x10 <sup>-2</sup>	2,79 x10 <sup>6</sup>	1,23 x10 <sup>8</sup>	305	1	3,13 x10 <sup>9</sup>	7,09 x10 <sup>6</sup>
1,22 x10 <sup>-3</sup>	4,21 x10 <sup>-2</sup>	2,66 x10 <sup>6</sup>	9,18 x10 <sup>7</sup>	306,2	1	2,34 x10 <sup>9</sup>	6,77 x10 <sup>7</sup>
2,35 x10 <sup>-3</sup>	4,71 x10 <sup>-2</sup>	4,99 x10 <sup>6</sup>	9,98 x10 <sup>7</sup>	305,7	1	2,54 x10 <sup>9</sup>	1,27 x10 <sup>8</sup>
2,85 x10 <sup>-3</sup>	4,67 x10 <sup>-2</sup>	3,71 x10 <sup>6</sup>	6,09 x10 <sup>7</sup>	303,2	1	1,53 x10 <sup>9</sup>	9,36 x10 <sup>7</sup>
3,15 x10 <sup>-3</sup>	4,60 x10 <sup>-2</sup>	3,16 x10 <sup>6</sup>	4,61 x10 <sup>7</sup>	302,9	1	1,16 x10 <sup>9</sup>	7,96 x10 <sup>7</sup>
4,07 x10 <sup>-3</sup>	4,36 x10 <sup>-2</sup>	3,20 x10 <sup>6</sup>	3,42 x10 <sup>7</sup>	302	1	8,59 x10 <sup>8</sup>	8,03 x10 <sup>7</sup>

Fuente: elaboración propia (2021)

#### 7.4 Figuras tomadas con el dron para validar el mapa de coberturas de la tierra.

Figura 9

*Imagen del dron hacia el sector oeste de el lago de Río Cuarto*



Fuente: Maarten de Moor, 2020.

Como parte de la elaboración del mapa de coberturas de la Tierra sobre el área de estudio del cantón de Río Cuarto, es importante realizar una verificación del mismo con la finalidad de tener un respaldo de lo identificado a través del programa Arc-Map. Es por esto que en la Figura 1, mostrada anteriormente, se puede visualizar el sector oeste de el lago con presencia de bosque secundario, parches con asentamientos (viviendas, entre otros), zonas extensas dedicadas al pasto y algunos sectores con cultivos. Cabe mencionar que esta imagen fue tomada en sentido a la dirección predominante del viento.

Figura 10

*Sector noroeste de el lago*



Fuente: Maarten de Moor, 2020.

Hacia el sector noroeste se observa una extensa área con gran variedad de coberturas como pastos, cultivos, pequeños parches arbolados, entre otros.

Figura 11

*Sector noreste de el lago*



Fuente: Maarten de Moor (2020)

Al noreste del área de estudio se observa una mayor cantidad de edificaciones, entre ellas comercios, viviendas, bosques secundarios y pastos, ya que es una de las principales actividades que se desarrollan en este cantón.

Figura 12

*Centro de Río Cuarto hacia el este-sureste de el lago*



Fuente: Maarten de Moor (2020)

En la figura 4 se aprecia el centro del cantón de Río Cuarto, el cual se encuentra aproximadamente a 1 kilómetro de distancia de el lago. Hay una gran variedad de edificaciones, desde bancos, comercios, hasta viviendas y demás servicios básicos. Hacia el fondo se observan extensas hectáreas de pastos, bosque secundario y cultivos.

Figura 13

*Sector sur de el lago*



Fuente: Maarten de Moor (2020)

La figura 5 da una vista panorámica hacia el sur de el lago, donde se ve el centro urbano del cantón, con un fondo donde se aprecian los complejos volcánicos de Congo y Poás principalmente. No obstante, el día de la toma de la fotografía los volcanes se encontraban nublados, por tal razón no se aprecian correctamente.

Figura 14

*Sector noroeste de el lago*

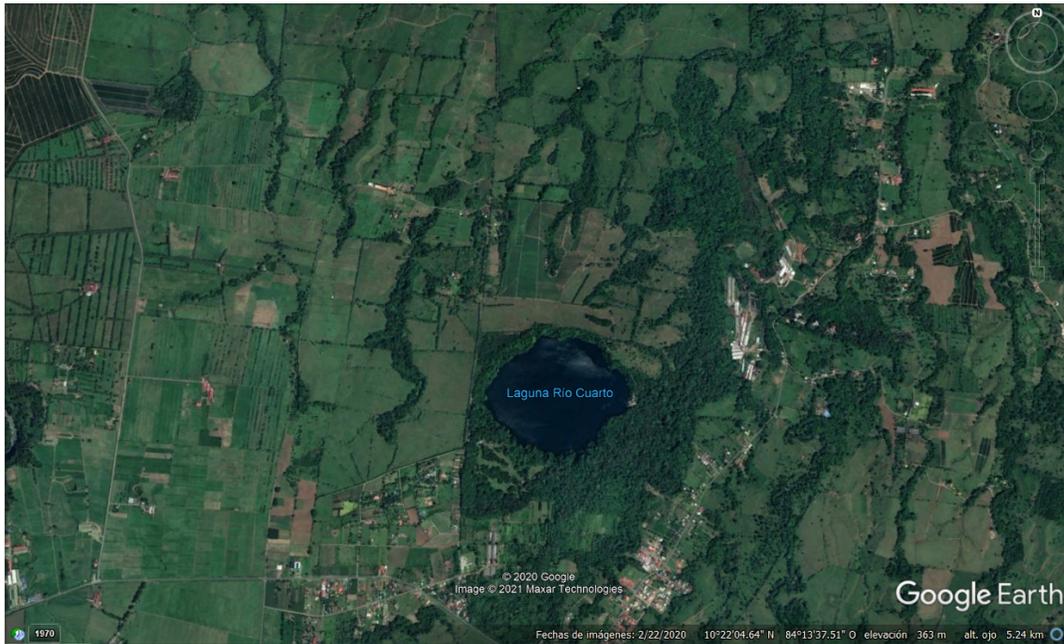


Fuente: Maarten de Moor (2020)

En esta figura 6 se observa el noroeste y parte de el lago, así como sus alrededores y las diversas coberturas que se encuentran, principalmente actividades relacionadas con cultivos y pastos.

Figura 15

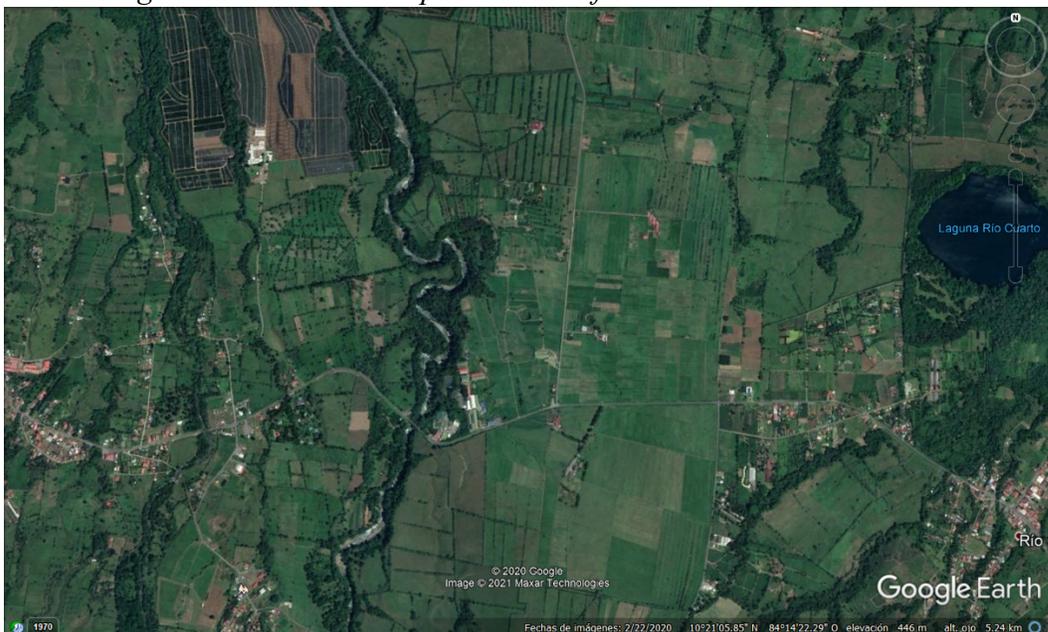
*Imagen satelital utilizada para la identificación de las coberturas de la Tierra*



Fuente: Google Earth (2020)

Figura 16

*Imagen satelital utilizada para la identificación de las coberturas de la Tierra*



Fuente: Google Earth (2020)

Las figuras 7 y 8 corresponden a las imágenes de Google Earth con las cuales se elaboró el mapa 2 de anexos de coberturas de la Tierra.

Figura 17

*Equipo de trabajo de febrero del 2020 en el lago de Río Cuarto, en la extracción de muestras*

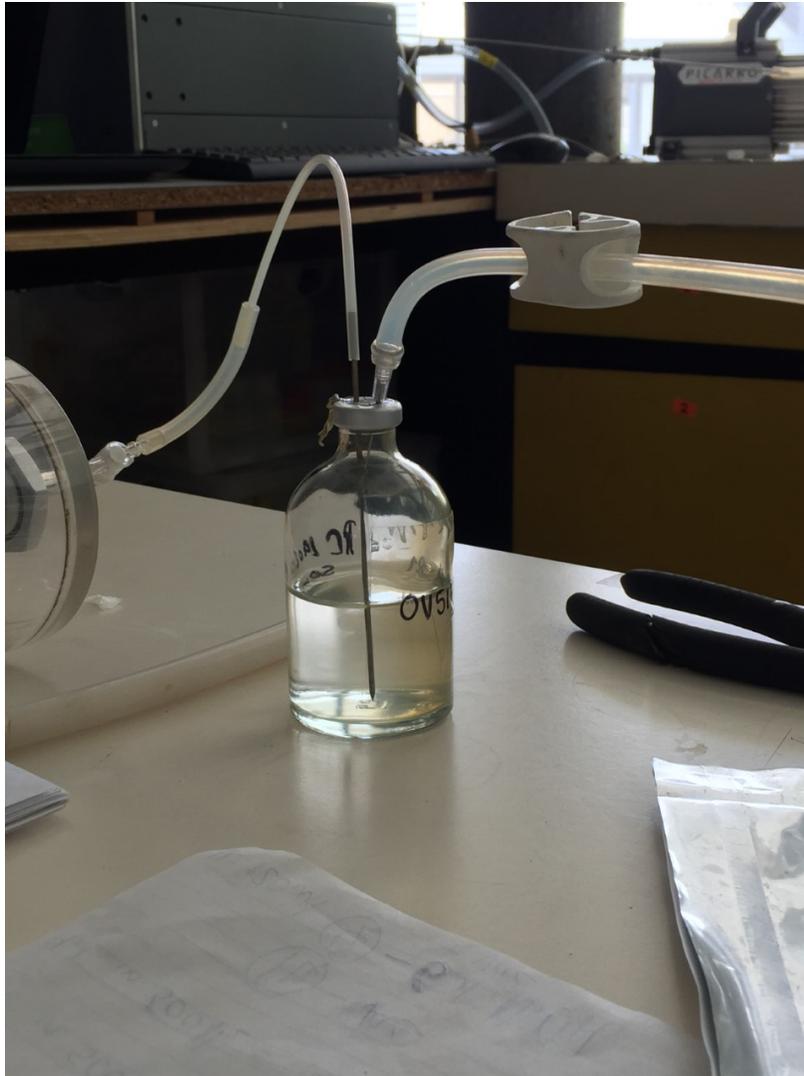


Fuente: Christofer Jiménez (2020)

En la fotografía se observa al Dr. Gustavo Barrantes, Dr. Maarten de Moor y el Dr. Alejandro Rodríguez.

Figura 18

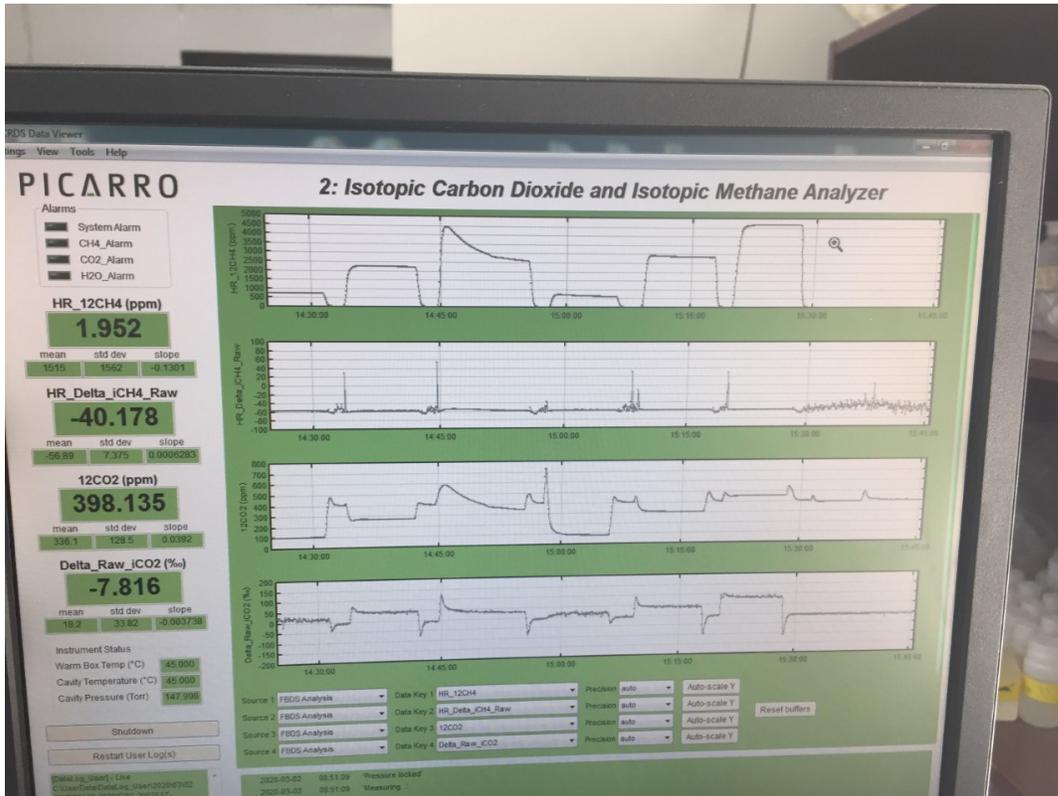
*Pruebas en laboratorio para obtener el mejor método de análisis de las muestras*



Fuente: Christofer Jiménez (2020)

Figura 19

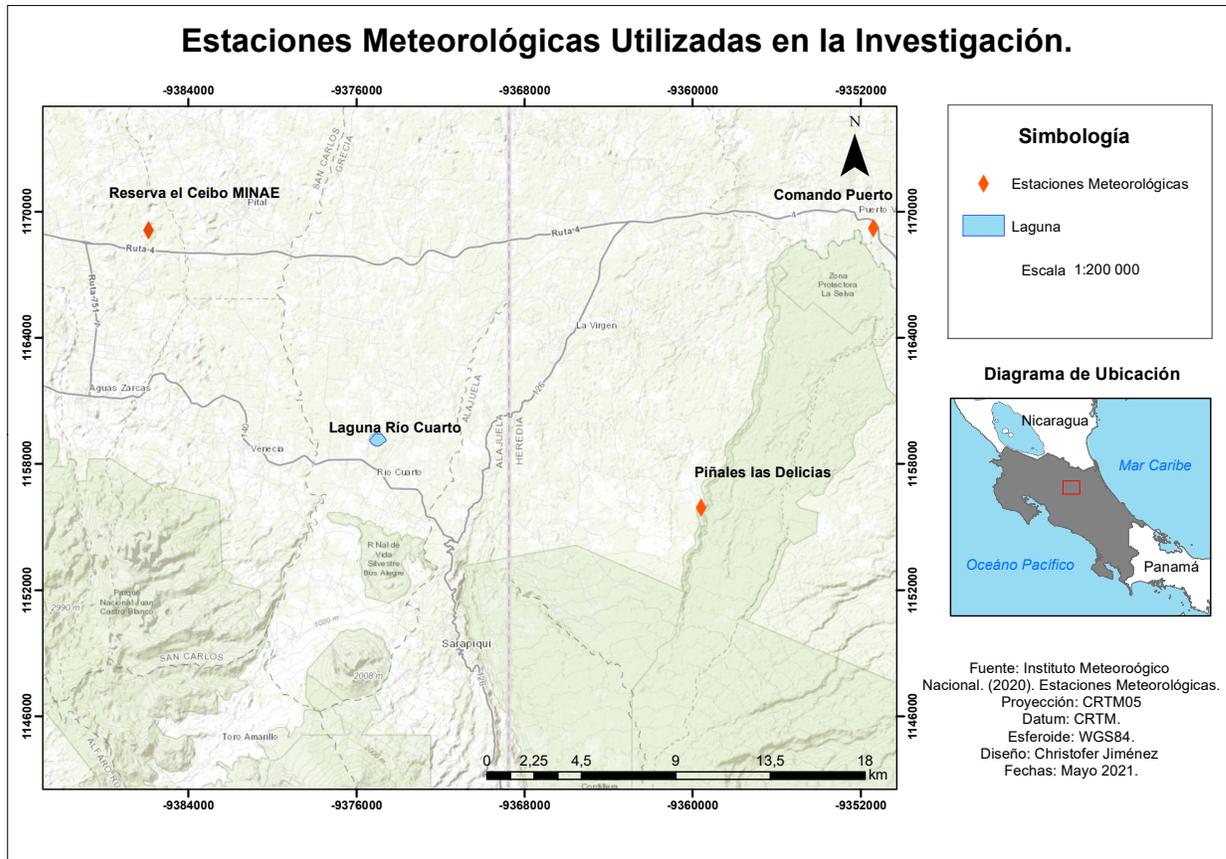
*Analizador de Isótopos, Picarro G2201-i. en proceso de análisis*



Fuente: Christofer Jiménez (2020)

## Mapa 15

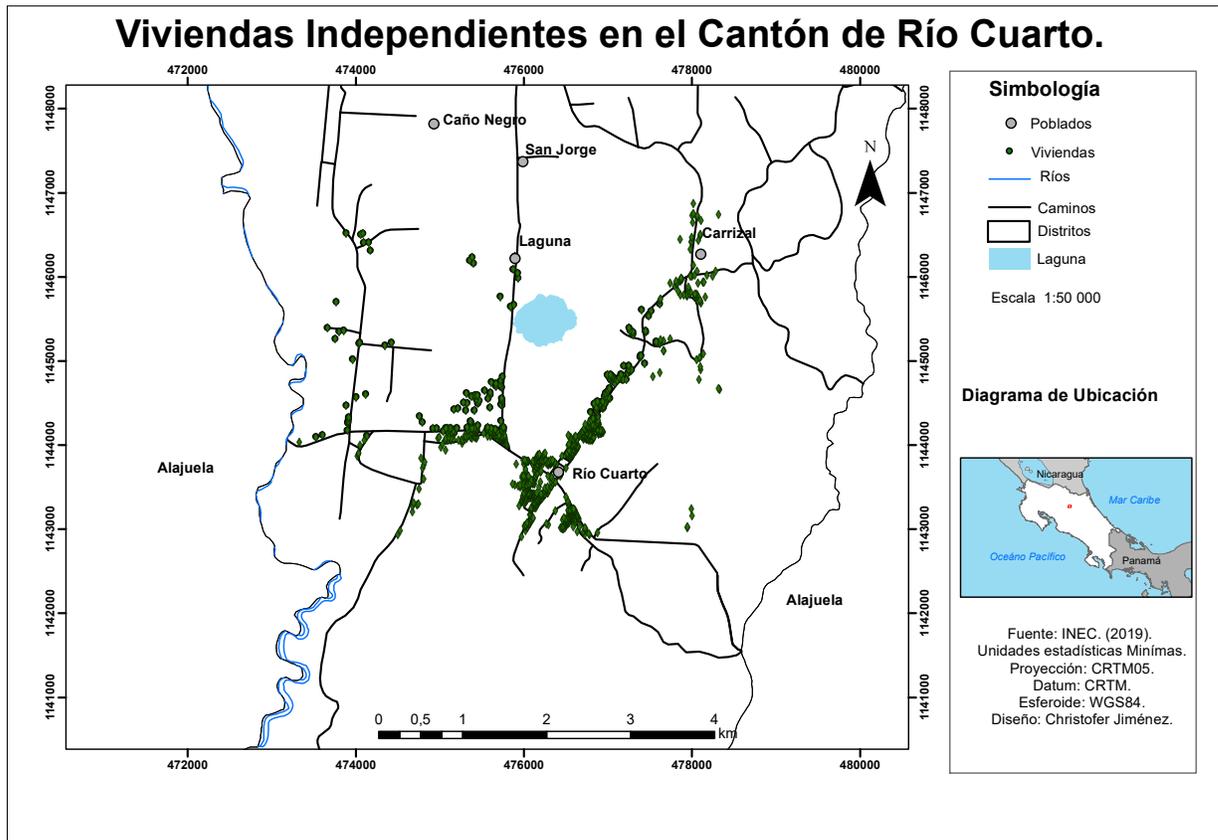
*Estaciones meteorológicas utilizadas para el modelo Aermod*



Fuente: Christofer Jiménez (2021)

## Mapa 16

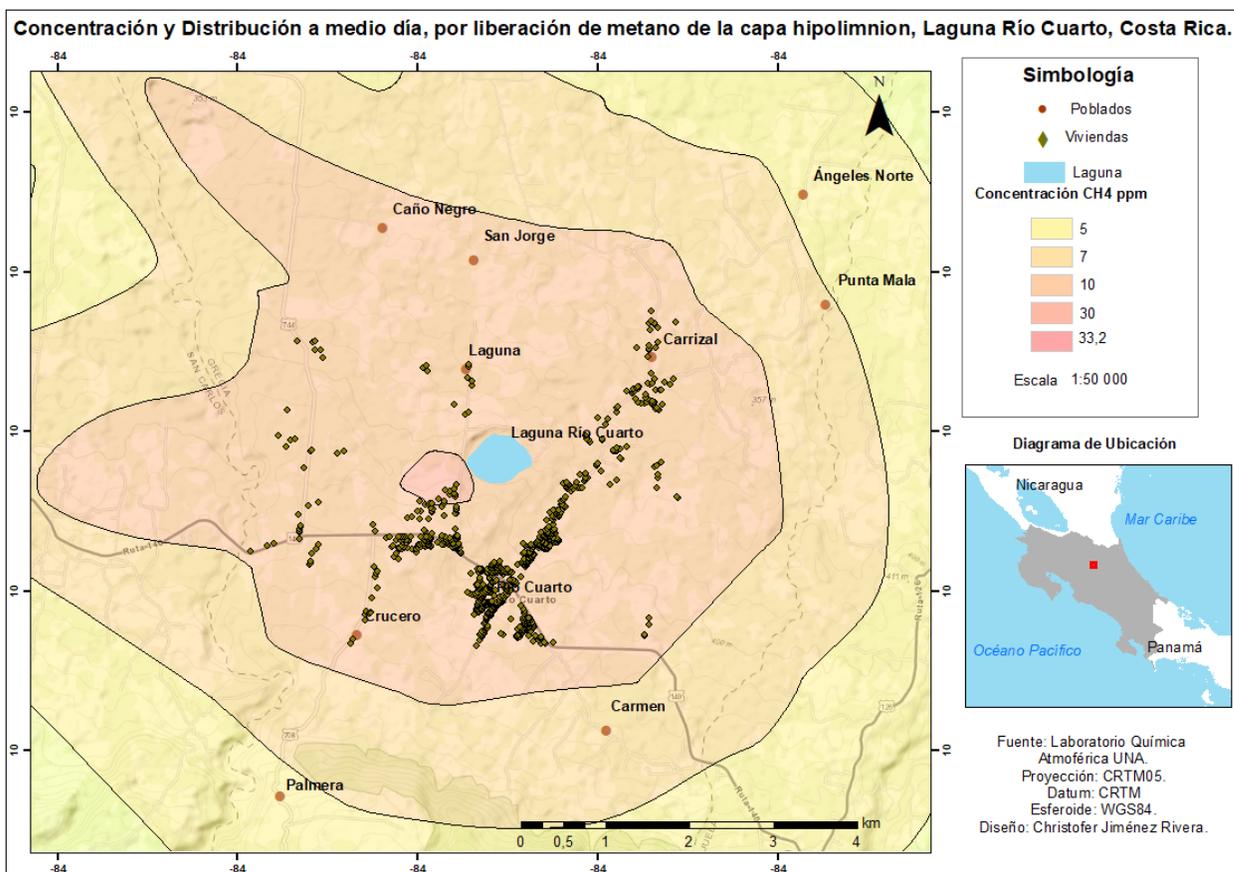
*Viviendas que se encuentran dentro de las zonas de distribución y afectación de gas en el cantón de Río Cuarto*



Fuente: INEC y elaboración propia (2020)

### Mapa 17

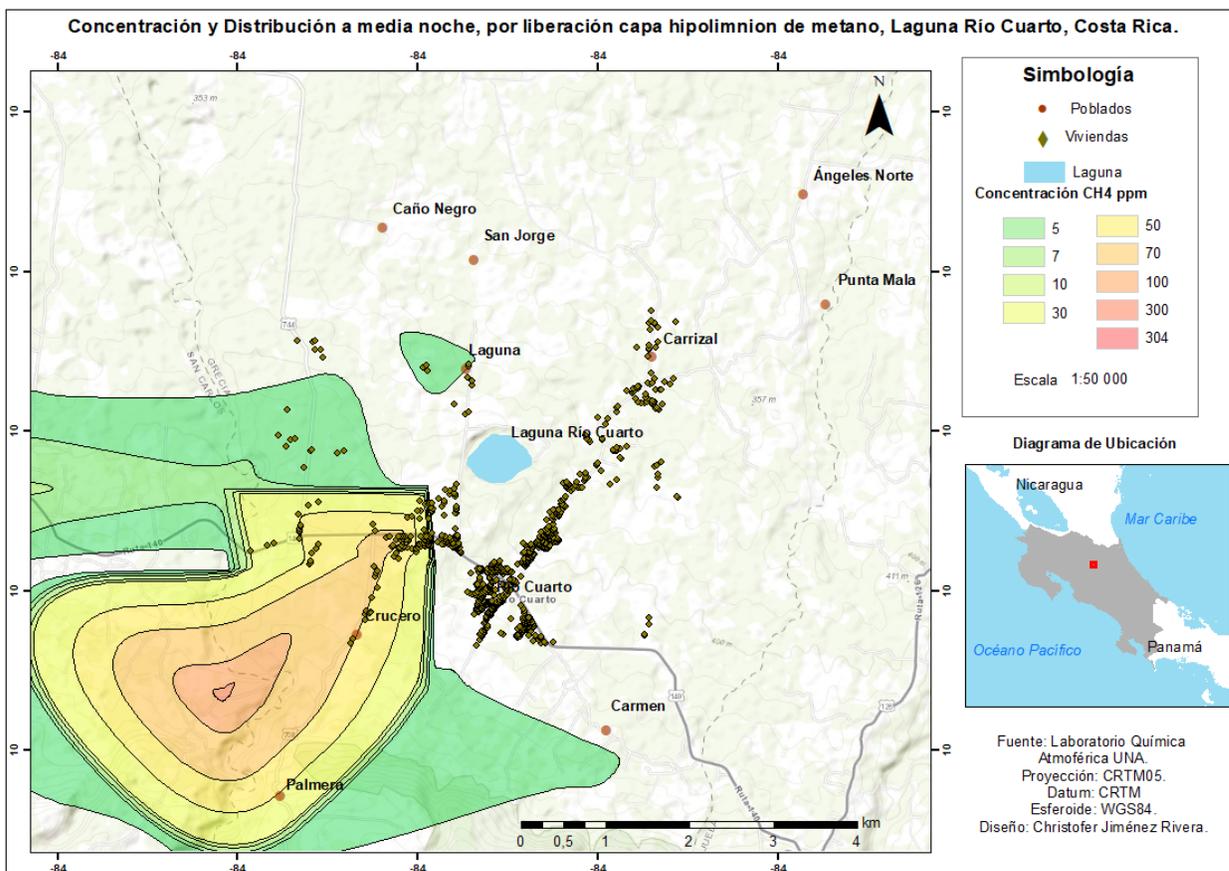
Modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a mediodía



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 18

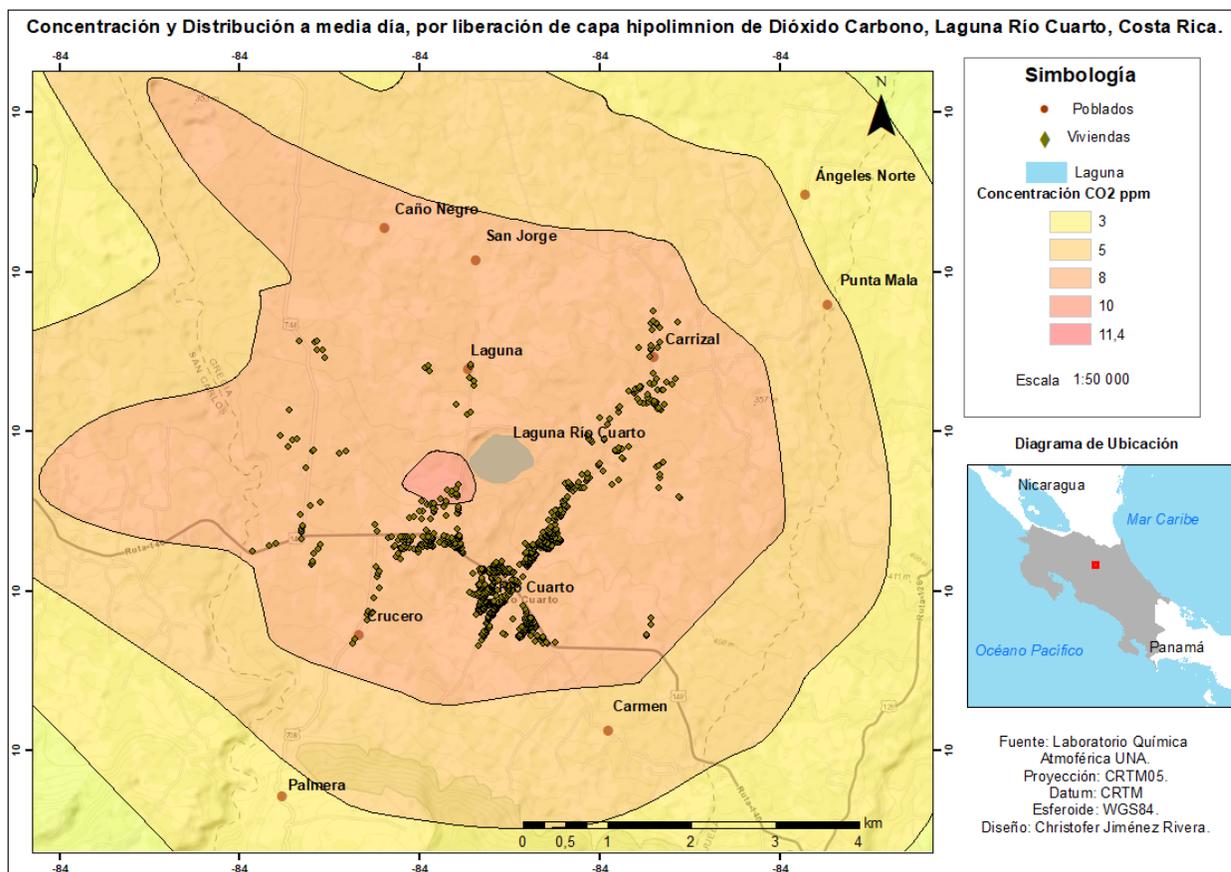
*Modelo Aermod con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche*



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

### Mapa 19

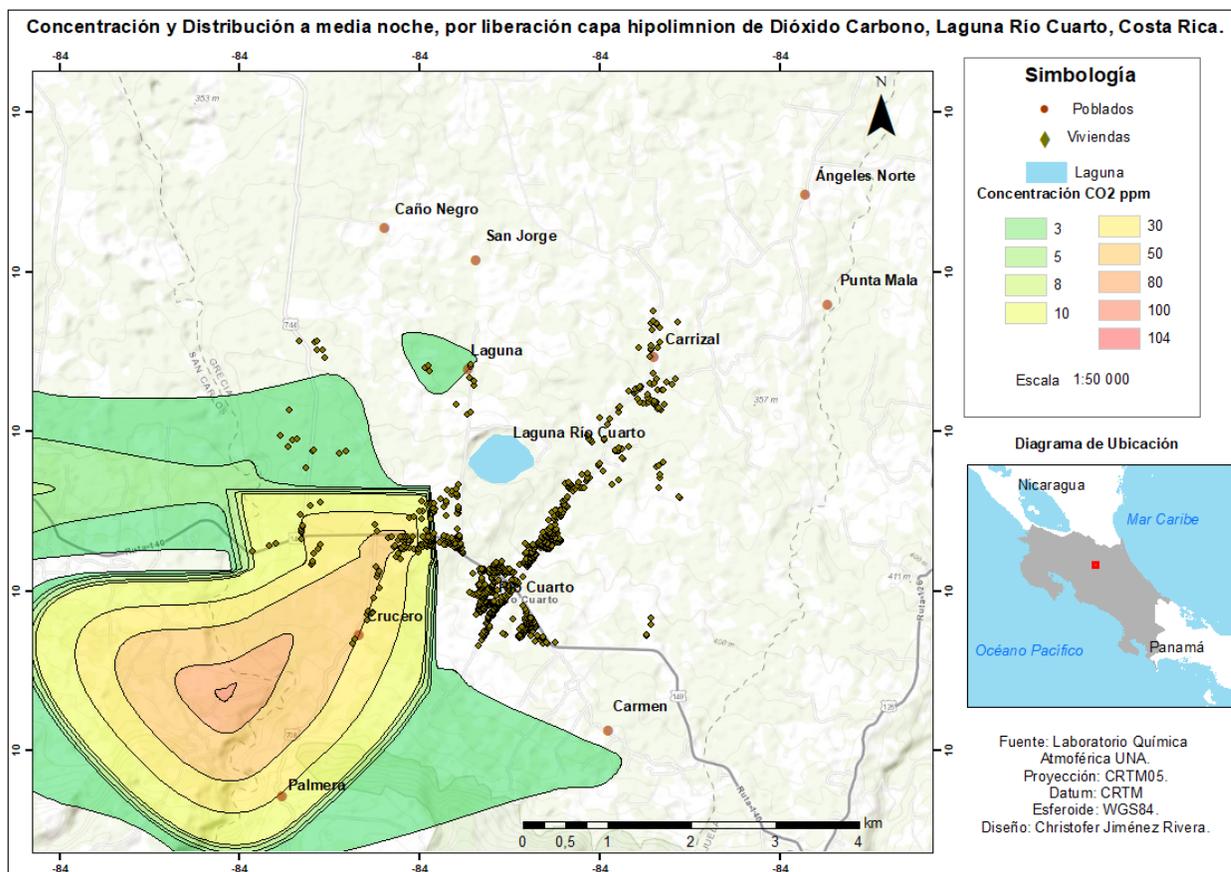
Modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a mediodía



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 20

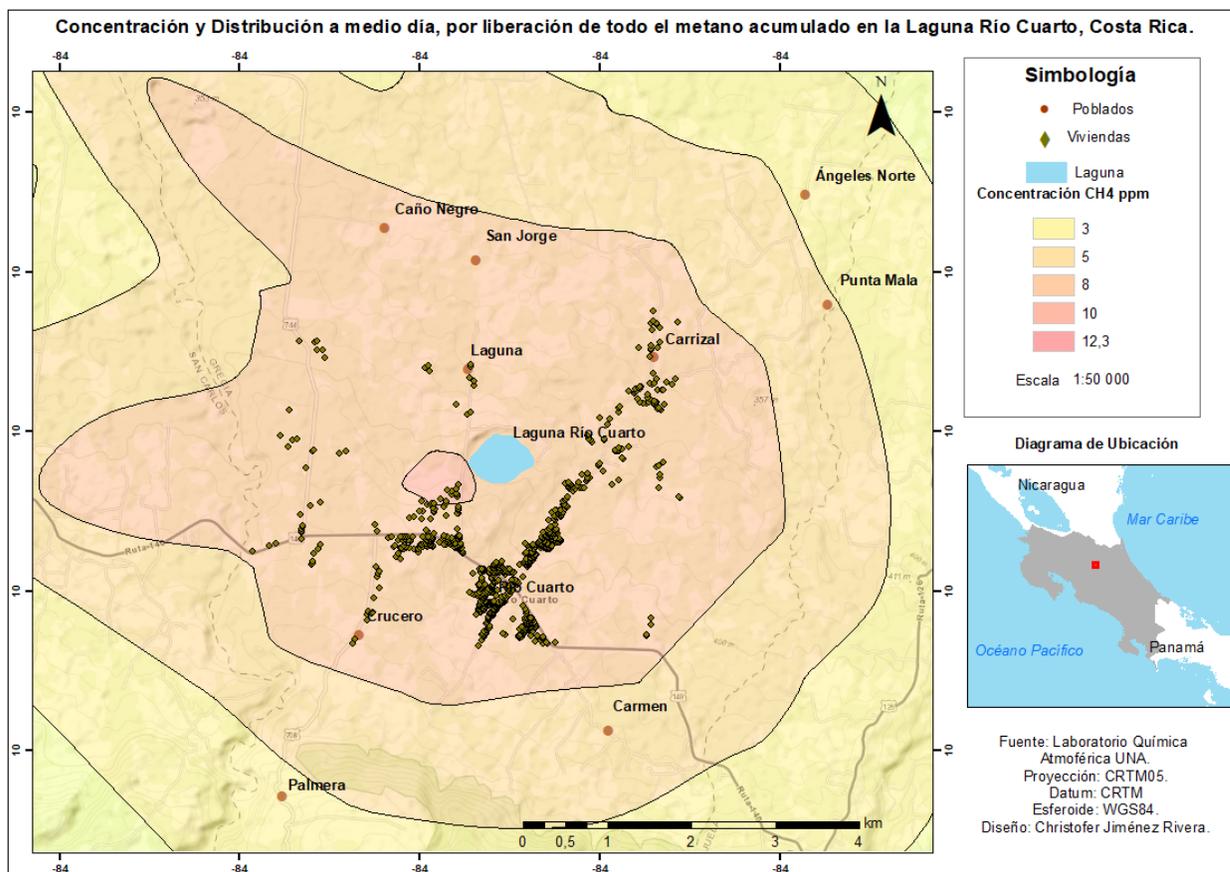
*Modelo Aermod con concentración y distribución de dióxido de carbono, una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche*



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

## Mapa 21

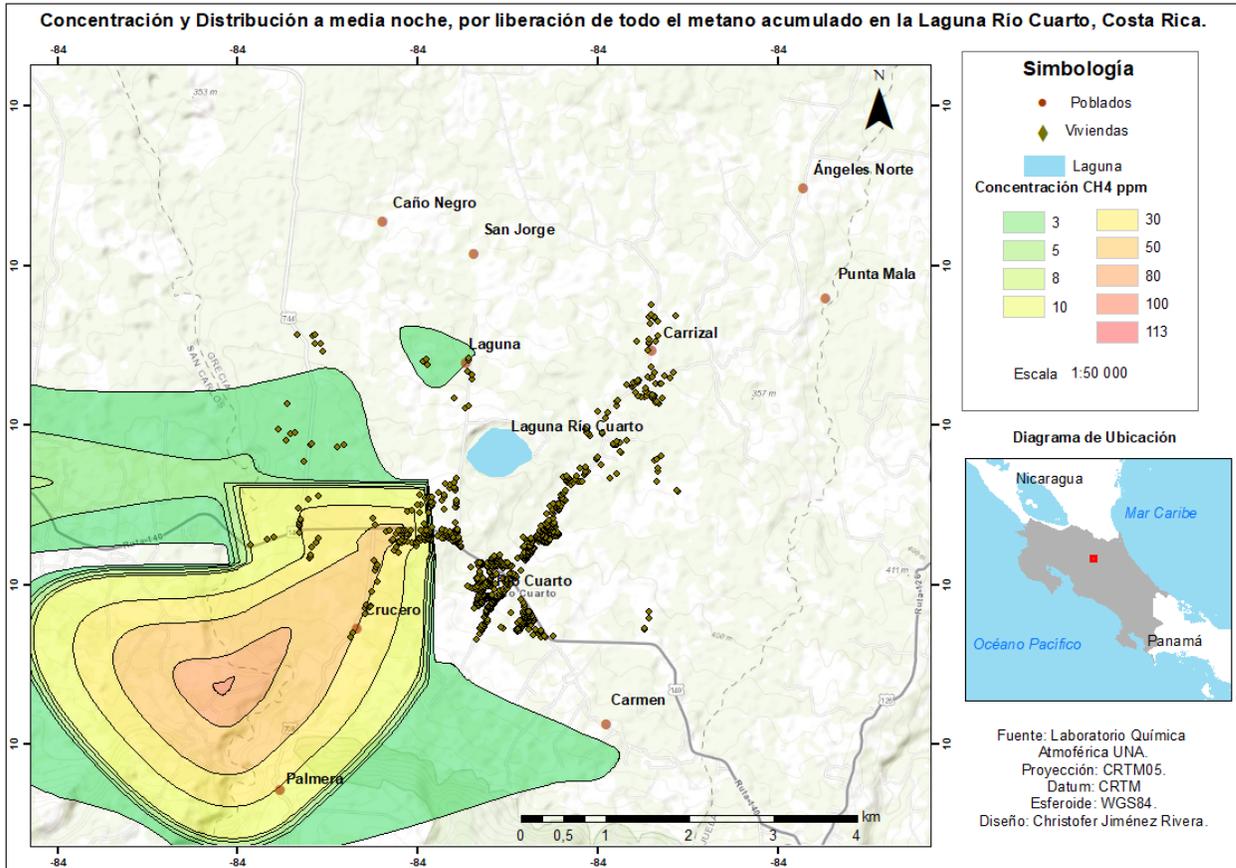
*Modelo Aermod del segundo escenario con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a mediodía*



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

Mapa 22

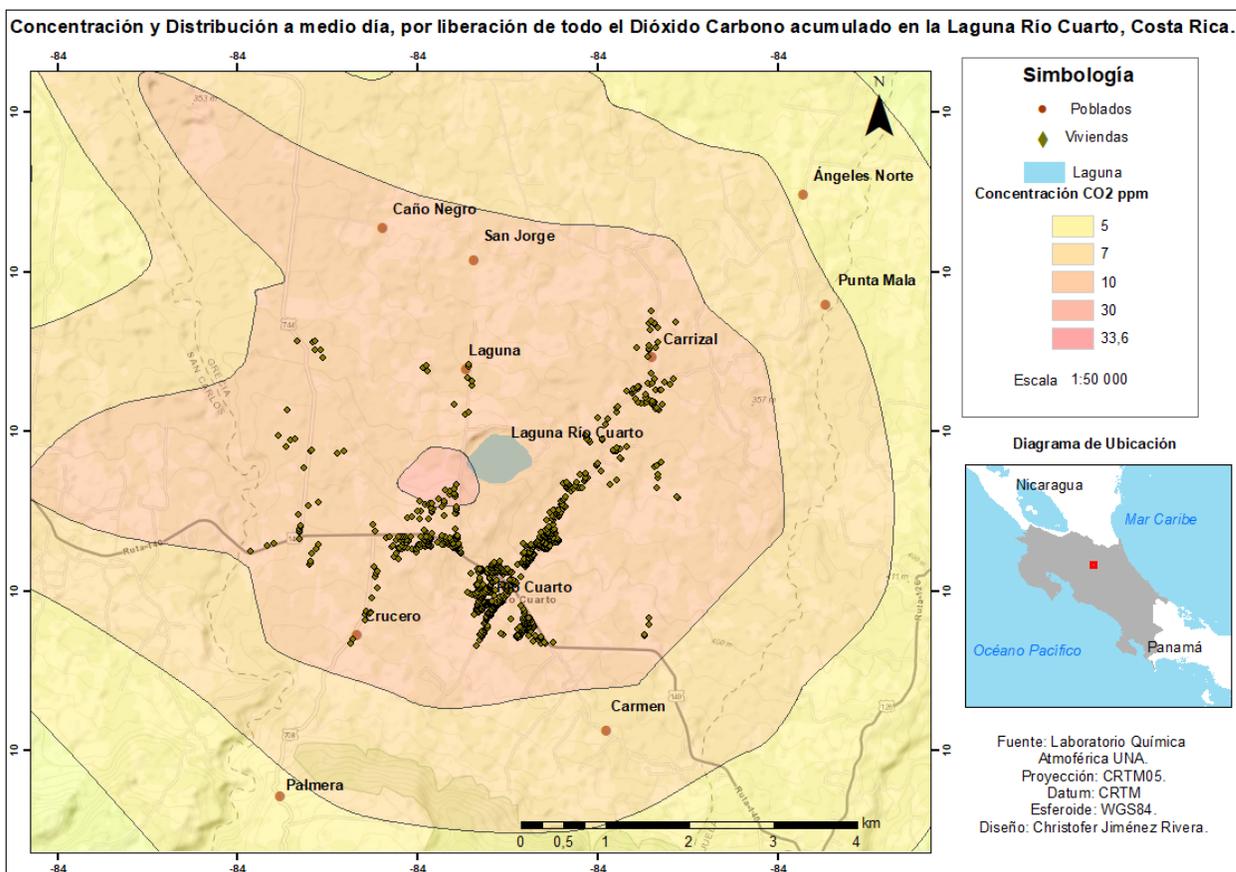
Modelo Aermod del segundo escenario con concentración y distribución de metano, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a media noche



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

### Mapa 23

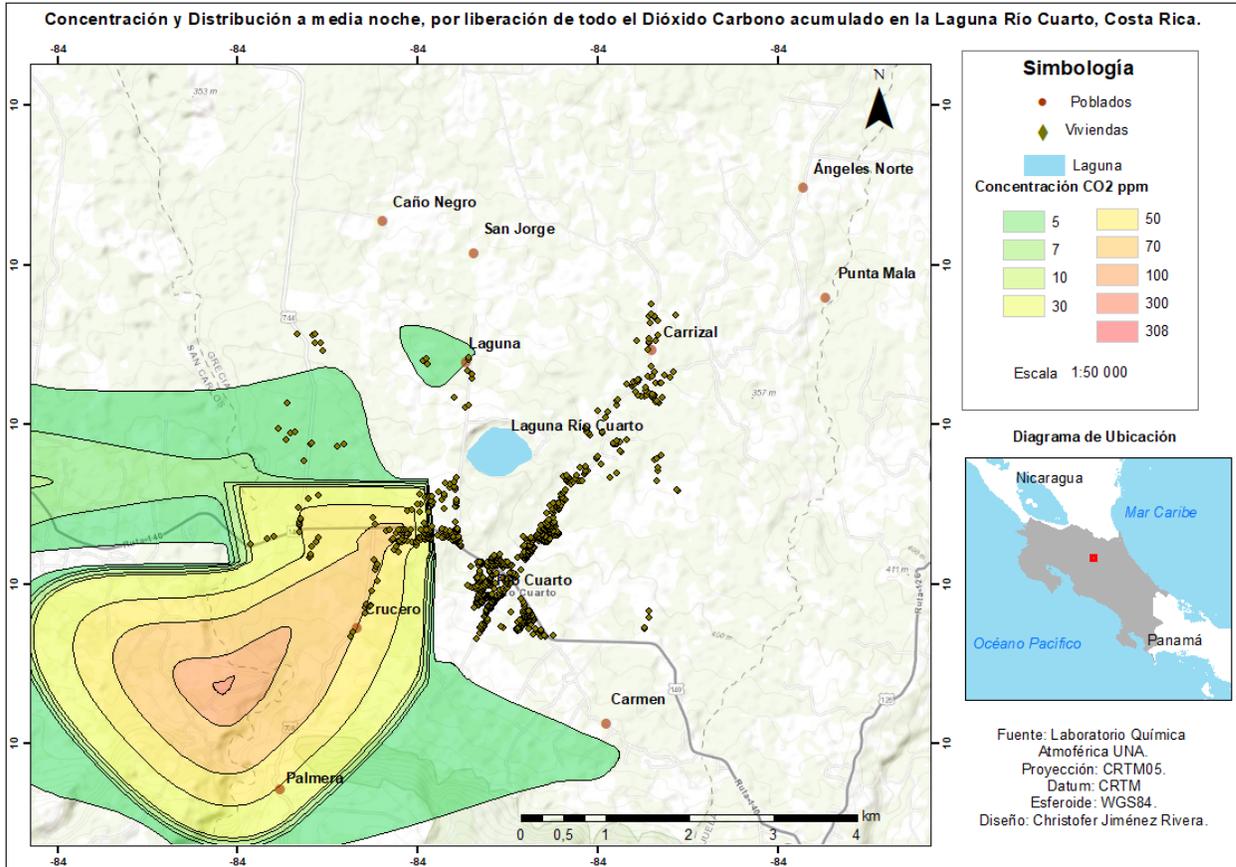
*Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a mediodía*



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

Mapa 24

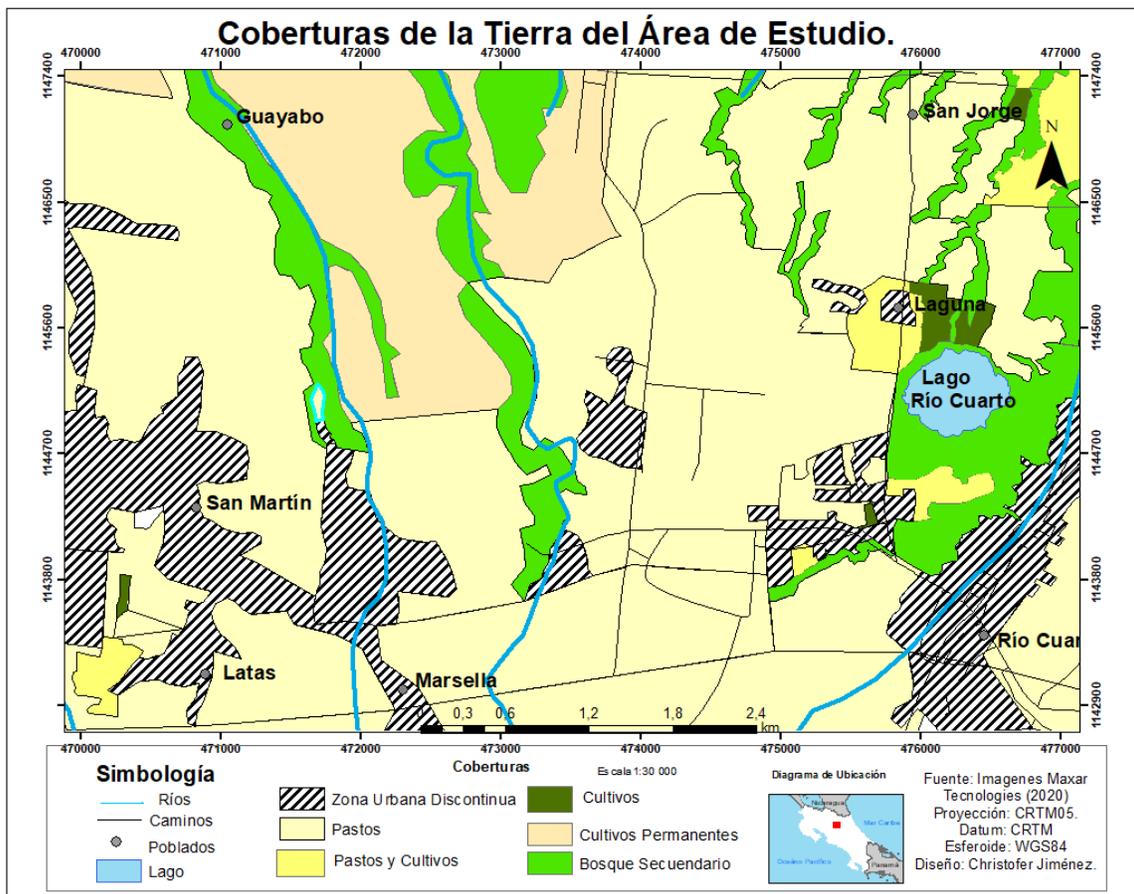
Modelo Aermod segundo escenario con concentración y distribución de dióxido de carbono, con una erupción de 10 minutos y una exposición de una hora a medianoche



Fuente: Laboratorio Química de la Atmósfera, UNA (2021)

# Mapa 25

## Mapa de coberturas de la Tierra del área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2021)

## 1. Referencias bibliográficas

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2014). *Ácido Sulfúrico*. Departamento de Salud y Servicios Humanos de Estados Unidos. P. 3  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs114.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs114.pdf)
- Alvarado, G & Carl, M. (1993) *The Platanar-Aguas Zarcas volcanic centers, Costa Rica: spatial-temporal association of Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism*). Bull Volcano. Pp. 443-453.  
[https://www.researchgate.net/publication/248150950\\_The\\_Platanar-Aguas\\_Zarcas\\_volcanic\\_centers\\_Costa\\_Rica\\_spatial-temporal\\_association\\_of\\_Quaternary\\_calc-alkaline\\_and\\_alkaline\\_volcanism](https://www.researchgate.net/publication/248150950_The_Platanar-Aguas_Zarcas_volcanic_centers_Costa_Rica_spatial-temporal_association_of_Quaternary_calc-alkaline_and_alkaline_volcanism)
- Alvarado, G. (2008). Volcán Laguna Río Cuarto. *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente*. 3<sup>ra</sup>. Edición, San José, C. R.: UNED, 2008. Pp 396 .
- Alvarado, G. E., Soto, G. J., Salani, F. M., Ruiz, P., & de Mendoza, L. H. (2011). The formation and evolution of Hule and Río Cuarto maars, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1–4), 342–356.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.12.017>
- Alvarado, G. (2011). *Los Volcanes de Costa Rica (Historia, Geología, Riqueza Natural y su gente)*. San José, Costa Rica: Editorial EUNED. pp 198-207.
- Ampuero, A. (2018). Relación del pH y oxígeno disuelto de fondo con la distribución del bentos calcificante de la plataforma Centro – Norte Peruana. Universidad Peruana, Cayetano Heredia. Lima, Perú.  
[https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/3583/Relacion\\_AmpueroLeon\\_Andre.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/3583/Relacion_AmpueroLeon_Andre.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Arnau, J. (2008). Estudios longitudinales. Modelos de diseño y análisis. Facultad de Psicología. *Universidad de Barcelona*. Pp 1-10.

<http://scielo.isciii.es/pdf/ep/v2n1/original3.pdf>

- Bárcena, A; Prado, A; Samaniego, J. y Pérez, R. (2012). *Efectos del cambio climático en las costas de América Latina y Caribe: Exposición y Vulnerabilidad*. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL. Pp 1-15.
- Barrantes, G. y Márquez, R. (2011). De la atención del desastre a la gestión del riesgo, una visión desde la geografía. *Revista Geográfica de América Central*. N° 47 II Semestre 2011 pp. 15–38.
- Barrantes, G & Toulkeridis, T. (2015). *Visita de campo a el lago de Río Cuarto; Colaboración entre la Universidad Nacional de Costa Rica y la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador*. Comisión editorial de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Barry, P; De Moor et al (2019). Forearc carbon sink reduces long-term volatile recycling into the mantle. *Revista Nature*, Vol 1568 N° 487. Pp 1-13.
- Bayón, P. (2016). The geographical thinking in the perception of risks for extreme hydrometeorological hazards: a case of study at Mariel, Cuba. Instituto de Filosofía, CITMA, Cuba. *Revista Geográfica de América Central*. N° 56 ISSN 1011-484X, pp. 113–135.
- Belkis, E. (2011). Definitions on the risk and its implications. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiol* 2011;49(3):470-481. <http://scielo.sld.cu>

- BBC NEWS. (2018). La misteriosa nube que mató a más de 1.700 personas y 3.500 cabezas de ganado. Camerún. *Edición BBC News, Estados Unidos*.  
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-45367560>
- Bini, G; Chiodini, G; Luchetti, C; Moschini, P; Caliro, S; Mollo, S; Selva, J; Tuccimei, P; Galli, G. y Bachmann, O. (2019). Deep versus shallow sources of CO<sub>2</sub> and Rn from a multi-parametric approach: the case of the Nisyros caldera (Aegean arc, Greece). *Scientific Reports natural research*. Pp1-17
- Cabassi, J., Tassi, F., Mapelli, F., Borin, S., Calabrese, S., Rouwet, D., Mora-. (2014). *Geosphere-Biosphere Interactions in Bio-Activity Volcanic Lakes: Evidences from Hule and Río Cuarto*. Plos One. Vol 9. Pp 1-26.
- Carballo-Chaves, C; Villalobos-Forbes, M; Esquivel-Hernández, G & Sánchez-Murillo, R (2020). *Isotope composition of carbon dioxide and methane in a tropical urban atmosphere, Isotopes in Environmental and Health Studies*. DOI:10.1080/10256016.2020.180385.
- Calvo, F & García, T. (2001). *Sociedades y Territorios en riesgo*. Barcelona, España: Editorial Serbal. Pp 20-21.
- Cartaya, S & Méndez, W. (2015). Comprendiendo el fenómeno de la vulnerabilidad social y la naturaleza. *Instituto Pedagógico de Caracas (IPC) Caracas – Venezuela. Volumen 2, N°1*. Pp 2-33. <http://revistas.upel.edu.ve/index.php/dialogica>
- Cruz, M., & Carrasco-Núñez, G. (2008). Evolución de un cráter de explosión (maar) riolítico: Hoya de Estrada, campo volcánico Valle de Santiago, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(3), 549–564.
- Comisión Nacional de Emergencias (2016). *El riesgo derivado de la amenaza*

*volcánica en Costa Rica*. CNE. San José, Costa Rica. Pp 8-13.

- Delmelle, P; Henley, R; Bernad, A. (2015). Volcano-Related Lakes. *The Encyclopedia of Volcanoes*. Pp 825-864. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00048-1>
- De Moor, M. Martínez, M, Murrillo, C. (2017). *The Center for the Complete Analysis of Volcanic Gases (CCAV-GAS)*. First of its kind on the Central American Volcanic Arc. OVSICORI- Heredia- Costa Rica.
- Denyer, P y Alvarado, G. (2009). *Atlas tectónico de Costa Rica*. Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica. 2<sup>ed</sup>, pp 29
- Díaz, R. (2010). Modelo Hidrogeoquímico del acuífero de las Cañadas del Teide, Islas Canarias. *Instituto Tecnológico y de Energías Renovables de Granada, España*. Pp 353-354.
- Etiopie, G; Sherwood, L. (2013). Abiotic Methane on Earth. *American Geophysical Union, Vol 5*. Pp 1-24.  
[https://www.google.com/search?q=Etiopie%2C+G.+and+Sherwood+Lollar%2C+B.%2C+2013.+Abiotic+methane+on+Earth.+Reviews+of+Geophysics%2C+51\(2\)%2C+pp.276-299&aq=chrome.0.69i59l2.3360j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Etiopie%2C+G.+and+Sherwood+Lollar%2C+B.%2C+2013.+Abiotic+methane+on+Earth.+Reviews+of+Geophysics%2C+51(2)%2C+pp.276-299&aq=chrome.0.69i59l2.3360j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- Fernando, A & Francisco, J. (2004). Geographical risks and their impact on society: threats and disasters. *Revista de Urbanismo N°10*. ISSN 0717-5051. Pp 17-23.
- Gerald C. Nelson, Mark W. Rosegrant, Jawoo Koo, Richard Robertson, Timothy

Sulser, Tingju Zhu, Claudia Ringler, Siwa Msangi, Amanda Palazzo, Miroslav Batka, Marilia Magalhaes, Rowena Valmonte-Santos, Mandy Ewing, y David Lee. (2009). El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. *Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias IFPRI Washington, D.C.* Pp. 1-30

- Gerlach, T; Doukas, M; McGee, k & Kessler, R. (2000). Soil efflux and total emission rates of magmatic CO at the 2 Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California, 1995–1999. *U.S. Geological Survey, Cascades Volcano Observatory. Vancouver, WA, USA.*
- Giggenbach, W. (1989). Water and gas chemistry of Lake Nyos on the eruptive process. *Amsterdam: Journal of Volcanology and Geothermal Research.* Vol 42. Pp 1-26.
- Gómez, G; Mendoza, M; Macías, J y Granados, M. (2017). Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo. *Revista Geográfica.* Vol 158. Pp 1-105.  
[https://www.researchgate.net/publication/322517509\\_Riesgo\\_volcanico\\_estado\\_del\\_arte\\_y\\_desafios\\_de\\_trabajo](https://www.researchgate.net/publication/322517509_Riesgo_volcanico_estado_del_arte_y_desafios_de_trabajo)
- Göcke, K; Bussing, W. y Cortés, J. (1987). Morphometric and basic limnological properties of the Laguna de Río Cuarto, Costa Rica. Centro de Investigaciones del Mar y Limnología, *Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.* . *Rev. Biol. Trop.* 35(2): 277-285, 1987.
- Haberyan, K; Horn, S. y Umaña, C. (2003). Basic limnology of fifty-one lakes in Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 51(1): 107-122, 2003. [www.ots.duke.edu](http://www.ots.duke.edu)
- Hernandez, R; Fernandez, C. y Pilar, M. (2014). *Metodología de la Investigación.* McGraw Hill, sexta edición, Santa Fe, México . Pp 22-31.
- Hoyos, C. y Wills, A. (2007). Evaluation of thermal stratification and its relation with the water quality in the wetland Cachimbero, municipality of Cimitarra,

Santander, Colombia. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. N.o 41.* pp. 48

- International Volcanic Health Hazard Network. (S.F). Guía sobre gases volcánicos y aerosoles. *Durham University, England.* pp 1-47. <https://www.ivhhn.org/home>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2011). *Población por cantones y distritos en Costa Rica. Censo 2011.* San José Costa Rica. <http://www.inec.go.cr>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (2018). Dióxido de Carbono. Límites de exposición para agentes químicos de España. Madrid, España. <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (1992). *Clima de la Vertiente Norte de Costa Rica.* IMN, San José, Costa Rica. Pp 1-3. <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>
- Instituto de Desarrollo Rural. (2015). *Caracterización básica de San Carlos, Peñas Blancas y Río Cuarto,* Sede regional Huetar Norte. Costa Rica pp 55-60.

<https://www.inder.go.cr/san-carlos-penas-blancas-rio-cuarto/Caracterizacion-San-Carlos-Penas-Blancas-Rio-Cuarto.pdf>

- Kemel, G y Imaz, C. (1995). La delta de Dirac como función. Educación Matemática. Universidad distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Volumen 7, N°8. Pp 1-10.
- Kusakabe, M. (2015). Evolution of CO<sub>2</sub> content in lakes Nyos and Sub-lacustrine CO<sub>2</sub> Recharge System at Lake Nyos as Envisaged from CO<sub>2</sub>/<sub>3</sub> he ratios and noble gas signatures. *Volcanic Lakes.* Chemical Journal. Vol Pp 427-450.
- Kusakabe, M, Ohba, Yutaka, Satake, Ohizumi, Evans y Kling. (2008). Evolution of CO<sub>2</sub> in Lakes Monoun and Nyos, Cameroon, before and during controlled degassing. *Geochemical Journal, Vol. 42, pp. 93 to 118, 2008*
- Lizcano, E. y Fernández, J. (2014). Saberes locales y los conocimientos científicos:

El caso de los lagos asesinos de Camerún. *Revista Sociológica de Pensamiento Crítico*. Vol 8, 2014.

[https://www.researchgate.net/publication/316488886\\_SABERES\\_LOCALES\\_Y\\_CONOCIMIENTOS\\_CIENTIFICOS\\_EL\\_CASO\\_DE\\_LOS\\_LAGOS\\_ASESINOS\\_DE\\_CAMERUN\\_Local\\_Knowledge\\_and\\_Epistemology\\_The\\_Case\\_of\\_Cameroon's\\_Killer\\_Lakes](https://www.researchgate.net/publication/316488886_SABERES_LOCALES_Y_CONOCIMIENTOS_CIENTIFICOS_EL_CASO_DE_LOS_LAGOS_ASESINOS_DE_CAMERUN_Local_Knowledge_and_Epistemology_The_Case_of_Cameroon's_Killer_Lakes)

- Llinares, M; Ortiz, R. y Marrero, J. (2004). *Riesgo Volcánico*. España: Editorial Dirección General de Protección Civil y Emergencias, Ministerio del Interior. Pp1-34.
- Lorenz, V. (1975). Formation of phreatomagmatic maar-diatreme volcanoes and its relevance to kimberlite diatremes. *Geologisches Institut der Johannes Gutenberg Universität, Mainz, Germany*. Pp 1-11.
- Loughlin, S. (2015). *Global Volcanic Hazard and Risk*. From Cambridge Books Online by IP 137.222.21.74. BST 2015. Pp 1-410.
- Malowany, K; Stix, J; Pelt, A. y Lucic, G. (2015). H<sub>2</sub>S interference on CO<sub>2</sub> isotopic measurements using a Picarro G1101-i cavity ring-down spectrometer. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 4075–4082, 2015 doi:10.5194/amt-8-4075-2015. Pp 1-8. [www.atmos-meas-tech.net/8/4075/2015/](http://www.atmos-meas-tech.net/8/4075/2015/)
- Malowany, K; Stix, J; De Moor, M; Chun, K; Lacrampe, G. y Lollar, B. (2017). Carbon isotope systematics of Turrialba volcano, Costa Rica, using a portable cavity ring down spectrometer. *Geochemistry, Geophysical, Geosystem*. Pp. 1-16. 10.1002/2017GC006856
- Martínez, M. (2009). Geographers and the Risk and Environmental Disasters'

Theory. *Perspectiva Geográfica Vol. 14, 2009. Pp 204-2049.*

- Metz, B; Davidson, O. (2005). La captación y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. OMM. Convención marco de las Naciones Unidas del cambio climático. Pp 2-10.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2015). *Manual de definición de clases de la leyenda clc-cr para la generación de mapas de uso y cobertura de la tierra.* Versión 1.0. Pp 1-21. MAG, Costa Rica.
- Miranda, F; Robles, A. (2013). *Diferencia entre riesgo y peligro.* Lima, Perú: Centro de prevención del Riesgo. Pp 5  
[https://www.google.com/search?q=huancayo+distancia+de+lima&rlz=1C1CHBD\\_e\\_sCR803CR803&oq=huancayo&aqs=chrome.1.69i57j0l5.3448j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=huancayo+distancia+de+lima&rlz=1C1CHBD_e_sCR803CR803&oq=huancayo&aqs=chrome.1.69i57j0l5.3448j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- Miller, S & Bada, F. (1992). Comment on “Summary and implications of reported amino acid concentrations in the Murchison meteorite” by E. L. Shock and M. D. Schulte. *Geochimica et Cosmochimica Acta. Volumen 57.*  
<https://www.sciencedirect.com/journal/geochimica-et-cosmochimica-acta>
- Municipalidad de Río Cuarto. (2011). Informe de actividad económica del primer semestre del 2011 en la ciudad de Río Cuarto. *Secretaría de Finanzas Económicas de la Municipalidad Río Cuarto. pp 12-13.*  
<http://www.baverayasociados.com.ar/wp-content/uploads/2011/07/Actividad-Economica-R%C3%ADo-Cuarto-1T.2011.pdf>
- New Jersey Department of Health. (2016). Hoja informativa de sustancias peligrosas (CO<sub>2</sub>). State of New Jersey, Department of Health.  
<https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0343sp.pdf>

- New Jersey Department of Health. (2016). Hoja informativa de sustancias peligrosas, METANO. *State of New Jersey, department of health*.  
<https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0343sp.pdf>
- Otero, N; Rosell, M & Babieri, M. (2015). *Composición Isotópica*. España: Departamento de Mineralogía, Facultad de geología, Universidad de Barcelona.  
<http://www.ub.edu/minegeo/index.php/2-uncategorised/25-tema-1-conceptos-basicos>
- Osorio, M; Puente, L. y Valdez, C. (2014). *Peligros y Riesgos Volcánicos en México*. Instituto de Geofísica, Universidad Autónoma de México: Centro Nacional de Prevención de desastres. Pp 6-10.
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. (2019). *Desgasificación de el lago de Río Cuarto*. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.  
<http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/informes-y-boletines/informes-tecnicos?start=25>
- Permentier, K; Vercammen, S; Soetaert, S y Schellemans, C. (2017). Carbon dioxide poisoning: a literature review of an often forgotten cause of intoxication in the emergency department. *International Journal of Emergency Medicine*. PP 2-4.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5380556/>
- Pirrie, J y Vargas, G. (2010). *Diccionario de la Geografía*. Cartago, Costa Rica: Editorial Instituto Tecnológico de Costa Rica. Pp 320.
- Pizarro, R. (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Santiago de Chile: Naciones Unidas. División de Estadística y

Proyecciones Económicas. Pp 1-72.

- Pérez,N; Hernández, P; Padilla, G; Nolasco, D; Barrancos, J; Melían, G; Padrón, E; Dionis, S; Calvo, D; Rodríguez, F; Notsu, K; Mori, T; Kusakabe, M; Arpa,;M; Reniva, P y Ibarra, M. (2011). Global CO2 emission from volcanic lakes. *Geological Society of America*. v. 39; no. 3; p. 235–238.  
[https://www.researchgate.net/publication/233864244\\_Global\\_CO2\\_emission\\_from\\_volcanic\\_lakes](https://www.researchgate.net/publication/233864244_Global_CO2_emission_from_volcanic_lakes)
- Querol, X; Tobias, A; Pérez, N; Karanasiou, A; Amato, F; Stafoggia, M; Pérez, C; Ginoux, P; Forastiere, F; Gumy, S; Mudu, P; Alastuey, A. (2019). Monitoring the impact of desert dust outbreaks for air quality for health studies. *Environmental International*. Volumen 130.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041201930604X>
- Ramos, V, Estrada, C & Llanos, I. (2014). *Peligro y Riesgo Volcánico en México*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Pedregal de Santo Domingo, México: UNAM. Pp 1-4. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/2-FASCCULOVOLCANES.PDF>
- Red Sismológica Nacional. (2008). *Laguna Río Cuarto*. Universidad de Costa Rica- Instituto Costarricense de Electricidad, Costa Rica.  
<https://rsn.ucr.ac.cr/rsn/comunicados/109-vulcanologia/volcanes-de-costa-rica-ii/19-laguna-rio-cuarto>
- Registro Estatal de emisiones y fuentes contaminantes de España. (2020). *Características físicas del dióxido de Carbono y Metano*. Madrid, España.
- <http://www.prtr-es.es/CO2-Dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>

- Reyes, A; Montilla, A; Castillo, P & Zambrano, M. (2017). Threat, risk and vulnerability to natural events. Socially constructed factors. *Journal of science and research: revista ciencia e investigacion*, e-issn: 2528-8083, vol. 2, no. 6, abril - junio 2017, pp. 22-28
- Rivera, N. (2011). La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo. Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 77, pp. 63-74*
- Rodríguez, M; Muñoz, C. (2012). *Fundamentos de la Climatología*. España: Universidad de la Rioja. Pp 11-17.
- Romero, J; Mella, M; Swandson, F; Crisafulli, C. y González, M. (2017). *La erupción del volcán Calbulco en 2015: Volcanología, Sociedad y ecosistemas*. Chile: Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Pp 1-5.  
<https://www.volcanochile.com/joomla30/index.php/contenidos/12-educacion/7-la-erupcion-del-volcan-calbuco-en-2015-volcanologia-sociedad-y-ecosistemas>
- Ruíz, P; Gazel, E; Alvarado, G; Carr, M. y Soto, G. (2010). Geochemical and petrographical characterization of the geological units of Poás volcano massif, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43: 37-66, 2010 ISSN: 0256-7024.
- Sharp, Z. (2007). *Principles of Stable Isotopic Geochemistry*. Universidad de Nuevo México, Estados Unidos. Library of Congress Cataloging. Pp. 15-39, 149-174.
- Soares, D, Romero, R. (2013). Amenazas y vulnerabilidades: las dos caras de los desastres en Celestún, Yucatán. *Desacatos*, núm. 44, enero-abril 2014, pp. 159-177.  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/desacatos/n44/n44a11.pdf>

- Tassi, F; Vaselli, O; Fernandez, E., Duarte, E; Martinez, M; Delgado Huertas, A; y Bergamaschi, F. (2009). Morphological and geochemical features of crater lakes in Costa Rica: An overview. *Journal of Limnology*, 68(2), 193–205.  
<https://doi.org/10.3274/JL09-68-2-04>
- Tassi, F; Vaselli, O; Tedesco, D; Montegrossi, G; Darrah, T; Cuocu, E; Mapendano, MY; Podera, R y Delgado, A. (2009). Water and gas chemistry at lake Kivu: Geochemical evidence if vertical and horizontal heterogeneities in a multibasin structure. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol 10. Advancing Earth and Space Science*.  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GC002191>
- Trevor, H. (2018). “Desastre del lago Nyos:21 de agosto de 1986. *Scientific American*. 293, pp 49-55
- Toulkeridis, T. (2015). *Amenazas de origen natural y gestión del riesgo en el Ecuador*. Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas. Pp 19-20.
- Valencia, M; Cerón, X & Cardona, C. (2012). Cálculo de la solubilidad del dióxido de carbono en sistemas iónicos acuosos. *Departamento de Investigaciones e Ingeniería Vol 9-Nº1, Colombia*.
- Vidal, L. (2007). Evolución de la vulnerabilidad frente a fenómenos asociados con deslizamientos e inundaciones. *Gestión y Ambiente. Volumen 10 - No. 2. Pp 1-21*.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169419816004>