

TÍTULO DE LA TESIS

Acumulaciones Submarinas de Metano Gaseoso en la Antártida y su Probable Incidencia Ambiental

DOCTORANDO

Ing. Álvaro Sánchez Granel

Director de Tesis

Dr. Rodolfo del Valle

Co-Director de Tesis

Dr. Sergio Schmidt

FECHA DE DEFENSA: **15 de Octubre de 2019,**

RESOLUCIÓN DECANAL: **N° 72/19**

COMPOSICIÓN DEL TRIBUNAL

Dr. Miguel Giraut, Ing. Alicia A. M. Sedeño y Dra. Cristina Massera

TÍTULO GENERAL DE LA TESIS

Acumulaciones Submarinas de Metano Gaseoso en la Antártida y su Probable Incidencia Ambiental

1.1 Introducción

Objetivo General

Analizar las acumulaciones de hidratos de metano en sedimentos del fondo de la plataforma y del margen continental del extremo noreste de la Península Antártica y sus posibles escapes naturales, para inferir sobre los probables efectos que los mismos puedan tener sobre el ambiente antártico, en particular sobre cambios fuera de la media en las temperaturas superficiales y del agua del mar, en el área de estudio.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de la investigación son los siguientes:

- Determinar las causales paleogeográficas de la localización de los depósitos.
- Identificar los sitios de escapes de metano en el área de estudio y analizar sus características oceánicas y atmosféricas.
- Reconocer los patrones ambientales de la probable incidencia de los escapes de metano en cuanto al cambio climático.

La presente investigación pretende ser un aporte original a las ciencias geográficas y a las ciencias de la Tierra, basada en la probable incidencia ambiental que puedan tener los escapes a la atmósfera del gas metano que se encuentra acumulado en el fondo marino en forma de “clatratos¹ de metano o hidratos de metano”.

Una de las probables incidencias ambientales al disolverse el metano en el agua proveniente de las acumulaciones submarinas en forma de hidrato, es la acidificación de los océanos que puede causar una reducción del plancton, que como se sabe afectará a especies que dependen de él para alimentarse, o también la acidificación que hace que se solubilice el carbonato calcio (CaCO_3), dificultando que los organismos marinos conserven sus conchas calcáreas nuevas, sufriendo deformidades que los hagan más vulnerables ante los ataques de sus depredadores. Pero desde el punto de vista geográfico, que es aquel que nos interesa, la incidencia más relevante es que el metano (en nuestro caso proveniente del fondo marino) que llega a la atmósfera, provoca como ya es sabido, un efecto invernadero que trae como consecuencia un aumento de las temperaturas medias globales.

¹ Un clatrato, estructura de clatrato o compuesto de clatrato (del [latín](#) *clathratus*, "rodeado o protegido, enrejado") es una [sustancia química](#) formada por una red de un determinado tipo de [molécula](#), que atrapan y retiene a un segundo tipo diferente de molécula.

Por lo tanto centramos esta investigación, en la probable incidencia que puedan tener estos escapes de metano a la atmósfera, en el aumento de las temperaturas medias provocando un cambio fuera de lo normal en el clima reinante.

1.2 Marco Teórico

La historia del cambio climático de origen antropogénico es reciente, no así los cambios que se sucedieron en el Cenozoico como consecuencia de escapes naturales de grandes cantidades de metano. El descubrimiento científico del cambio climático de origen antropogénico comenzó a principios del siglo XIX cuando se sospechó por primera vez que hubo cambios naturales en el paleoclima y se identificó por primera vez el efecto invernadero natural.

En los decenios de 1950-60, 1960-70 y 1970-80 se recogieron datos que demostraron que las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera estaban aumentando muy rápidamente. Al mismo tiempo, las investigaciones sobre los núcleos de hielo y los sedimentos lacustres revelaron que el sistema climático había sufrido otras fluctuaciones abruptas en el pasado lejano. Se podría decir que a lo largo de las eras geológicas se han producido "puntos de inflexión" capaces de generar fuertes sacudidas y recuperaciones del clima, pasando de grandes calentamientos a grandes enfriamientos.

En 1988 se creó el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). En 1990 este grupo presentó un primer informe de evaluación en el que se reflejaban las investigaciones de 400 científicos. En él se afirmaba que el calentamiento atmosférico de la Tierra era real y se pedía a la comunidad internacional que tomara cartas en el asunto para evitarlo.

La historia de los compuestos de clatrato también es relativamente reciente, su estudio comienza como una curiosidad de laboratorio, éstos solo tenían un valor netamente académico, sin aplicaciones en la industria; luego cuando comienzan las exploraciones de gas y petróleo en las plataformas continentales, se presentan

como un problema en la industria de gas natural por el taponamiento que producían en las cañerías. El interés de este estudio es sobre los hidratos en estado natural. La historia de los hidratos de gas obtenidos en laboratorio tiene a varios investigadores que desde el Siglo XVIII obtuvieron este hielo de gas. Joseph Priestley (1780), T. Bergman (1783), A de Fourcroy (1796) y L.N. Vauquelin (1798), Sir Humphrey Davy (1810). Luego más adelante P. Pfeiffer en 1927 y E. Hertel en 1930, los definieron como "compuestos moleculares" a las sustancias descompuestas en los componentes individuales que seguían la ley de acción masiva en estado de solución o de gas. Hammerschmidt aportó los principios fundamentales para predecir el taponamiento que se producía en las tuberías de extracción de petróleo en alta mar por efecto de los hidratos y también creó los métodos básicos de control de hidratos. Se destacan posteriormente los científicos O. Katz, R Kobayashi, E D. Sloan, V. A. kamath y Y. F. Makogon, que profundizaron las bases teóricas y obtuvieron nuevas técnicas para resolver el problema de los hidratos.

El estudio de los hidratos de gas en estado natural fue iniciado por el profesor N. Strizhev (1946). Posteriormente, Y. F. Makogon (1965- 1966) sustentó la posibilidad de formación de hidratos de gas natural (HGN) en las capas porosas de la tierra. Makogon en 1970 presentó éste descubrimiento en el XI Congreso Internacional de Gas, en Moscú, después del cual se genera un gran interés sobre el tema provocando el inicio de investigaciones en varios países del mundo.

Por lo tanto es necesario realizar algunas consideraciones sobre ambos temas y la relación entre ambos, a modo de introducción.

1.2.1 Consideraciones sobre el Cambio Climático

Desde la segunda mitad del Siglo XX, además de ir creciendo una preocupación universal por el cuidado del medio ambiente, se fue elaborando una teoría, muy cuestionada por algunos científicos, sobre un cambio climático a nivel global, producto de los procesos de contaminación por el desarrollo industrial y agropecuario que se vienen desarrollando desde principios del siglo.

De hecho, la actividad humana tuvo y tiene un impacto tan grande que hay quienes propusieron describir el período que comenzó en el siglo XVIII como una nueva era geológica marcada por la actividad humana. Este nuevo período geológico se puede denominar "Antropoceno" (Paul Crutzen, Instituto Max Planck, Alemania).

El informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007), cuyas conclusiones se consideran conservadoras, predijo un aumento de entre 2°C y 6°C para este siglo. Asimismo, en agosto de 2008, Bob Waston, anterior presidente del IPCC, advirtió que el mundo debería trabajar en estrategias para "prepararnos para un calentamiento de 4°C".

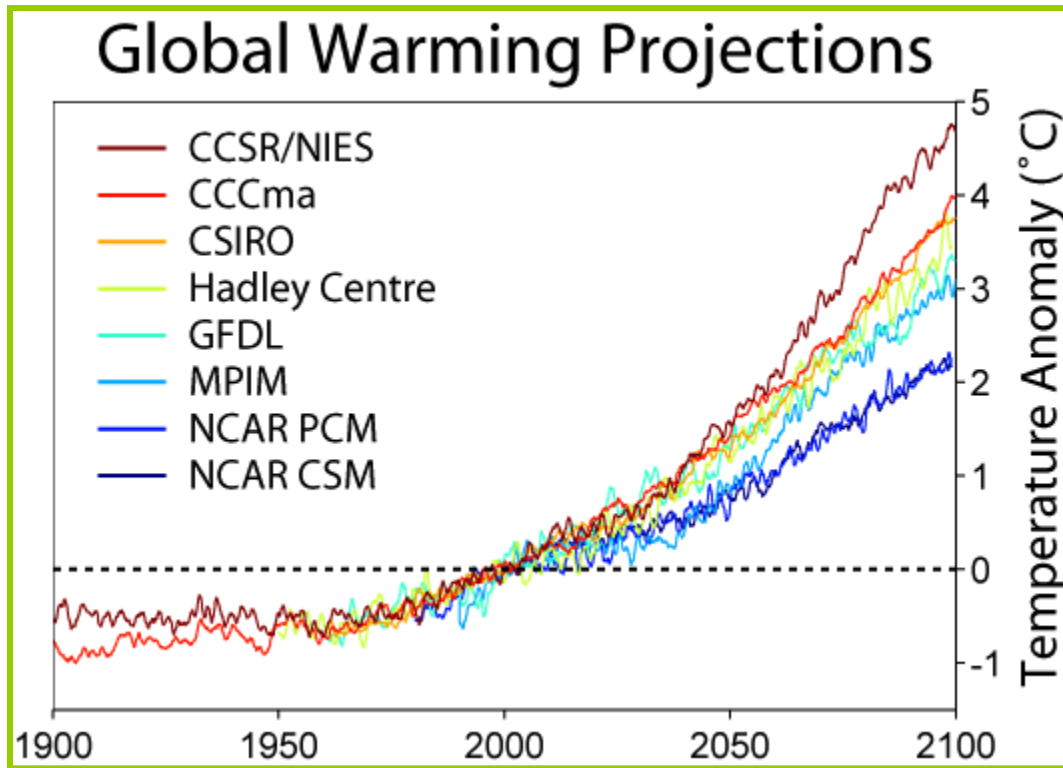
Según algunos modelos desarrollados, podríamos encontrarnos con un aumento como éste para el 2100. Algunos científicos creen que llegará más rápido, en el 2050.

La mitad de las superficies del mundo están en el trópico, entre los 30° y los -30° de latitud, y estas áreas son particularmente vulnerables al cambio climático.

Se prevé que el retraimiento de los glaciares traerá aparejado una disminución de los niveles de los ríos europeos desde el Danubio hasta el Rin, con efectos similares en otras regiones montañosas, como los Andes peruanos, las cadenas del Himalaya y Karakoram, que, como resultado, no abastecerán de agua a Afganistán, Paquistán, China, Bután, la India y Vietnam.

En el siguiente gráfico (Figura 1.2.1.1-1), se muestran las predicciones del incremento de la temperatura media global a través de diferentes modelos matemáticos partiendo del año 1900 y hasta el 2100. En la Figura 1.2.1-2 se muestra un mapa donde se comparan las temperaturas medias entre el período 1986-2005 y 2081-2100, según los modelos predictivos. En la Figura 1.2.1-3 se muestra un mapa donde se comparan las precipitaciones medias para los mismos períodos.

Figura 1.2.1-1 - Gráfico de las predicciones temperatura media global



Predicciones basadas en diferentes modelos del incremento de la temperatura media global respecto de su valor en el año [2000](#). Fuente: IPCC.

Existe un grupo de científicos promovidos por [Richard Lindzen](#)², [Fred Singer](#)³ y [Patrick Michaels](#)⁴, que sostiene una teoría antagonista respecto al origen antropogénico del cambio climático actual, afirmando que no tiene que ver con el hombre, sino con los ciclos naturales de la Tierra, en los que se alternan glaciaciones y períodos de playa. Según esta teoría, ahora se estaría produciendo la transición de un período a otro. Sin embargo, De Alba (vicepresidente del Grupo II sobre Impactos y Vulnerabilidad del IPCC) no coincide con este punto de vista. Hoy, la cantidad de dióxido de carbono o CO₂ (gas de efecto invernadero) en la atmósfera supera con creces la que hubo en los anteriores 650 mil años. Ese período contempló siete glaciaciones y en ninguno de los períodos interglaciales la concentración

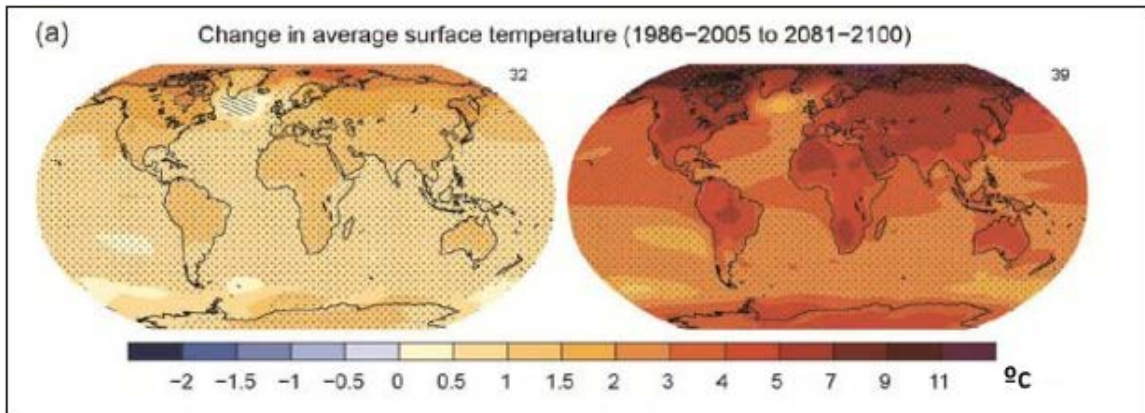
² Profesor de Meteorología en el Instituto de Tecnológico de Massachusetts..

³ Profesor Emérito de Ciencias Ambientales en la Universidad de Virginia. Se especializa en la ciencia planetaria, el calentamiento global, el agotamiento del ozono, y otras cuestiones ambientales a nivel mundial.

⁴ Profesor de Investigación de Ciencias Ambientales de la Universidad de Virginia.

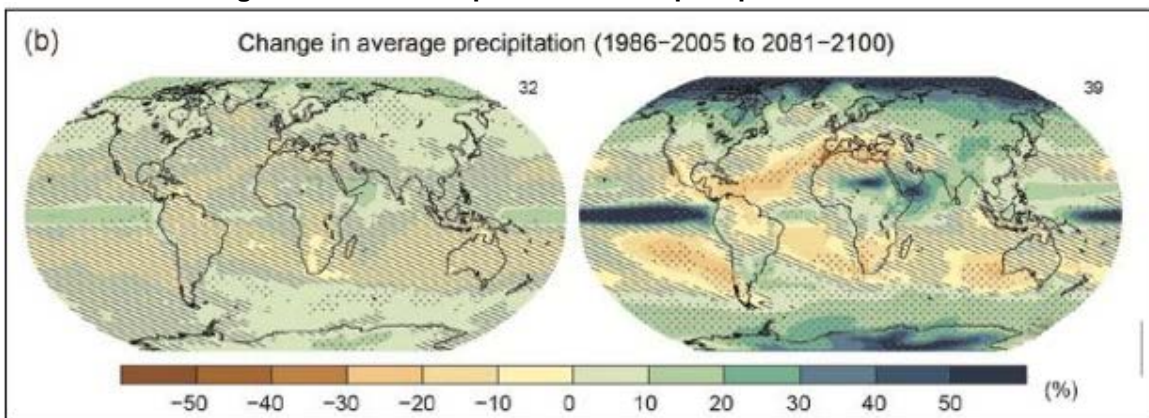
excedió las 300 partes de dióxido de carbono por millón. La atmósfera soporta en este momento 380 partes por millón.

Figura 1.2.1-2 – Comparación de las temperaturas medias



Mapa Global entre el período 1986-2005 y 2081-2100. Fuente: IPCC.

Figura 1.2.1-3 – Comparación de las precipitaciones medias



Mapa Global entre el período 1986-2005 y 2081-2100. Fuente: IPCC.

1.2.2 Consideraciones sobre los Hidratos de Metano

Los hidratos de metano (CH_4O) son sólidos cristalinos que consisten en moléculas de gas metano, cada una de las cuales está rodeada por una red cristalina de moléculas de agua, muy parecida al hielo.

Estos hidratos pueden tener dos orígenes: biogénico o termogénico. El primero, generado por degradación biológica de la materia orgánica por las bacterias metanogénicas y el segundo por generación térmica, formado por condiciones de alta presión hidrostática (50 a 100 atmósferas), bajas temperaturas del fondo marino y una adecuada concentración de gas que posteriormente se transporta como gas disuelto en el agua en el espacio poral de los sedimentos o como flujo de gas libre. El metano asciende por difusión molecular de los estratos generadores hasta alcanzar las condiciones favorables de presión y temperatura (zona de estabilidad de los hidratos), en un ambiente anóxico saturado de gas de metano y otros gases, iniciándose la formación de hidratos de gas en los espacios de poros y fracturas de los reservorios, en presencia de moléculas de agua. Estos estratos porosos son cubiertos por nuevas capas de sedimentos que contienen materia orgánica, continuándose el ciclo de generación de metano y formación de hidratos de gas.

Se estima que existen unas reservas aproximadas de metano en forma de hidratos de 13.000 Tm^3 ⁵, mientras que la capacidad existente en los yacimientos de metano convencionales se estima en 180 Tm^3 ⁶. Los hidratos naturales de metano son gases de efecto invernadero que se hallan “congelados” en el lecho marino y el permafrost⁷ de las regiones polares.

El metano en la atmósfera se ha duplicado en los últimos dos siglos⁸. Este hidrocarburo gaseoso tiene un importante rol en la sucesión de glaciaciones y dramáticos cambios climáticos que caracterizan la historia geológica del Cenozoico,

A la vez este gas es un enorme recurso energético potencial que existe en los continentes y fondo de los mares de nuestro planeta. Un solo centímetro cúbico de hidrato de metano podría desprender, al derretirse el agua que lo mantiene unido, hasta 164 cm^3 de gas

⁵ Tm^3 = Tera metros cúbicos = 10^{12} metros cúbicos.

⁶ Publicado por la Revista Panorama 2006, por A. Saniere (www.ifp.fr).

⁷ El permafrost es la capa de hielo permanentemente congelado en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías o periglaciares, como es la tundra.

⁸ Publicado en un artículo de “Geophysical Review Letters”, 2007.

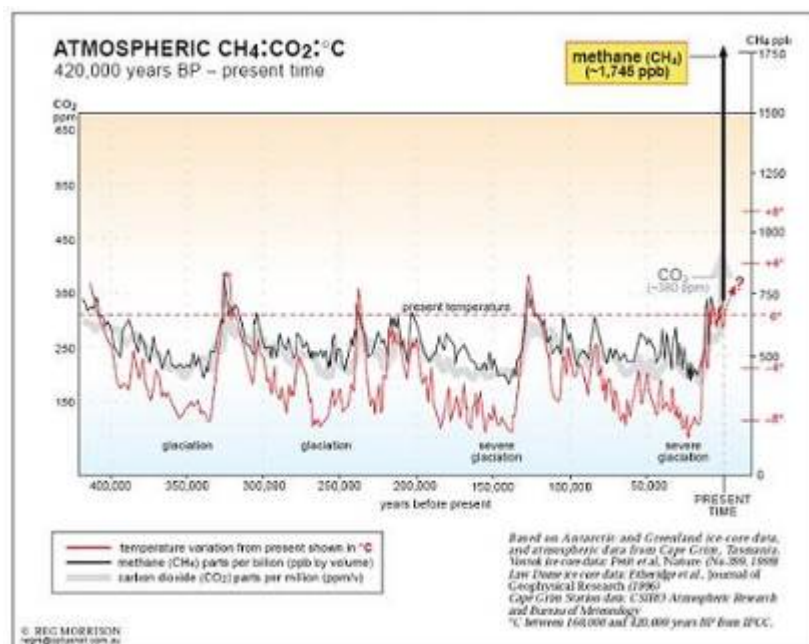
metano.⁹ La investigación sobre los hidratos de metano debe concentrarse en sitios específicos donde las características de las acumulaciones brinden la mejor posibilidad de estudiar su génesis y su rol en el ciclo del carbono, y su importancia en la retro-alimentación del efecto invernadero.

Uno de estos sitios es el extremo NW del Mar de Weddell, en el Continente Antártico, donde las evidencias indican la abundante existencia de hidratos de metano en reservorios accesibles a la observación.

El siguiente gráfico (Figura 1.2.2-1), basado en datos de núcleos de hielo de la Antártida y Groenlandia, nos muestra las variaciones de temperatura y de metano y dióxido de carbono en la atmósfera a través de las eras geológicas.

Como se puede apreciar, los aumentos de temperatura coinciden con los aumentos de metano y dióxido de carbono en la atmósfera.

Figura 1.2.22.2-1 - Gráfico de variación de temperaturas, metano y dióxido de carbono



Muestra la variación a través del tiempo. Fuente: Journal of Geophysical Research, N° 399. 1999.

⁹ Artículo de la Revista Deutsche Welle, 17.01.2007.

El siguiente mapa¹⁰ (Figura 1.2.2-2), modificado a partir de uno publicado por el U.S. Geological Survey, ilustra a nivel global, los depósitos conocidos de hidratos de metano. Uno de ellos es el ubicado al Norte de la Península Antártica, sobre el Mar de Weddell. La mayor parte de las acumulaciones de hidratos de gas se encuentran en sedimentos marinos en las márgenes continentales.

Figura 1.2.2-2 – Mapa global de la ubicación de hidratos de metano

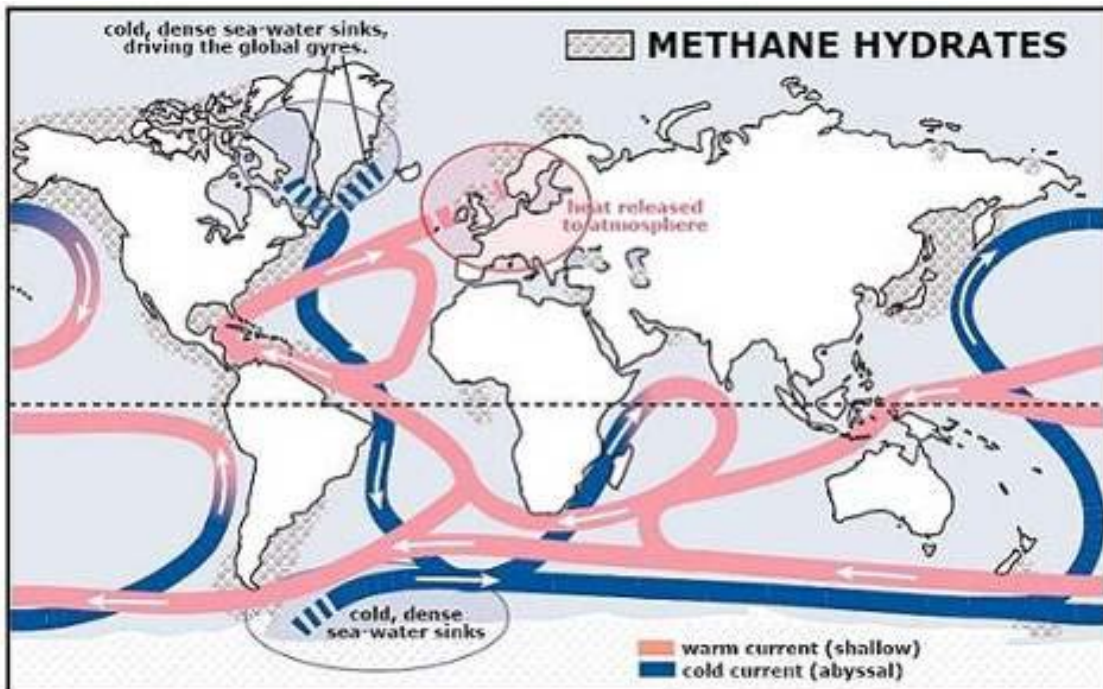


Depósitos conocidos de hidratos de metano. Fuente: Servicio Geológico de EE.UU

La siguiente figura (Figura 1.2.2-3), muestra la circulación oceánica actual y las áreas de las plataformas continentales, fuera de Antártida con potenciales depósitos de hidratos de metano. En ella se observa la probable relación entre las corrientes frías de fondo y los reservorios submarinos de hidratos que pueden contener unas 3.000 veces más metano que en la atmósfera.

¹⁰ John Toon, Investigación Noticias y Oficina de Publicaciones, Instituto de Tecnología de Georgia.

Figura 1.2.2-3 – Mapa de las corrientes marinas y plataformas continentales



Muestra los potenciales depósitos de Hidratos de Metano. Fuente: Journal of Geophysical Research, N° 399. 1999.

1.2.3 Relación entre Cambio Climático y los Hidratos de Metano

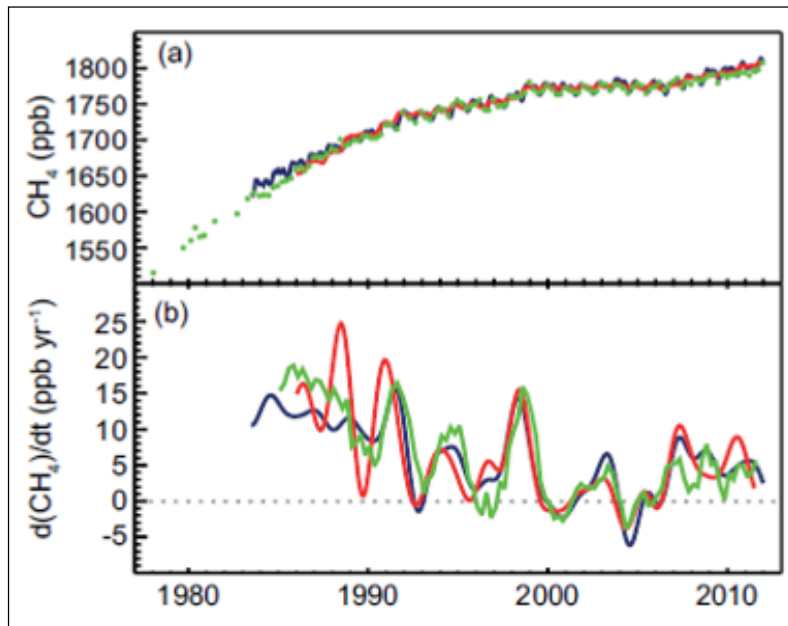
Se analizó, a modo de introducción, la génesis del cambio climático, ya sea por cuestiones naturales o antropogénicas por un lado, y la formación de los hidratos de metano, su tipo de generación y la distribución de los yacimientos en el planeta, por el otro. Ahora resta, también a modo introductorio, analizar la relación, si existe, entre el cambio climático y los escapes en forma de gas, de los hidratos de metano que yacen en las profundidades marinas y en el permafrost.

Para analizar la existencia o no de dicha relación, se remite al “Cap 2: Observaciones: la atmósfera y la superficie”¹¹ del Informe 2013 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), donde se señala que el promedio mundial de CH₄ en el año 1750 fue de 722 ± 25 ppb¹² (Etheridge *et al*, 1998; Dlugokencky *et al*, 2005), mientras que en el 2011 la media anual mundial fue 1803 ± 2 ppb. Además señala que las mediciones atmosféricas directas de CH₄ con cobertura espacial suficiente para calcular las medias anuales mundiales, comenzaron en 1978 y se publicaron en el 2011 (Figura 1.2.3 parte a). Este período se caracteriza por una tasa de crecimiento decreciente (Figura 1.2.3 parte b) en la década de 1980 hasta 1998, de estabilización de 1999 a 2006, y de un aumento de la carga atmosférica de 2000 a 2011 (Rigby *et al*, 2008; Dlugokencky *et al*, 2009). Las tasas de crecimiento se calculan como la derivada temporal de los promedios mundiales desestacionalizados (Dlugokencky *et al.*, 1994).

¹¹ Observaciones: atmósfera y la superficie. En: Cambio Climático 2013: La base científica física. Contribución del Grupo de Trabajo I del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, EE.UU.

¹² ppb: Partes por billon. Se refiere al billion estadounidense, que equivale a mil millones, o sea, 1.000.000.000, o bien 10⁹, en notación científica.

Figura 1.2.3 Gráfico del promedio de CH₄ a nivel mundial



Fracciones molares de CH₄ en aire seco a nivel mundial de la Universidad de California, Irvine - UCI (verde, cuatro valores por año, excepto antes de 1984, cuando están de baja y variación de frecuencia), AGAGE (rojo; mensual) y NOAA / ESRL / GMD (azul, casi semanalmente). (b) Tasa de crecimiento instantánea de la media mundial de CH₄ atmosférico utilizando el mismo código de color como en (a). Fuente: IPCC 2013.

El metano es oxidado por el radical oxhidrilo (OH) o hidroxilo (HO·); por esa causa sólo permanece 8 o 9 años en la atmósfera. Por lo tanto, suponiendo que no hay una tendencia a largo plazo del aumento de la concentración de radicales OH, la disminución observada en la tasa de crecimiento de CH₄ de la década de 1980 hasta 2006 indica un enfoque para el estado de equilibrio, donde el total de las emisiones globales han sido aproximadamente constante a ~550 Tg (CH₄)/año¹³. Superpuesta sobre el patrón a largo plazo es importante la variabilidad interanual; los estudios de esta variabilidad se utilizan para mejorar la comprensión del aumento mundial del CH₄. Los indicadores más probables del aumento de CH₄ atmosférico eran anormalmente, altas temperaturas en el Ártico en 2007 y una mayor precipitación media en los trópicos durante 2007 y 2008 (Dlugokencky *et al*, 2009; Bousquet, 2011). Las observaciones de la diferencia de CH₄ entre los promedios zonales para

¹³ Tg (CH₄)/año: Tera gramos de metano por año. Equivale a 10¹² gramos.

las regiones polares norte y sur (53° a 90°) (Dlugokencky *et al.*, 2009, 2011) sugieren que, hasta el momento, es poco probable que haya habido un aumento medible permanente en las emisiones de CH₄ procedentes de los humedales del Ártico y de los clatratos de CH₄ de aguas submarinas poco profundas.

El Informe Final del IPCC (PROYECTO FINAL IPCC AR5 GTII Capítulo 6 - Sistemas Oceánicos) publicado en marzo del 2014, predice que el calentamiento futuro probablemente se acelerará por la expansión de zonas hipóxicas en el fondo de los océanos, especialmente en las regiones templadas a subpolares. Además agrega que la mayoría de los modelos predicen la disminución del contenido de oxígeno del océano mundial entre el 1 y el 7% de las concentraciones de hoy en día, en el 2100 (Keeling *et al.*, 2010).

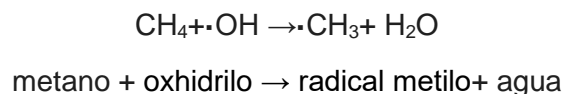
Con respecto al tema en estudio, más adelante agrega que aún no se han explorado las posibles contribuciones de los hidratos de metano desestabilizados y la oxidación bacteriana del metano para exacerbar la hipoxia y la acidificación en las altas latitudes (Westbrook *et al.*, 2009), lo cual confirma la contribución que en ese campo puede aportar el presente estudio.

Con respecto a las corrientes marinas, hace hincapié que a pesar de que las corrientes ascendentes pueden ser más resistentes al cambio climático que otros ecosistemas oceánicos debido a su capacidad para funcionar en condiciones muy variables (Capone, 2013), los cambios en las corrientes ascendentes coinciden también con un aparente aumento de la frecuencia de las erupciones submarinas de metano y sulfuro de hidrógeno gaseoso, causadas por un aumento de la formación y el hundimiento de la biomasa de fitoplancton a la hipoxia o fondo marino anóxico.

Los principales sumideros de metano son la oxidación por reacción química con el oxhidrilo troposférico (OH), con la oxidación estratosférica y absorción microbiana mediante los árboles y suelos. La fuerza y eficacia de estos sumideros determinan la vida atmosférica del metano.

El metano desaparece de la atmósfera a consecuencia, principalmente, de reaccionar con los radicales OH formando un radical metilo ($\cdot\text{CH}_3$) y agua. El $\cdot\text{CH}_3$ suele reaccionar con oxígeno molecular para dar peróxido ($\cdot\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \cdot\text{OOCH}_3$).

Así, una reducción de un 10% en las emisiones de metano global, supondría un descenso de entre 0,4 y 0,7 ppb de ozono¹⁴:



La reacción con el radical OH es el principal mecanismo de eliminación de metano de la atmósfera, el cual se forma por el bombardeo de los rayos cósmicos sobre las moléculas de vapor de agua, y es el término más importante del aumento global de CH₄. Por lo tanto, las tendencias y la variabilidad interanual en la concentración del radical OH tienen un impacto significativo en nuestra comprensión de los cambios en las emisiones de CH₄. El metilcloroformo (111-tricloroetano: CH₃CCl₃) se ha utilizado ampliamente para estimar las concentraciones medias mundiales de radicales OH (por ejemplo, Prinn *et al.*, 2005). El Informe del IPCC del año 2012, informó que no hubo una tendencia de aumento de OH desde 1979 al 2004, y no hay pruebas de esta evaluación para cambiar esta conclusión para el año 2005 a 2011. Montzka *et al.* (2011a) explora la disminución y pequeñas emisiones exponenciales en el CH₃CCl₃ para mostrar que las variaciones interanuales en la concentración de OH en el período 1998-2007 son $2,3 \pm 1,5$ %, lo que es consistente con las estimaciones basadas en CH₄, tetracloroetileno (C₂Cl₄), diclorometano (CH₂Cl₂), clorometano (CH₃Cl) y bromometano (CH₃Br)¹⁵.

Como conclusión a priori, se puede inferir que si el calentamiento futuro probablemente se acelerará por la expansión de zonas hipóxicas (Informe IPCC, 2013) por un lado; es poco probable por otro lado, que haya habido un aumento medible permanente en las emisiones de metano gaseoso a la atmósfera procedente de los clatratos acumulados en el fondo marino de aguas poco profundas debido a que no hubo una tendencia de aumento de OH desde 1979 al

¹⁴ J. Jason West y Arlene M. Fiore: "Management of Tropospheric Ozone by Reducing Methane Emissions". *Environ. Sci. Technol.*, 2005, 39 (13), pp 4685–4691. DOI: 10.1021/es048629f.

¹⁵ Observaciones: atmósfera y la superficie WG1AR5_Chapter02_FINAL 201.

2004. Si proyectamos lo mismo para el período 2005-2011, donde los cambios en las corrientes marinas ascendentes coinciden con un aparente aumento de la frecuencia de las erupciones submarinas de metano gaseoso, la incidencia ambiental sobre el cambio climático que puedan tener los escapes a la atmósfera del gas metano que se encuentra acumulado en el fondo marino, todavía no ha sido profundamente estudiado y genera una serie de opiniones antagónicas.

Al respecto este trabajo se centra en el estudio de una zona de la Antártida donde se han detectado emisiones de gas metano proveniente de los hidratos depositados en el fondo marino y su evolución en el tiempo en comparación con los cambios en las temperaturas medias sobre la superficie y el agua de mar, para analizar si existe una incidencia ambiental como consecuencia de este proceso. Todo esto se basa en la hipótesis del fusil de clatratos (en inglés clathrate gun hypothesis) que es una teoría científica del geólogo Gerry Dickens y el profesor de la Universidad de Santa Bárbara (Estados Unidos), James Kennet (quien dio nombre a la hipótesis), que sostiene que el aumento de la temperatura del mar puede dar lugar a una liberación repentina de metano desde los depósitos de clatrato situados en los fondos oceánicos. Esto provocaría una alteración del medio ambiente de los océanos y la atmósfera de la Tierra, similar a la que pudo acontecer según la teoría de extinción Permiano-Triásico¹⁶, y en el Máximo térmico del Paleoceno-Eoceno.

¹⁶ Benton, Michael J., Richard J. Twitchett (2003) Cómo matar (casi) toda la vida.: La extinción de finales del Pérmico. Tendencias en Ecología y Evolución. Volumen 18

1.3 Exposición del problema geográfico

El problema que se analiza en este trabajo, es que si por el aumento de la temperatura media superficial y del agua del mar en el área de estudio se ha provocado un crecimiento de los escapes de metano que se encuentran en forma de hidratos en los fondos marinos, estos a su vez probablemente incidan por su acumulación en las capas más altas de la atmósfera, en el efecto invernadero que provoca un aumento de la temperatura, creando un ciclo entre mar y atmósfera de paulatino calentamiento global.

La última vez que el mundo experimentó un aumento de la temperatura media de unos 5 o 6°C fue hace 55 millones de años. En ese entonces, como consecuencia de las grandes áreas de metano congelado y químicamente aprisionado, se liberaron del océano profundo en ráfagas explosivas, alrededor de 5 gigatoneladas (5.000.000.000.000 de toneladas) de carbono en forma de metano gaseoso, que se introdujeron en la atmósfera. Esto hizo que la temperatura aumentara: selvas tropicales aparecieron en las regiones polares libres de hielo, y los océanos se volvieron tan ácidos a causa del dióxido de carbono que hubo una gran reducción de la vida acuática. Los mares subieron hasta 100 m por sobre el nivel actual y el desierto se extendía desde el sur de África hasta Europa (Morrison, 1999).

El aumento de la temperatura media de la Tierra y sus efectos colaterales están desestabilizando depósitos de hidratos de metano en la Antártida, que por las observaciones realizadas por científicos de las Bases Argentinas, se han identificado escapes submarinos de este hidrocarburo gaseoso en cercanías de la Isla Marambio.

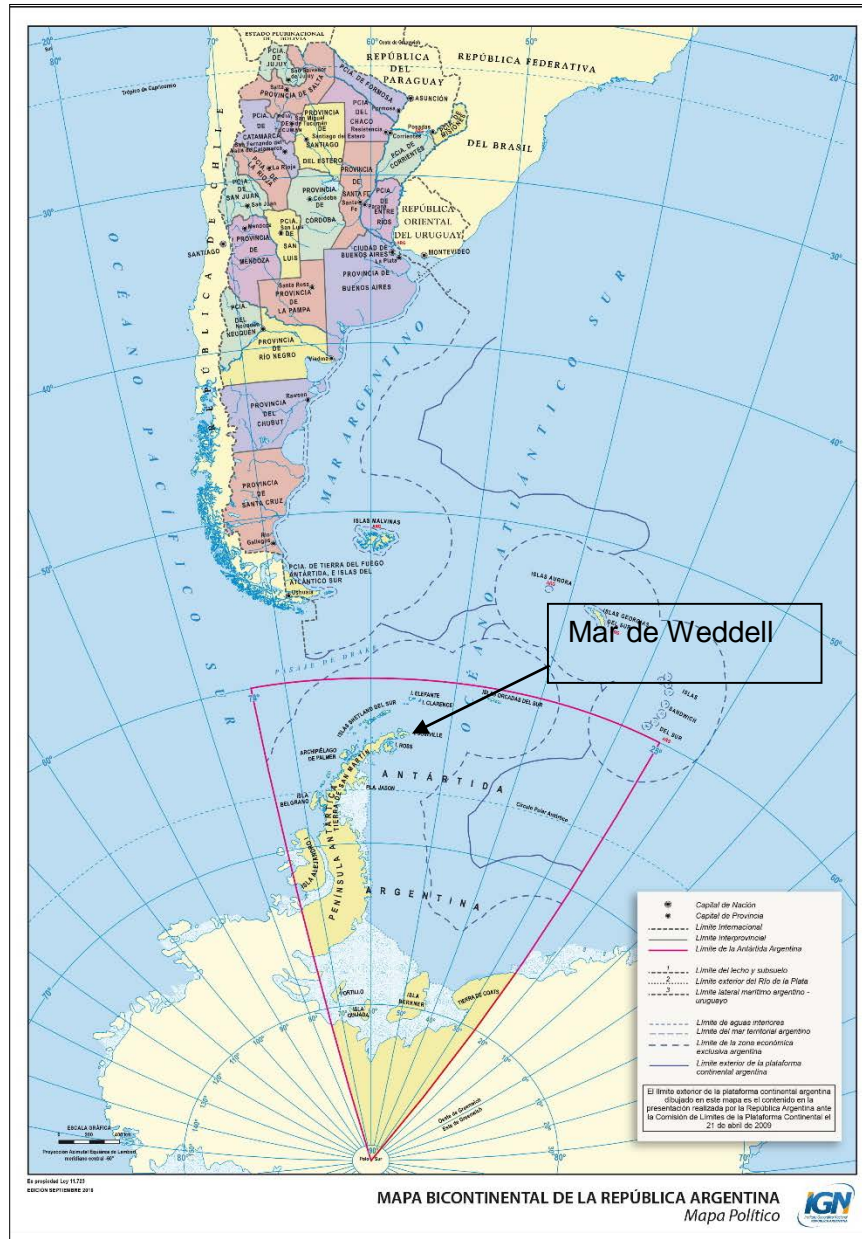
1.4 Hipótesis

Los depósitos submarinos de metano tienen una probable incidencia ambiental en las temperaturas del área de estudio.

1.5 Área de Estudio

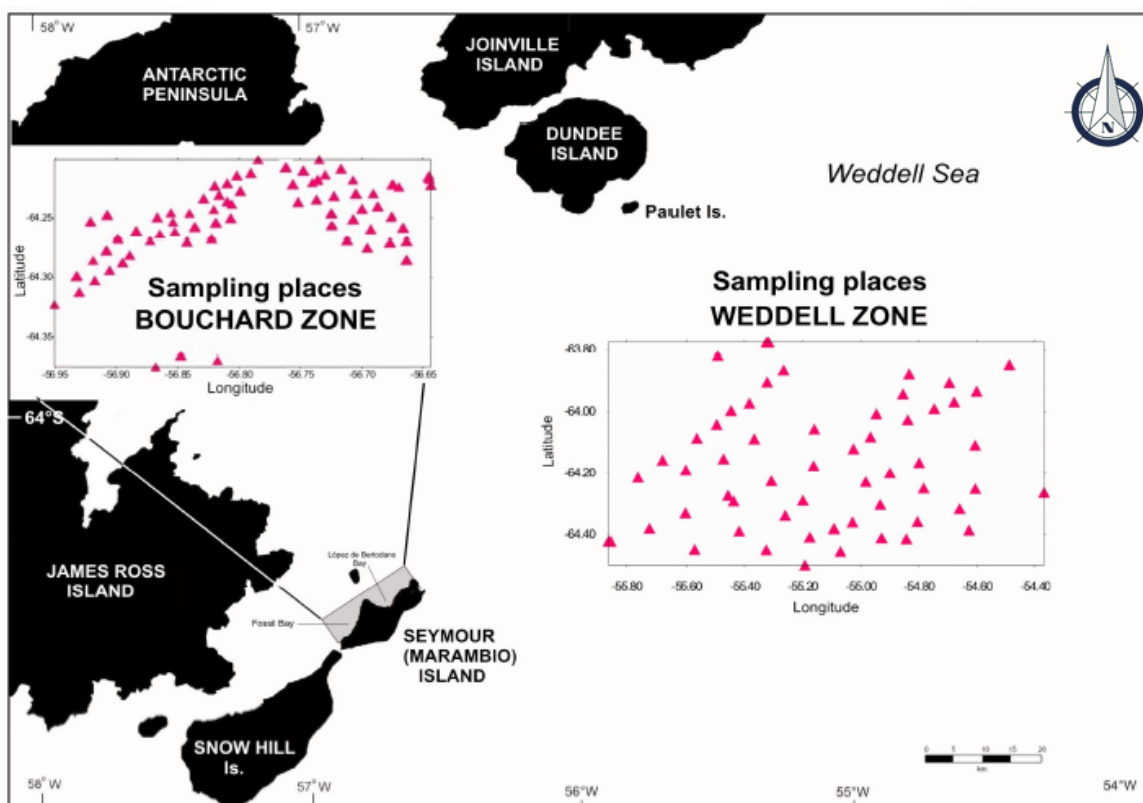
El área donde se realiza la investigación se encuentra sobre el extremo Noroeste del Mar de Weddell en la Antártida Argentina (ver Figura 1.5-1). La misma está dividida en dos zonas, Zona Bouchard y Zona Weddell (ver Figura 1.5-2), y limitada entre las Latitudes: 64°10' y 64°20' Sur, y las Longitudes: 56°45' y 57°30' Oeste.

Figura 1.5-1 Mapa bicontinental de la República Argentina



Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Figura 1.5-2 Área de estudio



Fuente: del Valle.

2. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

2.1 Resultados

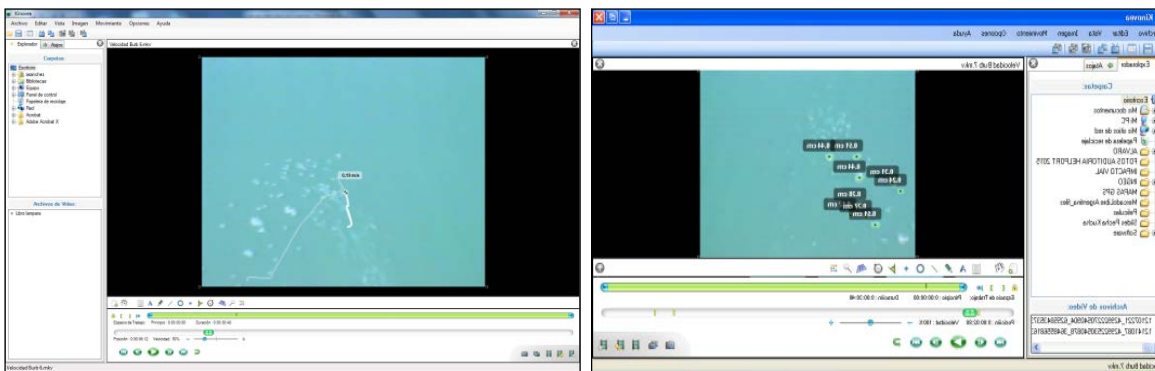
La Organización Meteorológica Mundial (WMO) define el clima como el tiempo meteorológico promedio, es decir, como “la descripción estadística en términos de la media y variabilidad de magnitudes tales como la temperatura ambiente, las precipitaciones, los vientos, etc. a lo largo de un período de tiempo” y recomienda por lo menos un período de datos de 30 años. En vista de la clara relación entre los gases de efecto invernadero y la temperatura en superficie, los estudios de cambios del clima han destacado a la temperatura como el índice primario del cambio climático. Los factores que afectan al cambio climático se pueden dividir en forzamientos y retroalimentaciones. El forzamiento es un desequilibrio energético impuesto en nuestro caso, sobre el sistema climático, ya sea por causas naturales o antropogénicas y puede ser radiativo o directo (como los gases de efecto invernadero), o no radiativo o indirecto (como el flujo de evapotranspiración). Los

forzamientos radiativos, a su vez, se pueden dividir también en directos, tales como el dióxido de carbono o el metano en partes por millón (ppm), o indirectos, como los compuestos orgánicos volátiles o radicales oxihidrilos en partes por billón (ppb). Suponiendo que existe equilibrio entre la radiación emitida y la absorbida por la superficie terrestre, en la práctica, es fácil estimar la variación de temperatura superficial relacionada con el forzamiento radiativo global mediante la ley de Stefan-Boltzmann, que mientras no es el único mecanismo, es quizás el más importante y además es un modelo lineal que permite calcular esta relación, separadamente para cada gas. Una retroalimentación del clima, en cambio, es un proceso interno que amplifica o disminuye la respuesta climática a un forzamiento inicial (como el incremento de vapor de agua y nubes, posterior al incremento de la concentración de CO₂)¹⁷. Los mecanismos de retroalimentación son en general no lineales mediante ciclos de retroalimentación positivos y negativos y no separables como la evapotranspiración y formación de nubes, con alteración del perfil de temperaturas.

La metodología, por lo tanto, para analizar el probable efecto ambiental producido por las burbujas de gas metano que emanan a la atmósfera, consiste en estimar la concentración de ese metano mediante la ecuación de balance de masas, el forzamiento radiativo producido por el metano mediante las fórmulas del Documento Técnico II del año 1997, elaborado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y su relación con la variación de temperatura mediante la ley de Stefan-Boltzmann haciendo un cálculo de la probabilidad de ocurrencia. De esta ley se obtiene el parámetro efectivo de la sensibilidad del clima, en el período disponible de datos cuantificables de emanaciones de metano (10 años). También se supuso en ese período, que lo ocurrido en los burbujeos disponibles mediante videos, es similar para toda el área, por lo tanto se extrapolaron los datos disponibles a los 88 escapes de metano relevados en la Zona Bouchard (zona de profundidad somera) por el equipo de investigadores del Instituto Antártico Argentino.

¹⁷ Jesús Santamaría Antonio, Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la Atmósfera. Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp), Vol. 104, Nº. 1, Pp 149-173, 2010.

Figura 2.1 Calculo de la velocidad de ascenso y del volumen de las burbujas de metano



Fuente: Elaboración propia con el software Kinovea.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2.1 Resultados de los Muestréos del Burbujeo de Metano en la Zona Bouchard

Parámetro Medido	Año 2002	Año 2012	Diferencia en 10 años
Velocidad media de ascenso	0,23 m/s	0,41 m/s	78%
Volumen en superficie	$3,35 \times 10^{-8} \text{ m}^3$	$9,04 \times 10^{-7} \text{ m}^3$	27 veces
Cantidad de burbujas que llegan a superficie	566 burb/min	2054 burb/min	362%
Tasa de emanación de metano a la atmósfera	0,58 Tn/año	56,7 Tn/año	97 veces
Concentración del metano emanado a la atmósfera	1746,66 ppbv	1860,54 ppbv ⁽¹⁾	6,5%
Efecto Invernadero producido por las emanaciones de metano	0,2072 w/m ²	0,2327 w/m ² ⁽²⁾	0,0254 w/m ²
Variación de temperatura por el forzamiento radiativo			0,015 K ⁽³⁾
Probable Incidencia Ambiental			3%

(1) La unidad de concentración ppbv (partes por billón de volumen son 1000 millones) es equivalente a nmol/mol.

(2) Forzamiento radiativo en vatios por metro cuadrado.

(3) Diferencia de temperatura en grados Kelvin.

2.2 Conclusiones

En este trabajo se investigó, desde el punto de vista de la geografía física, el fenómeno natural de la acumulación de metano que se produjo por la descomposición de materia orgánica en los sustratos marinos durante los periodos geológicos y su emanación a la

atmósfera; y su probable incidencia ambiental, específicamente su incidencia sobre los cambios en las temperaturas medias del aire en la zona de estudio.

Desde el año 1994 el Grupo de Ciencias de la Tierra del Instituto Antártico Argentino (IAA), viene realizando una serie de campañas en el Mar de Weddell, al Este de la Península Antártica, donde se extrajeron muestras de los sedimentos del fondo marino y de las emanaciones de metano en forma de burbujas en zonas de aguas someras y que se procesaron para este trabajo. Estos datos analizados en un laboratorio de USA (muestras de los sedimentos del fondo marino y de las emanaciones de metano) son los únicos obtenidos en esa zona. Otros autores (Camerlenghi y Lodolo, 1994; Camerlenghi *et al.*, 1994; Jin *et al.*, 2003; Busso S. *et al.*, 2013) infirieron sobre la existencia de los hidratos de metano en esa zona por métodos indirectos (estudios sísmicos y sondeos eléctricos).

Durante la investigación se analizaron en primer lugar si estaban dadas las condiciones geográficas y geológicas para la formación de hidratos de metano en el fondo marino, luego los antecedentes paleogeográficos y paleoclimáticos que avalaron ese proceso a través de los tiempos geológicos, los cambios climáticos ocurridos en las últimas décadas en el Continente Antártico y las variaciones tanto de temperatura como de salinidad en las profundidades oceánicas en el Mar de Weddell. Se recopilaron también antecedentes de investigaciones realizadas en otras partes del planeta para poder corroborar datos y procedimientos con los muestreos realizados por el IAA. También de la investigación se pudieron detectar algunas anomalías en las concentraciones de metano atmosférico en el área de estudio, se investigó el proceso físico desde que el metano emerge del lecho marino y llega a la superficie del agua y se realizó en base a los datos suministrados por IAA (con las limitaciones de los datos disponibles), una cuantificación de estos parámetros físicos (velocidad de surgencia, volumen, cantidad emanada). Por último se calculó como esas emanaciones podrían afectar el clima y su probabilidad de incidencia.

A partir de esta investigación y de la recopilación de antecedentes se pudo confirmar que:

- Las características geográficas y geológicas de la Isla Marambio y su entorno cumplen con todas las condiciones respecto a los lugares propicios para la formación de hidratos naturales de metano.

Esto coincide con los estudios realizados por Fukuda *et al*, 1992.

- Que de acuerdo con la paleoclimatología de la Antártida, se pudo determinar que una consecuencia directa del calentamiento de la temperatura del agua del fondo de 11 a 15 °C en 10⁴ años sería un cambio significativo en los gradientes térmicos de los sedimentos y la disociación del hidrato de CH₄ oceánico en lugares con profundidades de agua intermedias.

Esto coincide con el trabajo realizado por Linda C. Ivany *et al*, 2008.

- Que del análisis realizado en base a los datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional para tres bases antárticas del área de estudio, se concluye que la climatología de la Antártida ha sufrido en los últimos años variaciones fuera de la media, en lo que respecta a las temperaturas. Estas variaciones muestran tendencias positivas y negativas dependiendo de los períodos analizados y la longitud de los mismos. Y que además, en períodos largos (50 años o más) hubo un considerable aumento de la temperatura, el cual fue declinando en los últimos años con el comienzo del nuevo siglo.

Esto se corrobora con una aparente desaceleración del calentamiento de la superficie terrestre en los últimos 15 años debido a que el calor está atrapado en las profundidades del océano Atlántico y de los mares del sur, según la investigación realizada por Tung y Xianyao Chen, 2014.

- Que hubo un paulatino aumento del metano gaseoso presente en la atmósfera de la zona de estudio desde el año 1984, con un leve aumento en la tendencia en aquellas estaciones cercanas a los depósitos de hidratos de metano.
- Que como en el Continente Antártico no hay emanaciones de metano de origen antropogénico, las mismas tendrían un origen natural, probablemente proveniente del fondo oceánico debido al burbujeo de los hidratos de metano.
- Que respecto a la temperatura del mar en los primeros 55 años del Siglo XX, tanto superficiales como en profundidad en el área de estudio, el 73% en promedio estuvieron por debajo de los 0 °C. Y que entre 1958 y 1976, se notó un aumento de la temperatura en la mayoría de las boyas (93,8%) y esto se

mantuvo hasta 1991 (85,7%). Esto, pudo influir en el aumento de las emanaciones de metano que provienen de esas profundidades.

Esto coincide con las investigaciones de Xianyao Chen *et al*, que además de los patrones superficiales, como son el evento La Niña en el Pacífico Sur que influye en el Océano Antártico, la desaceleración pudo ser causada por el calor transportado a las capas más profundas del océano.

También coincide con Visbeck M. *et al*, 2008, que dice que el calentamiento y refrescamiento se debe en parte a los cambios en las propiedades de las masas de agua que conforman la Corriente Circumpolar Antártica, que son consistentes con los cambios de origen antropogénico en los flujos de calor y de agua dulce sugeridos por los modelos climáticos.

- Que durante el Siglo XX, la salinidad del mar en el área de estudio aumentó y que a partir del 2007 se produjo una disminución de la misma entre los 150 y 500 m de profundidad, como consecuencia de un mayor derretimiento de los glaciares que aumentó la cantidad de agua dulce en el mar.
- Que las emanaciones de gas metano a la atmósfera provienen de la acumulación de metano y otros gases en forma de hidratos en el sustrato marino de aguas someras en la zona de estudio.

Esto concuerda con los muestreos realizados en el área de estudio por del Valle *et al*, 2015. También con las investigaciones realizadas en el Norte del Golfo de México por I.R. Macdonald, 2001, las filtraciones de metano encontradas en las Islas Georgias del Sur por la Dra. Römer, 2013 y las filtraciones de metano encontradas en la Margen de Nueva Zelanda por A.T. Jones, 2008.

- Que respecto a la velocidad media de ascenso de las burbujas de metano desde el fondo marino hasta la superficie, hubo un aumento del 78% en 10 años, pasando de 0,23 m/s a 0,41 m/s. Respecto a la variación de la cantidad de metano emanado a la atmósfera, hubo un aumento en una proporción de 27 veces más, en un período de 10 años, y que la cantidad de toneladas de metano emanadas por año, aumentó unas 97 veces en el mismo período.

También en base a los datos disponibles se obtuvo que la probabilidad de ocurrencia de una incidencia ambiental de las emanaciones es muy baja (3%) y que no dan una certeza de ese efecto ambiental. Pero en base a la Teoría del Fusil de Clatratos de Dickens y Kennet, las emisiones atmosféricas episódicas de CH₄ resultantes de la inestabilidad de los depósitos de hidrato contribuyeron significativamente al comportamiento distintivo del cambio climático del Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM) por un lado y que por otro existen diferencias significativas entre el siglo 21, el PETM y el potencial de los hidratos, para emitir metano abruptamente. Una diferencia fundamental es la presencia de la capa de hielo polar en el siglo 21 y la falta de hielo polar en el extremo del Paleoceno. Como resultado de las temperaturas considerablemente más frías presentes en los Polos en el siglo 21 que al final del Paleoceno, hay 2,3 veces más carbono almacenado en los hidratos polares que el que existía durante el PETM (Charles et al., 2007).

La demostración de los efectos climáticos de la disociación de hidratos en el PETM, la tasa más rápida de cambio climático antropogénico en comparación con el Paleoceno, sugieren al menos un riesgo moderado de disociación de hidratos que podría tener un impacto significativo en el cambio del clima actual (MacWilliams, 2017). Además, un riesgo moderado implica que la amenaza que se dispare de nuevo el fusil de clatratos en las próximas décadas, es significativamente suficiente para que las sociedades preparen escenarios de contingencia para situaciones en las cuales el fusil de clatratos se dispare en realidad (MacWilliams, 2017).

Resumiendo: en el área de estudio se dieron las condiciones paleogeográficas y paleoclimáticas para la formación de hidratos de metano y que actualmente también se dan las condiciones geográficas y geológicas para dicha formación. En la última mitad del Siglo XX se produjo un aumento anormal de las temperaturas medias produciéndose luego en los primeros años del Siglo XXI un amesetamiento de dicho aumento que en estos últimos años (2016 – 2017) pareciera que nuevamente comenzara a aumentar.

Dicho amesetamiento fue justificado por los estudios publicados en el 2014 por Xianyao Chen *et al*, que lo aducen a que la desaceleración pudo ser causada por el calor transportado a las capas más profundas de los océanos. Se detectó además una anomalía de emanaciones de metano a la atmósfera y de los datos disponibles se pudo calcular el

aumento de las emanaciones durante 10 años. Con todos estos elementos se puede concluir:

Que se podría estar dando un “ciclo metanológico” donde el metano emanado del mar sube a las capas de la atmósfera produciendo (con la colaboración de otros factores no estudiados aquí) un aumento de la temperaturas medias que produce un calor que transportado a las capas más profundas de los océanos, se transmite de los lechos marinos más profundos a los más someros donde se encuentran los yacimientos de hidratos de metano proclives a disociarse, para luego desestabilizarlos y así cerrar el ciclo con las emanaciones a la atmósfera.

2.3 Recomendaciones

Por último, como recomendación, se deberán profundizar las investigaciones y los muestreos de manera de poder localizar todos los yacimientos de hidratos de metano del planeta y cuantificarlos para poder dar certeza a lo que las investigaciones realizadas hasta ahora ya dan por cierto. Además se recomienda asignar recursos para poder continuar con la investigación del metano atrapado en el área de la Península Antártica que viene realizando el Instituto Antártico Argentino.

3. BIBLIOGRAFIA GENERAL

3.1 Bibliografía General por orden alfabético

3.2 Bibliografía de Autores

ARCHER, D. *Methane hydrates and anthropogenic climate change*. Department of the Geophysical Sciences, University of Chicago, 2006.

ARBELO, M. *Determinación de la temperatura superficial de mar mediante la sinergia de los sensores AVHRR y TOVS: aplicación a Canarias*. Tesis Doctoral, Universidad de la Laguna, Canarias, 207 pp. 1997.

BALOWS, A; TRUPER, H.G; DWORKIN, M; HARDER, W; SCHLEIFER, K. H. *Published in four volumes. The most complete reference on the characteristics of prokaryotes. Includes procedures for the selective isolation and identification of virtually all known prokaryotes*. The Prokaryotes, 2nd ed. Springer-Verlag, New York. 1992.

BINTANJA, R. "The local surface energy balance of Ecology Glacier, King George Island". *Antarctic Science* 7: 315–325. 1995.

BO NING, C. W; DISPERT, A; VISBECK, M; RINTOUL, S. R; SCHWARZKOPF, F. U. *La respuesta de la Circumpolar Antártica Actual al cambio climático reciente*. *Nature Geoscience* Vol 1 December 2008.

BORZOTTA, E; TROMBOTTO, D. *Correlation between frozen ground thickness measured in Antarctica and permafrost thickness estimated on the basis of the heat flow obtained from magnetotelluric soundings*. Elsevier (ed.), *Cold Regions Science and Technology* 40 (2004) 81–96. 2004.

BROWN, J.W. *et al. Gene Structure, Organisation and Expression in Archaeobacteria*. *CRC Critical Reviews in Microbiology*, Vol 16, No. 4, 1989.

BUSSO, S. A; YERMOLIN, Y; MANOGRASSO CZALBOWSKI, T. *Características del permafrost costero (criopeg) con el uso de técnicas geoeléctricas, arroyo Díaz, isla Marambio, península Antártica*. *Revista Asociación Geológica Argentina*. Vol.70, No.4. 2013.

CAMERLENGHI, A; BOHEM, G; DELLA DEDOVA, B; LODOLO, E; PELLIS, G; VESNAVER, A. *Seismic reflection tomography and thermal implications of la gas hydrate simulating reflector on the South Shetland margin (Antarctic Peninsula)*. *Terra Antarctica* 1: 295-296. 1994.

- CAMERLENGHI, A; LODOLO, E. *Bottom simulating Reflector on the South Shetland Margin (Antarctic Peninsula) and Implications for the Presence of Gas Hydrates*. Terra Antarctica, 1, 154-157. 1994.
- CANAVOS, G. C. *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos*. McGraw-Hill. México. ISBN-10: 9684518560. 1998.
- CHEN, X; TUNG, K. *Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration*. Science 345, 897. 2014.
- CIARAMELLA M. *et al. Molecular biology of extremophiles*. World Journal of Microbiology and Biotechnology, Vol 11, pp 71-84, 1995.
- CIFUENTES LEMUS, J. L; TORRES GARCÍA, M; FRÍAS, M. *El Océano y sus Recursos II*. Fondo de Cultura Económica. 1997.
- COLL, C; CASSELLES, V; SOBRINO, J.A. *Desarrollo de un modelo de corrección atmosférica en el térmico. II. Aplicación a los canales 4 y 5 del NOAA*. Rev. Esp. Fís., 25: 120-132. 1991.
- DANSON *et al. Archaeobacteria, Biochemistry and Biotechnology*. London: Biochemical Society, 1992.
- DAVIES, B.J; CARRIVICK, J.L; GLASSER, N.F; HAMBREY, M.J; SMELLIE, J.L. *Variable glacier response to atmospheric warming, northern Antarctic Peninsula, 1988–2009*. The Cryosphere, 6, 1031-1048. 2012.
- del VALLE, R. A; ELLIOT, D.H. y MACDONALD, D.I.M. *Cuencas Sedimentarias en el Flanco Este de la Península Antártica: Propuesta de Nomenclatura*. 1992.
- del VALLE, R. A; VALLVERDÚ, R. A; RINALDI, C. A; LUSKY, J. C. *Escapes de gases en el estrecho Bouchard (Admiralty Sound), extremo noreste de la península Antártica*. IV Jornadas sobre Investigaciones Antárticas, C.A. Rinaldi (Ed.), Buenos Aires, Tomo II, 468-471. 1997.
- del VALLE R. A; MILLER H. *Transpresional deformation along the margin of Larsen Basin: new data from Pedersen Nunatak, Antarctic Peninsula*. Antarctic Science 13 (2), 158-166. 2001.
- del VALLE, R. A; VALLVERDÚ, R. A; MUÑOZ, C. E. J; RUBÍN, D; LUSKY, J; DAZIANO, C. *Gas Escapes on the James Ross Basin, northeaster Antarctic Peninsula, Antarctica: a possible climate global change variable*. Fourth International Conference on Gas Hydrate, Proceedings, Vol. 1, Yokohama, Japan, pp. 59-62. 2002.

del VALLE, R. A; CHIARANDINI, J; LUSKY, J. C. *Hidratos de Gas y Escapes de Metano en Adyacencias de la Isla Marambio (Seymour Island), Extremo Noroeste del Mar de Weddell, Antártida*. 2015.

del VALLE, R. A; YERMOLIN, E; CHIARANDINI, J; SANCHEZ GRANEL A; LUSKY J. C. *Metano en el NO del Mar de Weddell, Antártida*. *Journal of Geological Research*, Volume 2017, Article ID 5952916, 8 pages. 2017.

DICKENS, G. R; O'NEIL, J. R; REA, D. K; OWEN, R. M. *Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene*. *Paleoceanography*, pages 965–971, December 1995.

DICKENS, G. *On the fate of past gas: what happens to methane released from a bacterially mediated gas hydrate capacitor?*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2, 5p. 2001.

DICKENS, G. R. *Down the Rabbit Hole: Toward Appropriate Discussion of Methane Release from Gas Hydrate Systems during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum and Other past Hyperthermal Events*. *Climate of the Past* 7.3 (2011): 831-46. Web. 10 Oct. 2016.

DICKENS, G. R; QUINBY-HUNT M. S. *Methane Hydrate Stability in Seawater*. *Geophys. Res. Lett. Geophysical Research Letters* 21.19 (1994): 2115-118. Web. 3 Sept. 2016.

DILLON, W. P; PAULL, C.K. *Marine gas hydrates, II. Geophysical evidence*. In: Cox, J.L. (ed.), *Natural Gas Hydrates: Properties, Occurrences, and Recovery*. Woburn, MA (Butterworth), p. 73-90. 1983.

DLUGOKENCKY, E. "Renewed Increase in Atmospheric Methane Concentrations". <http://www.sciencemag.org/content/343/6170/493.full>.

DONLON, C; WIMMER, W; ROBINSON, I; FISHER, G; POULTER, D; CORLETT; G. *Validation of AATSR using in situ radiometers in the English channel and bay of Biscay*. *Proceedings. Second Working Meeting MAVT-2006, Frascati*, pp. 20-24. 2006.

ELLIOT, D. H. *Tectonic Setting and Evolution of the James Ross Basin, Northern Antarctic Peninsula*. In Feldmann, R.M. & Woodburne, M.O., eds. *Geology and Paleontology of Seymour Island, Antarctic Peninsula*. *Memoirs: Geological Society of America*, 169, 541–555. 1988.

ЕРМОЛИН, Е. Д; ДЕЛЬ ВАЖЕ, Р. *Гидраты метана в осадках моря Ведделл и в субаквальной криолитозоне архипелага Джеймс Росс, Антарктический полуостров*. *Криосфера Земли*. Т. XX. № 4. (в печати). Институт Антарктики

Аргентины, Национальный университет Сан Мартин, провинция Буэнос Айрес, Аргентина.

FERNANDEZ DIEZ, P. *Gases Reales II*.

FERNANDOY, F; HANNO MEYER, H; GACITUA, G; CARDENAS, C., FALK, U. *High-resolution Climate information from the northern Antarctic Peninsula as revealed by shallow firn cores and geophysical data*. XII International Symposium on Antarctic Earth Sciences (XII ISAES 2015), S18 Palaeoenvironmental Changes in Antarctica and Southern Oceans since the Last Glacial Maximum, 418-486 pp, Abstract: 510. 2015.

FUGLESTVEDT, JAN S; BERNTSEN, T. Documento de trabajo 1999: 2. Un modelo simple para estudios de escenarios de cambios en el clima global: Versión 1. Center for International Climate and Environmental Research (CICERO) – Oslo. 1999.

FUKUDA, M. *et al. Presencia de Permafrost en la Isla Seymour e Isla James Ross, Región de la Península Antártica*. Edited by Yoshida *et al*, pp. 745 -750. Terra Scientific Publishing, Tokyo, 1992.

FUKUDA, M; STRELIN J; SHIMOKAWA K; TAKAHASHI N; SONE, T; TROMBOTO, D. *Permafrost occurrence of Seymour Island and James Ross Island, Antarctic Peninsula Region*. In: Yoshida Y. (ed.) *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 631-636. 1992.

[GLASSER, N. F; SCAMBOS, T. A; BOHLANDER, J.A; TRUFFER, M; PETTIT, E. C; DAVIES, B.J. *From ice-shelf tributary to tidewater glacier: continued rapid glacier recession, acceleration and thinning of Röhss Glacier following the 1995 collapse of the Prince Gustav Ice Shelf on the Antarctic Peninsula. Journal of Glaciology, 57\(203\): 397-406.* 2011.](#)

HENRIET, J. P; MIENERT, J. (eds). *First Master Workshop on Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change*. University of Gent, Belgium. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Volume 141, 12 Nov. 1991-12 January 1992. National Science Foundation and Joint Oceanographic Institutions, Inc. 1992.

HOLT, J.G. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Volume 1, 1982. Gram-negative bacteria of medical or industrial importance. Volume 2, 1986. Gram-positive bacteria of medical or industrial importance. Volume 3, 1988. Other Gram-negative bacteria, cyanobacteria, Archaea. Volume 4, 1988. Other Gram- positive bacteria. This is the

standard authoritative guide to bacterial taxonomy and identification. This the usual place to begin a literature survey or an identification process of a specific bacterial group.

IVANY, L. C; LOHMANN, K. C; HASIUK, F; BLAKE, D. B; GLASS, A; ARONSON, R. B; MOODY, R. M. "Eocene climate record of a high southern latitude continental shelf: Seymour Island, Antarctica". GSA Bulletin; May/June 2008; v. 120; no. 5/6; p. 659–678.

JIN, Y.K; LEE, M.W; KIM, Y; NAM, S.H; KIM, K.J. Gas hydrate volume estimations on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula. Antarctic Science, Volume 15, Issue 2. 2003.

JONES, A. T; GREINERT, J; BOWDEN, D. A; KLAUCKE, I; PETERSEN, C. J; NETZEBAND, G. L; WEINREBE, W. *Acoustic and visual characterisation of methane-rich seabed seeps at Omakere Ridge on the Hikurangi Margin, New Zealand*. Marine Geology. 2009.

KAMATH, V. A; HOLDER, G. D. *Dissociation heat transfer characteristics of methane hydrates*. Volume 33, Issue 2 February 1987 Pages 347–350

KATZ, M. "The Source and Fate of Massive Carbon Input During the Late Paleocene Thermal Maximum". Science 286 (Noviembre 1999). p. 1531-1533.

KENNETT, J. P. *Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: The Clathrate Gun Hypothesis*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003. Print.

KNEIZYS, F; SHETTLE, E; ABREU, L; ANDERSON, G; CHETWYND, J; GALLERY, W; SELBY, J; CLOUGH, S. *Users guide to LOWTRAN 7*. Technical Report AFGL-TR-88-0177, Optical/Infrared Technology Division US Air Force Geophysics Laboratory, Hascom Air Force Base, Massachusetts, 137 pp. 1988.

KVENVOLDEN, K. A. *Gas hydrates as a potential energy resource - A review of their methane content, in Howell, D.G. (ed). The future of energy gases*. U.S.G.S. Professional Paper 1570, 1993.

KVENVOLDEN, K. A. *Methane Hydrates and Global Climate*. Global Biogeochemical Cycles Vol. 2, No 3, pp.221-229. 1988.

KVENVOLDEN, K. A. *A Primer on Gas Hydrates*. In D.G. Howell and associate editors, The Future of Energy Gases. U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, 279-291. 1993.

KVENVOLDEN, K. A. *Potential effects of gas hydrate on human welfare*. Proc. Nat. Acad. Sci. Vol 96 pp. 3420-3426. Colloquium Paper. 1999.

- KVENVOLDEN, K. A; CLAYPOOL, G.E. *Gas hydrates in oceanic sediments*. U.S. Geological Survey Open File Report 88-216, 50 pp. 1988.
- KVENVOLDEN, K. A; LORENSON T. D. *The Global Occurrence on Natural gas Hydrate*. In: Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection. Geophysical Monograph 124, 3-18. 2001.
- KVENVOLDEN, K. A. *A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate*. Org. Geochem. Vol. 23. No. 11112. pp. 997. Published by Elsevier Science Ltd. 1995.
- LEIFER, I; KUMAR PATRO, R. *The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study*. Continental Shelf Research · November 2002. DOI: 10.1016/S0278-4343(02)00065-1
- LLORENTE, J; PAPAVERO, N; SIMOES, M. G. *La Distribución de los Seres Vivos y la Historia de la Tierra*, 1996. Fondo De Cultura Económica, México, D.F.
- MACDONALD, D. I. M; BARKER, P. F; GARRETT, S. W; INESON, J. R; PIRRIE, D; STOREY, B. C; WHITHAM, A. C; KINGHORN, R. R. F; MARSHALL, J. E. A. *A preliminary assessment of the hydrocarbon potential of the Larsen Basin, Antarctica*. Marine Petroleum Geology 109, 203-219. 1988.
- MACDONALD, I. R; LEIFER, I; SASSEN, R; STINE, P; MITCHELL, R; GUINASSO, N. Jr. *Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere*. Geofluids 2, 95–107. 2002.
- MACDONALD, I. R., *et al.* *Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico*. J. Geophys. Res. Oceans, 120, doi:10.1002/2015JC011062. 2015.
- MACWILLIAMS, G. *Potential for Climate Induced Methane Hydrate Dissociation*. Pomona College, Claremont, California. 2017.
- MADIGAN, M.T; MARTINKO, J.M; PARKER, BROCK, J. *Biology of Microorganisms*. 8th ed. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1997.
- MARENSSI, S; SANTILLANA, S; BAUER, M. *Estratigrafía, petrografía sedimentaria y procedencia de las formaciones Sobral y Cross Valley (Paleoceno), isla Marambio (Seymour), Antártica*. Instituto Antártico Argentino, Universidad de Buenos Aires y CONICET. 1990.
- MASARIE, K.A; TANS P.P. "Extension and Integration of Atmospheric Carbon Dioxide Data into a Globally Consistent Measurement Record." Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. D6, p. 11593-11610. June 1995.

- MCCLAIN, E; PICHEL, W; WALTON, C. *Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures*. J. Geophys. Res., C6: 11587-11601. 1985.
- MCMILLIN, L.M. *Estimation of the sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption*. J. Geophys. Res., 36: 5113-5117. 1975.
- MIENERT, J; POSEWANG, J; BAUMAN, M. *Gas hydrate along the northeastern Atlantic margin: possible hydrate bound margin instabilities and possible release of methane*. In: Henriot J.P. & Mienert J. (eds) Gas Hydrates Relevance to Word Margin Stability and Climate Change. Geological Society, London. Special Publications 137 275-291. 1998.
- MONTES, M; NOZAL, F; SANTILLANA, S; MARENSSI, S. y OLIVERO, E. *Mapa geológico de la isla Marambio (Seymour), Antártida, escala 1:20.000, 1° edición*. Serie Cartográfica Geocientífica Antártica. Madrid-Instituto Geominero de España, Buenos Aires-Instituto Antártico Argentino, 2013.
- NELSON, P. H. H. *The James Ross Island Volcanic Group of northeast Graham Land*. British Antarctic Survey Scientific Reports, N°54, 62 pp. 1966.
- PARITECH, R. *Utilización de las líneas de tendencia*, 2001.
- PARRA, J. C. *Estimación de la temperatura superficial del mar desde datos satelitales NOAA-AVHRR: validación de algoritmos aplicados a la costa norte de Chile*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Recursos Naturales, Escuela de Ciencias del Mar, Valparaíso. 2010.
- PINTO, G. H. V. P; MARTINS, A. L; ROCHA, J. M. S; MARTINELLI, A. E. *Nueva Metodología para la Predicción de la Migración de Gas después de la Cementación de un Pozo de Petróleo*. BRAZILIAN JOURNAL OF PETROLEUM AND GAS | v. 6 n. 2 | p. 067-078 | 2012 | ISSN 1982-0593
- POSEWANG, J; MIENERT, J. *High-resolution investigations of gas hydrates and free gas in sediments of the continental margin of Svalvard*. (Abstract). 1996.
- RAVEN, P.H; EVERT R.F; EICHHORN S.E. *Biology of Plants*. 5th ed. Worth Publishers, New York. 1992.
- RÖMER, M; TORRES, M; KASTEN, S; KUHN, G; GRAHAM, A. G. C; MAU, S; LITTLE, C. T. S; LINSE, K; PAPE, T; GEPRÄGS, P; FISCHER, D; WINTERSTELLER, P; MARCON, Y; RETHEMEYER, J; BOHRMANN, G. *First evidence of widespread active methane seepage in the Southern Ocean, off the sub-Antarctic island of South Georgia*. Earth and Planetary Science Letters 403 (2014) 166–177

- SÁNCHEZ, J; ROJAS PARRA, F. *Métodos utilizados en la recuperación de Gas Natural en Formaciones de Hidratos en Lechos Marinos*. Tesis de Grado de ingeniería en Petróleo. Universidad Industrial de Santander, 2008.
- SANTAMARÍA, A. J. *Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la Atmósfera*. Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp), Vol. 104, Nº. 1, pp 149-173. 2010.
- SCHOIJET, M. *Límites del crecimiento y cambio climático*. México. Siglo XXI. 2008.
- SLOAN, B. J; LAWVER, L. A. *Seismic Stratigraphy of the Larsen Basin, Eastern Antarctic Peninsula*. Geology and Seismic Stratigraphy of The Antarctic Margin Antarctic Research Series, Volume 68, Pages 59-74.
- SHINE, K.P; DERWENT, R. G; WUEBBLES D. J; MORCLETTE, J. J. *Radiative forcing of climate. Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Scientific Assessment. Report 2, 39-68. 1990.
- SLOAN, E. D. *Clathrate hydrates of natural gas*. New York Marcel Dekker, pp. 641. 1990.
- SLOAN, B. J; LAWVER, L. A; ANDERSON, J. B. *Seismic stratigraphy of the Larsen Basin, eastern Antarctic Peninsula*. Antarctic Research Series, 68, 59-74. 1995.
- STANIER, R.Y; INGRAHAM, J.L; WHEELIS, M.L; PAINTER, P.R. *The Microbial World*. 5th ed. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1986.
- TURNER, J; COLWELL, S. R; MARSHALL, G. J; LACHLAN COPE, T. A; CARELTON, A. M; JONES, P. D; LAGUN, V; REID, P. A; IAGOVKINA, S: *Antarctic climate change during the last 50 years*. Int. J. Climatol., 25, 279–294, 2005.
- VAN DEN BROEKE, M. R; VAN LIPZIG, N. P. M. *Changes in Antarctic temperature, wind and precipitation in response to the Antarctic Oscillation*, Ann. Glaciol., 39, 119–126, 2004.
- VERMILLON, R. *A look at some rising bubbles*. American Journal of Physics, 43 (2), p. 177-179, 1975. <http://dx.doi.org/10.1119/1.9885>.
- WILLIAMS, R. S; HALL, D. K. *Glaciers, in Chapter on the cryo-sphere, in Gurney*. R.J., Foster, J.L., & Parkinson, C.L. (eds.), Atlas of Earth observations related to global change. Cambridge, U.K., Cambridge University Press: 401-422. 1993.
- YERMOLIN, E. D; del VALLE, R. *Methane Hydrates in sediments of Weddell Sea and subaqueous permafrost of James Ross archipelago, Antarctic Peninsula*. Earth's Cryosphere J. T. XX, Nº 4 (In press). ISSN15607496. Argentine Antarctic Institute at the National University of General San Martín, Argentina. 2016.

3.3 Bibliografía de Congresos y Simposios

VI Simposio Argentino y III Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas - Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino - 10 al 14 de Septiembre de 2007.

Boletín Informativo N° 56. El Agujero de Ozono Antártico. Servicio Meteorológico Nacional. 1989.

Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the International Commission of Stratigraphy, Status on 2009.

International Stratigraphic Chart, 2008

Grupo de Trabajo I del IPCC. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Documento Técnico II. 1997. ISBN: 92-9169-301-4

IPCC, 2007: Clim. Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Grupo de Trabajo I del IPCC. FINAL DRAFT IPCC WGII AR5 Chapter 6. Ocean Systems. 2013.

Grupo de Trabajo I del IPCC. Observaciones: atmósfera y la superficie WG1AR5_Chapter02_FINAL 2013.

3.4 Bibliografía de Páginas de Internet

Análisis de regresión lineal, Universidad Complutense de Madrid.

Global Monitoring Division. National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory, U.S. Department of Commerce.
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/index.html>.

Global Greenhouse Gas Reference Network NOAA Earth System Research Laboratory/Global Monitoring Division. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg>.

On global estimates of monthly methane flux based on observational data acquired by the Greenhouse gases Observing SATellite "IBUKI" (GOSAT). March 27, 2014.

Public Release of Concentration Data (Carbon Dioxide and Methane). Analyzed from GOSAT Observational Data. March 5, 2010.

Initial Analysis of Observation Data (Greenhouse Gas Concentrations) from "IBUKI". Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT). May 28, 2009.

Synergic Petroleum Technologies S.A.: IPS-Integrated Petroleum Solutions. Paraguay 435 P 1-4. info@ips-solutions.com.ar

BERGMAN, J. <http://www.windows2universe.org>.

<http://www.coriolis.eu.org/>

<http://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-Delivery/Data-selection>

www.nodc.noaa.gov

<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/dbsearch/sysinfo.html>

www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h34.html

tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/propiedad2.html

ÍNDICE

1.1	Introducción	1
	Objetivo General	1
	Objetivos Específicos	2
1.2	Marco Teórico	3
1.2.1	Consideraciones sobre el Cambio Climático	4
	Figura 1.2.1-1 - Gráfico de las predicciones temperatura media global.....	6
	Figura 1.2.1-2 – Comparación de las temperaturas medias	7
	Figura 1.2.1-3 – Comparación de las precipitaciones medias.....	7
1.2.2	Consideraciones sobre los Hidratos de Metano	8
	Figura 1.2.2.2-1 - Gráfico de variación de temperaturas, metano y dióxido de carbono.....	9
	Figura 1.2.2-2 – Mapa global de la ubicación de hidratos de metano.....	10
	Figura 1.2.2-3 – Mapa de las corrientes marinas y plataformas continentales.....	11

1.2.3	Relación entre Cambio Climático y los Hidratos de Metano.....	12
	Figura 1.2.3 Gráfico del promedio de CH ₄ a nivel mundial	13
1.3	Exposición del problema geográfico	17
1.4	Hipótesis.....	17
1.5	Área de Estudio	18
	Figura 1.5-1 Mapa bicontinental de la República Argentina.....	18
	Figura 1.5-2 Área de estudio	19
2.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	19
2.1	Resultados	19
	Figura 2.1 Calculo de la velocidad de ascenso y del volumen de las burbujas de metano.....	21
	Tabla 2.1 Resultados de los Muestreos del Burbujeo de Metano en la Zona Bouchard	21
2.2	Conclusiones.....	21
2.3	Recomendaciones	26
3.	BIBLIOGRAFIA GENERAL.....	27
3.1	Bibliografía General por orden alfabetico.....	27
3.2	Bibliografía de Autores.....	27
3.3	Bibliografía de Congresos y Simposios.....	35
3.4	Bibliografía de Páginas de Internet	35