



**INSTITUTO POLÍTECNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTRA**  
**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**ESIA-TICOMÁN**

**LOS ARRECIFES NATURALES Y ARTIFICIALES COMO UNA  
ALTERNATIVA AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ESPECIALIDAD EN ADMINISTRACIÓN DE LA ENERGÍA

P R E S E N T A  
LILIANA MEZA GALICIA

DIRECTOR DE TESIS: DR. DANIEL ROMO RICO

MÉXICO, DF

SEPTIEMBRE DE 2009

<b>Índice</b> -----	<b>i</b>
Resumen-----	iii
Abstract-----	v
Introducción-----	1
<b>Capítulo 1. El cambio climático como un problema global</b> -----	<b>5</b>
1.1 La relación conflictiva hombre-naturaleza.-----	5
1.2 El calentamiento global una creación del hombre-----	7
1.2.1 El efecto Invernadero-----	8
1.2.2 Efectos nocivos del cambio climático a corto y largo plazo.-----	12
1.2.3 Principales países emisores de CO2-----	14
1.3 Solución Internacional al cambio climático global: Protocolo de Kyoto-----	17
1.3.1 Primera Etapa (1972-1989): Reconocimiento del problema-----	18
1.3.2 Segunda Etapa (1990-1994): Definición del Marco-----	20
1.3.3 Tercera Etapa (1995-1997): Revisión de los Compromisos-----	21
1.3.4 Cuarta etapa: (1998-2001) Concreción de las Reglas-----	23
1.3.5 La ineficiencia de los mecanismos del Protocolo de Kyoto-----	24
<b>Capítulo 2. Los arrecifes naturales contra el cambio climático global.</b> -----	<b>28</b>
2.1 La sedimentación carbonatada en los océanos.-----	28
2.2 Definición de arrecife natural-----	30
2.3 Formación de los arrecifes de coral-----	31
2.3.1 Factores que influyen en su crecimiento-----	32
2.4 Tipos de arrecifes en el mundo.-----	32
2.5 Localización de los arrecifes naturales en el mundo y en México-----	33
2.6 Viabilidad de los arrecifes ante el cambio climático global.-----	35
2.6.1 La destrucción del arrecife natural-----	37
2.6.2 Efectos sociales de la destrucción de los arrecifes naturales-----	44
2.7 La propuesta ante la destrucción de los arrecifes naturales. -----	46
<b>Capítulo 3. El uso de arrecifes artificiales como el contraveneno al cambio climático global</b> -----	<b>48</b>
3.1 Definición de arrecife artificial-----	48
3.2. Experiencia internacional en la construcción de arrecifes artificiales-----	49

3.3. Beneficios de la Creación de Arrecifes Artificiales-----	51
3.4 Tipos de construcciones -----	53
3.5 Modelos viables para la construcción de arrecifes en el mar-----	55
3.6 Arrecifes artificiales en alta mar-----	63
3.7 Derecho de mar, un obstáculo para la construcción de arrecifes en el océano.-----	71
<b>Capítulo 4. Comparación entre los arrecifes naturales y artificiales con otros métodos para almacenar CO2.-----</b>	<b>78</b>
4.1 Métodos para la captación y almacenamiento de CO2.-----	81
4.1.1 Almacenamiento en formaciones geológicas-----	82
4.1.2 Almacenamiento oceánico-----	83
4.1.3 Carbonatación mineral y usos industriales-----	84
4.1.3.1 Carbonatación mineral-----	84
4.1.3.2 Uso Industrial-----	87
4.2 Aspectos legales -----	87
4.3 Zonas de mayor potencial-----	88
4.4. Costos de los arrecifes artificiales.-----	91
Conclusiones-----	94
Bibliografía-----	98

## **Resumen**

El cambio climático global es considerado actualmente una de las peores amenazas para todo ser vivo en el planeta tierra. El ser humano ha sido el principal causante de dicho fenómeno debido al uso indiscriminado de los recursos naturales, principalmente el uso de energía a partir de hidrocarburos, causantes de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Las consecuencias del cambio climático global son totalmente visibles en la actualidad, por ello se le esta dando a nivel internacional especial interés ya que no solo esta afectando a aquellos países que emiten más CO<sub>2</sub>, sino a todo el mundo sin respetar fronteras. De ahí parte la idea de que la solución al cambio climático global debe ser otorgada por toda la comunidad internacional, con la participación activa de cada uno de los miembros que conforman el planeta.

El protocolo de Kioto ha sido el mayor esfuerzo asumido por la mayoría de los países para dar solución al cambio climático global, sin embargo los resultados no han sido los esperados, ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> continúan en algunos países, y a pesar de que otros han logrado una disminución no ha sido suficiente para revertir el cambio climático global. El protocolo de Kioto está apunto de expirar, y los resultados evidentemente no han sido alcanzados, es por eso que la siguiente medida que se tomará para alcanzar la meta deseada es el Protocolo de Indonesia que próximamente deberá sustituir al de Kioto. Sin embargo, de no existir un verdadero compromiso por parte de las naciones, principalmente de aquellas que más CO<sub>2</sub> emiten, cualquier esfuerzo será en vano.

Es necesario que la comunidad internacional asuma un compromiso global y deje a un lado los métodos ineficientes asumidos en Kioto. Es por eso que en este trabajo se plantea una nueva opción a nivel planetario: la construcción de arrecifes naturales y artificiales para revertir el cambio climático global. La idea prácticamente consiste en preservar lo mas que se pueda los arrecifes naturales que existen en las zonas costeras de algunos países y crear en otras zonas el hábitat idóneo para la creación de arrecifes artificiales no solo en zonas costeras, sino también en la superficie oceánica lejos de las mismas, en lugares donde no puedan ser tan fácilmente alteradas por el hombre.

Esta idea parte de que los arrecifes naturales pueden capturar CO<sub>2</sub> en grandes cantidades, sin embargo actualmente al estar en peligro de extinción y al ser insuficientes frente a todas

las emisiones de CO<sub>2</sub> en el planeta, la construcción de arrecifes artificiales puede ser la solución al problema.

Actualmente, existen diversos tipos de construcciones arrecifales, sin embargo no todas logran su objetivos, que es el de generar vida y por consiguiente ser el hábitat para muchas especies; por el contrario muchas de ellas son ineficientes y terminan generando mayores problemas ambientales en los océanos y en las costas. Es por eso que en este trabajo únicamente se plantea el uso de tres tipos de construcciones arrecifales con la finalidad de obtener la mayor generación de arrecifes.

Estas construcciones son viables únicamente en las costas, sin embargo también existe la tecnología para poder crear plataformas que sostengan arrecifes artificiales en alta mar.

Para este tipo de construcciones, es importante tener en cuenta el derecho de mar, mismo que delimita la jurisdicción de los estados en los mares y océanos. Es importante destacarlo, porque se necesita abarcar grandes extensiones oceánicas para poder hacer frente al calentamiento global y mucho depende de la cooperación internacional para lograrlo.

Finalmente es importante destacar que los arrecifes artificiales representan una de las mejores opciones para capturar CO<sub>2</sub> a diferencia de otras estructuras geológicas, que también pueden hacerlo pero en menor cantidad y se necesitaría una mayor inversión económica.

## **Abstract**

Global climate change is now considered one of the greatest threats to all life on planet earth. Humans have been the main cause of this phenomenon due to the indiscriminate use of natural resources, especially energy use from oil, causing CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere.

The consequences of global climate change are fully visible at present, therefore giving you this special international interest since it is affecting not only those countries that emit more CO<sub>2</sub>, but the entire world without respect for borders. Hence the idea that part of the solution to global climate change must be granted by the entire international community, with active participation of individual members that make up the planet.

The Kyoto Protocol has been the major effort made by most countries to solve global climate change, but results were not expected, as CO<sub>2</sub> emissions continue in some countries, and although other have achieved a decrease has not been enough to reverse global climate change. The Kyoto Protocol is about to expire, and the results have clearly not been met, that's why the next step to be taken to achieve the desired goal is the protocol that Indonesia will soon replace Kyoto. However, in the absence of a genuine commitment by nations, mainly those that emit more CO<sub>2</sub>, any effort be in vain.

It is necessary that the international community to assume an overall compromise and let go of inefficient methods made at Kyoto. That's why this paper proposes a new option at the global level: the construction of natural and artificial reefs to reverse global climate change. The idea is to preserve almost as much as you can the natural reefs that exist in coastal areas of some countries in other areas and create habitat suitable for the creation of artificial reefs not only in coastal areas but also in the surface ocean away of them, in places where they can not so easily be altered by man.

This idea assumes that natural reefs can capture CO<sub>2</sub> in large quantities, but now to be in danger of extinction because of insufficient address all CO<sub>2</sub> emissions in the world, the construction of artificial reefs may be the solution to the problem,

Currently, there are various types of reef structures, but not all achieve their goals, which is to generate life and therefore to be the habitat for many species, on the contrary many of

them are inefficient and end up further environmental problems in the oceans and on the coasts. That's why in this work only considering the use of three types of reef structures in order to obtain the largest generation of reefs.

These buildings are feasible only on the coasts, but there is also a platform technology to create artificial reefs that sustain the high seas. For this type of construction, it is important to consider the law of the sea, marking the same jurisdiction of the states in the seas and oceans. Importantly, because it needs to cover large ocean to tackle global warming and much depends on international cooperation to achieve this.

Finally it is important to note that artificial reefs are one of the best options for CO<sub>2</sub> capture unlike other geological structures, which can also do it but in smaller quantities and would require greater financial investment.

## **Introducción**

El planeta tierra ha sufrido a lo largo de miles de años de su existencia diversas transformaciones; asimismo, se ha visto habitada por seres vivos de diversas especies, mismos que de una u otra forma la han ido transformando. El ser humano ha sido de las especies que han dominado en el planeta, su inteligencia excede la de cualquier otro animal sobre la tierra, pero también su capacidad destructiva no podría igualarla ninguna otra especie en millones de años. El hombre ha sido el único animal que ha puesto a su servicio todos los recursos sobre la tierra, su afán por industrializarse ha propiciado que use a diestra y siniestra todo lo que se encuentre a su alcance, sin preocuparse por el futuro que deja a las próximas generaciones.

El calentamiento del sistema climático es la mejor prueba del daño provocado por el hombre, así lo evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. En todos los continentes y en la mayoría de los océanos se evidencia los daños adversos a los sistemas naturales por cambios del clima regional, particularmente por el aumento de la temperatura. Muchas especies están en peligro de extinción debido a que no logran adaptarse a los cambios climáticos del ambiente. Eso mismo está sucediendo con el ser humano, ya que los cambios presentados en el ambiente, están provocando al mismo tiempo manifestaciones como huracanes, inundaciones y olas de calor, que traen consigo hambruna, problemas de salud entre muchos otros inconvenientes.

Hoy en día se sabe con certeza que el principal causante de todos esos cambios son las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mismas que el hombre ha generado en sus actividades cotidianas, principalmente en la quema de hidrocarburos. Estos últimos son hoy en día y por algunos años más, la base de la industrialización del hombre. Sin embargo, nuevamente el uso desmedido de estas fuentes no renovables han provocado su escasez, y por lo tanto la necesidad por buscar nuevas fuentes alternas de energía que sustituyan por completo al



petróleo y que sean lo suficientemente buenas para mantener el nivel de industrialización actual.

Es claro que el hombre se excedió en el uso irracional de los recursos, por lo que actualmente existe tanto la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía, como el deber de revertir el cambio climático global que empieza a dañarnos gravemente.

El tema empieza a ser de los prioritarios en la comunidad internacional, así lo indica el protocolo de Kioto que ha sido de las primeras manifestaciones que buscan disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Sin embargo, aún no existe una cooperación total por parte de todos los países del mundo. No es el momento de buscar culpables, sabemos de sobra que son los países industrializados los principales causantes del cambio climático global, pero al vernos afectados todos, debemos de tomar una decisión en conjunto, que beneficie a todos por igual.

La construcción de arrecifes artificiales y el mantenimiento de los naturales, pueden ser la solución al problema, al tener éstos la capacidad de capturar CO<sub>2</sub> de la atmósfera y dejarlo sepultado por cientos de años. La idea de realizar este proyecto pretende no solo preservar los arrecifes naturales, sino también construir el mayor número de ellos, no solo en los países tropicales, si es posible también en altamar, con la finalidad de capturar grandes toneladas de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Para muchos podría parecer algo utópico pero cualquier utopía puede realizarse si realmente existe voluntad por parte de los gobiernos del mundo.

Se trata de encontrar una alternativa global a un problema con las mismas magnitudes, y para ello no resulta descabellado involucrar a cientos de kilómetros cuadrados de mares tropicales utilizados en la inexorable guerra contra nuestra obra, el calentamiento global.

Esta alternativa involucra a toda la comunidad internacional, pero principalmente a los países con latitudes templadas y boreales, ya que es muy posible que la solución se encuentre bajo sus mares. El resto de los países principalmente los industrializados pueden

colaborar con el capital monetario y con la tecnología que se requiera para construir arrecifes artificiales de la mejor calidad.

Lo importante es actuar de manera inmediata, ya que algunos pensadores de nuestro tiempo, piensan que en la actual crisis ambiental, la especie mas amenazada es la nuestra, la humana. Nuestras escasas posibilidades biológicas de sobrevivir (solo un millón de años nos vio crecer) son obviamente muchísimo menor a las de especies que se adaptaron en decenas y centenares de millones de años con todo y los tremendos acontecimientos y cambios globales que se dieron en estos plazos. La especie humana no sobrevivirá cambios tan drásticos si continua utilizando desmedidamente la energía del sistema planetario.

Por lo tanto la solución que se otorga en esta investigación es la de construir tantos arrecifes coralinos artificiales como sea necesario para frenar el incremento del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico causado por la imparable quema de combustibles fósiles.

Esta investigación se encuentra dividida en 4 capítulos.

En el Capítulo 1, se explica lo que es el calentamiento global, las causas y consecuencias en el planeta tierra, así como las propuestas ineficientes que han surgido en el ámbito internacional a partir del Protocolo de Kioto, para disminuir las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, principalmente por parte de los países industrializados.

En el capítulo 2, se propone el uso de arrecifes naturales para la captura y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Para eso se explica como surgen, las especies que en el habitan y las regiones en el mundo en donde se encuentran. Pero también se hace alusión a las actividades del hombre que actualmente las están destruyendo y que por lo tanto provocan que por si solas sean insuficientes para revertir el cambio climático global

En el capítulo 3, ante la insuficiencia de arrecifes naturales, se propone también la construcción de arrecifes artificiales, mismos que deben ser de la mejor calidad para dar como resultado un arrecife que dure muchos años. Existen diversas maneras de construir

arrecifes, pero en este trabajo se abordan solamente tres tipos de arrecifes artificiales que han sido en el mundo de los más exitosos, esto con la finalidad de no perturbar nuestros mares y a las especies que en ellos habitan. También se plantea la posibilidad de construirlos en alta mar, el equipo que puede emplearse para utilizar grandes extensiones en el mundo. Y se plantean en ese mismo capítulo los inconvenientes legales que representa el derecho internacional, para la construcción de arrecifes artificiales en alta mar.

Finalmente en el capítulo 4, se expone otros tipos de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, que han sido de los más estudiados últimamente, pero que no representan la solución inmediata al problema debido a los costos, a los pocos lugares de almacenamiento disponible y a la carencia de tecnología para lograrlo. En contra parte se expone el caso de los arrecifes artificiales así como el costo aproximado que representa su construcción.

## Capítulo 1. El cambio climático como un problema global

El comportamiento obtuso de los hombres  
frente a la naturaleza condiciona  
su comportamiento obtuso entre sí.

**Karl Marx.**

### 1.1 La Relación conflictiva hombre-naturaleza.

La relación hombre-medio ambiente es, antes que nada, una relación unitaria, que implica una interacción recíproca entre ambas entidades, que aisladas de su dialéctica carecen de sentido. No existe un medio ambiente natural independiente del hombre: la naturaleza sufre siempre su acción transformadora y a su vez lo afecta y determina en un proceso dialéctico de acciones e interacciones.

En esta interacción entre el ser humano y el medio ambiente, el primero, ha hecho uso excesivo de todo lo que la naturaleza le provee, con la finalidad de obtener mayor industrialización y desarrollo económico. Los excesos que el hombre ha cometido con su entorno, ninguna especie a lo largo de toda la historia de la tierra, los ha cometido; lo anterior resulta preocupante si consideramos la corta vida del hombre frente a los 4.000 millones de años de toda la vida sobre la tierra.

Asimismo, el planeta tierra también ha alterado la vida del ser humano, a través de los sismos, erupciones volcánicas, tsunamis, entre otros fenómenos naturales, alterando sus actividades cotidianas, e incluso privándolos en muchas ocasiones de la vida. Pero, a pesar de estos fenómenos que son en muchas ocasiones impredecibles, el medio ambiente nos provee de todo para poder subsistir, mientras que el ser humano no le retribuye en nada lo que utiliza para su bienestar, al contrario lo utiliza indiscriminadamente sin pensar si quiera en lo poco o nada que deja para las futuras generaciones.

La relación de ambos es tan estrecha que ya nada en la naturaleza se mueve sin tener en algún nivel algo que ver con el hombre<sup>1</sup>. La evidente transformación de la naturaleza, demuestra la conflictiva relación que tiene con el hombre, lo cual se encuentra perfectamente ejemplificado en el cambio climático a nivel global. Las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico, fueron generadas prácticamente desde la aparición del ser humano en la Tierra; sin embargo, el problema se ha acentuado aún más debido a que la civilización actual ha basado su industria en los combustibles fósiles, asimismo, los cambios tecnológicos en los últimos años se han concentrado en el uso más intenso de los mismos y finalmente el sector energético mundial es una de las áreas con mayores consecuencias sobre el medio ambiente debido a la generación de energía mediante las llamadas “energías sucias”, tales como el petróleo, el gas, el carbón y la energía nuclear.

Hoy en día, las consecuencias de las acciones humanas son notorias y desalentadoras; tanto, que han cobrado los temas ambientales, y más aun el tema del calentamiento global, mayor importancia en foros internacionales así como en círculos académicos y políticos. Es por eso que la relación hombre-medio ambiente se plantea cada vez más como un problema mundial, que atañe por igual a todos los sistemas socioeconómicos y a todos los grupos sociales de cualquier ideología. El cambio climático se convierte en un potente recordatorio de aquello que todos compartimos por igual: el planeta tierra.

Es, asimismo, una relación cuya comprensión sobrepasa el ámbito de las ciencias particulares exigiendo un constante esfuerzo de integración interdisciplinaria. Como señala Daniel P. Moynihan, «tal vez el concepto de interdependencia ha llegado a ser el principal elemento de una nueva conciencia en la sociedad mundial».<sup>1</sup>

El cambio climático global no solo es un problema ambiental, también esta afectando la economía de las naciones, la salud de los seres vivos y esta generando fenómenos naturales que pueden terminar con la vida de cualquier especie. Ejemplos claros se han dado a lo

---

<sup>1</sup> Roger Mauvois, “El Arrecife de coral-un ecosistema planetario al tu por tu con el calentamiento global”, Seminario internacional sobre pensamiento ambiental, Manizales-Colombia, Noviembre 21 de 2007.

largo del siglo XX debido a incidentes climáticos de relevancia tales como El Niño, inundaciones y otros desastres en distintas partes del mundo. Por lo anterior es importante que se entienda la importancia del problema y los estragos que esta causando en todo el planeta, solo teniendo una visión interdisciplinaria del problema, la sociedad internacional podrá darle la solución más óptima.

## 1.2. El calentamiento global una creación del hombre

*“¿Qué rumbo tomamos ahora: el del caos o el de la comunidad?”*

Martin Luther King Jr.

Para el IPCC, el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Este significado difiere del utilizado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), que describe el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables.<sup>2</sup>

En cuanto al término de cambio climático pero a escala global, se refiere a cualquier cambio en el clima a largo plazo, ya sea por causas naturales o como resultado de la actividad humana, las cuales afectan todo el globo terráqueo. Frente a las primeras manifestaciones del cambio climático, la gran mayoría de los científicos sugieren que la Tierra se ha calentado dramáticamente en los últimos 140 años, y que en la actualidad es más cálida que en los últimos 600 años.

---

<sup>2</sup> Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Primera impresión, 2008. ISBN 92-9169-322-7. p. 30

El origen del cambio climático a causa de las acciones emprendidas por el hombre, se remonta a dos grandes transformaciones en el uso de la energía. En la primera transformación, la energía hidráulica fue reemplazada por el carbón, una fuente de energía condensada por la naturaleza a lo largo de millones de años. Fue el aprovechamiento del carbón para nuevas tecnologías lo que propulsó la revolución industrial y desató aumentos sin precedentes en la productividad. La segunda gran transformación ocurrió 150 años más tarde con la utilización del petróleo para los motores de combustión interna a comienzos del siglo XX, lo cual marcó el inicio de una revolución en el transporte. La quema de carbón y petróleo, junto con el gas natural, ha transformado a las sociedades humanas al proveerle la energía impulsora de grandes aumentos en la riqueza y la productividad. Pero también ha impulsado el cambio climático.

También existen procesos naturales que algunos científicos consideran han causado el calentamiento global como son las erupciones volcánicas, cambios en la luminosidad solar, y variaciones generadas por interacciones naturales entre partes del sistema climático (por ejemplo, océanos y atmósfera). Sin embargo, se sabe por un gran consenso científico, que el aumento en la temperatura de la superficie terrestre es causado, principalmente, por la progresiva acumulación en la atmósfera de los gases que provocan el llamado Efecto Invernadero, el cual paso de ser un fenómeno natural a un problema global.

### 1.2.1 El Efecto Invernadero

La hipótesis de que los incrementos o descensos en concentraciones de gases de efecto invernadero pueden dar lugar a una temperatura global mayor o menor fue postulada extensamente por primera vez a finales del s. XIX por Svante Arrhenius, como un intento de explicar las eras glaciales. Sin embargo, muchos científicos no lo aceptaron. Fue hasta el último cuarto de siglo que la teoría de que las emisiones de gases de efecto invernadero están contribuyendo al calentamiento de la atmósfera terrestre ha ganado muchos adeptos pero también algunos oponentes en la comunidad científica.

El IPCC, que se fundó para evaluar los riesgos de los cambios climáticos inducidos por los seres humanos, atribuye la mayor parte del calentamiento reciente a los gases de invernadero provenientes de las actividades humanas. La Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos (*National Academy of Sciences, NAC*) también respaldó esa teoría. Existe un gran consenso científico que apoya el hecho de que los gases de efecto invernadero han provocado el incremento de la temperatura en la tierra, razón por la cual en este trabajo consideraré este fenómeno como el principal causante del calentamiento global.

Es importante explicar que el efecto invernadero es un fenómeno natural, sumamente necesario para mantener la vida en el planeta, ya que los gases de efecto invernadero actúan como una frazada alrededor de la tierra, sin la cual la temperatura media sería de 18° C bajo cero, comparando esto con el valor actual de la superficie terrestre que es de 15° C; es decir ésta sería muy fría y por lo tanto inhabitable.

En el proceso del efecto invernadero el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el gas metano forman una capa natural en la atmósfera terrestre que retiene parte de la energía proveniente del Sol. La superficie de la Tierra es calentada por el Sol, pero ésta no absorbe toda la energía sino que refleja parte de ella de vuelta hacia la atmósfera.<sup>3</sup> Sin embargo, parte de la radiación infrarroja es retenida por los gases que producen el efecto invernadero, como resultado, la Tierra se mantiene lo suficientemente caliente como para hacer posible la vida sobre el planeta.

Este proceso totalmente natural se transformó en un problema debido al gran volumen de emisiones de gases desde el acontecimiento de la Revolución Industrial. Las actividades del hombre han liberado a la atmósfera principalmente 6 gases responsables del incremento de la temperatura global, siendo los principales causantes de los disturbios en los patrones del clima; su efecto en la atmósfera es medido por el índice de Poder de Calentamiento Global. Los tres gases más frecuentemente encontrados en la naturaleza son:

---

<sup>3</sup> Alrededor del 70% de la energía solar que llega a la superficie de la Tierra es devuelta al espacio.



Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>): Gas natural liberado como un producto de la combustión de combustibles fósiles, algunos procesos industriales y cambios en el manejo de usos de suelo. Tiene una vida de 500 años y contribuye en un 54% al calentamiento global. Se considera para el CO<sub>2</sub> el valor base del Poder de Calentamiento Global igual a 1.<sup>4</sup>

Metano (CH<sub>4</sub>): Gas emitido en la minería de carbón, rellenos sanitarios, ganadería y extracción de gas y petróleo. El CH<sub>4</sub> tiene Poder de Calentamiento Global igual a 21 (21 veces más potente que el CO<sub>2</sub>).

Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O): Gas emitido durante la elaboración de fertilizantes y combustión de combustibles fósiles donde el sector transporte es usualmente el contribuyente más significativo. N<sub>2</sub>O tiene un Poder de Calentamiento Global igual a 296 (296 veces más potente que el CO<sub>2</sub>).

La actividad humana no es necesaria para que estos tres gases se liberen a la atmósfera, aunque esta actividad está contribuyendo a aumentar su volumen. Además de estos Gases de Efecto Invernadero, hay tres gases más que son principalmente producto de la ingeniería química.

Hidrofluorocarbonados (HFCs). Se emiten en algunos procesos industriales y frecuentemente es usado en refrigeración y equipos de aire acondicionado. HFCs tiene un Poder de Calentamiento Global igual a 1.300 (1.300 veces más potente que el CO<sub>2</sub>).

Perfluorocarbonados (PFCs). Fueron desarrollados e introducidos como una alternativa para los gases CFCs y HCFCs que destruían la capa de ozono. Estos gases son emitidos en una variedad de procesos industriales. PFCs tiene un Poder de Calentamiento Global que va de 6.500 a 9.200.

---

<sup>4</sup> Wikipedia.com.mx

Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>). Aunque este gas es lanzado en muy pocos procesos industriales representa el más potente GEI. El GWP de SF<sub>6</sub> es igual 22.000. Es emitido durante la producción de magnesio y se aplica en algunos equipos eléctricos.

Todos estos gases son generados por el hombre en grandes cantidades, para su crecimiento económico, provocando graves consecuencias para el medio ambiente y para la sobrevivencia de la humanidad en un futuro no muy lejano. Sin embargo, de todos ellos es sin duda, el dióxido de carbono es lo que más emite el ser humano a partir de actividades como la quema de combustibles fósiles, en donde más de la mitad de todas las emisiones generadas provienen de esta actividad. Entre 1970 y 2004, sus emisiones anuales han aumentado en aproximadamente un 80%, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt), y en 2004 representaban un 77% de las emisiones totales de GEI antropógenos.<sup>5</sup>

Por otro lado, la generación de electricidad, en el año 2004, daba cuenta de aproximadamente 10 Gt de CO<sub>2</sub>, o más o menos un cuarto del total., mientras que el transporte era la segunda fuente más importante de emisiones de CO<sub>2</sub> ligadas a la energía. Ambas han aumentado sus emisiones de gases de efecto invernadero en 145% y 120%, respectivamente.

El cambio de uso del suelo también desempeña un papel importante. En este contexto, la deforestación es sin duda la fuente más grande de emisiones de CO<sub>2</sub>, pues libera el carbono captado a la atmósfera como resultado de la quema y la pérdida de biomasa. Los datos que se manejan para este sector son más inciertos que en otros, no obstante, las mejores estimaciones sugieren que se liberan anualmente alrededor de 6 Gt de CO<sub>2</sub>.

La actividad humana, como puede constatarse genera grandes concentraciones de CO<sub>2</sub>, por lo que el principal problema que debe resolver es el cambio climático global, ya que de él se desprenden graves consecuencias para toda especie viva en el planeta, incluyendo al ser humano.

---

<sup>5</sup>Cambio climático 2007. *Op cit.* p. 36

### 1.2.2 Efectos nocivos del cambio climático a corto y largo plazo.

Son muchos los efectos nocivos de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono a la atmósfera, entre ellas los científicos destacan un incremento de 0,3 a 0,6 grados centígrados de la temperatura media planetaria desde 1860. Asimismo el nivel del mar ha subido de 10 a 25 cms.

En las regiones polares ya se ha generado un calentamiento destacado, coincidiendo con las previsiones del IPCC de que en latitudes superiores la temperatura aumentará más que en los trópicos. En la Antártida, la temperatura media ha subido 0,5 grados centígrados por década desde 1947, según los científicos de la Dirección de Investigaciones Antárticas del Reino Unido. Amplias zonas de las barreras de hielo antárticas se han ido desintegrando y en muchas regiones, los glaciares están reduciéndose.

Los huracanes, inundaciones y olas de calor sin precedentes de los últimos años han suscitado la alarma al confirmar las predicciones científicas de que cualquier cambio en la media de las condiciones climáticas afectará inevitablemente a la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos como lluvias intensas y olas de calor. Por su parte, es de esperar que el calentamiento de los océanos tropicales provoque un aumento en la frecuencia y la intensidad de ciclones tropicales.

Estas manifestaciones en el planeta están alterando la vida de todas las sociedades humanas que la habitan, provocando alteraciones en sectores económicos importantes para su subsistencia. Un caso concreto es el sector agrícola, el cual ha registrado pérdidas en productividad para los cultivos básicos debido a variaciones en los patrones de sequía y precipitaciones en partes de África Subsahariana y de Asia Meridional. De continuar las emisiones de CO<sub>2</sub>, el cambio climático podría dejar a 600 millones de personas adicionales en situación de grave desnutrición hacia los años 2080, a través de su impacto en la agricultura y la seguridad alimentaria.

El cambio climático también, puede provocar mayor inseguridad de agua de la que ya se vive en la actualidad, si se llega a superar el umbral de los 2°C, ya que la distribución de los recursos hídricos cambiaría de manera sustancial. Asimismo, algunos científicos consideran que el derretimiento acelerado en los montes Himalaya causará graves problemas ecológicos en todo el norte de China, India y Pakistán que primero acrecentarán las inundaciones para luego reducir el flujo de agua hacia los principales sistemas fluviales vitales para el riego. En América Latina, el derretimiento acelerado de los glaciares tropicales amenazaría las fuentes de agua de las poblaciones urbanas, la agricultura y la producción hidroeléctrica, especialmente en la región andina. Hacia 2080, el cambio climático podría aumentar la cantidad de personas con escasez de agua en unos 1.800 millones en el mundo.

Por otro lado, los niveles del mar podrían aumentar rápidamente con la acelerada desintegración de los mantos de hielo. El aumento de la temperatura mundial en 3°C o 4°C podría desembocar en el desplazamiento permanente o transitorio de 330 millones de personas a causa de las inundaciones. Este fenómeno podría afectar a más de 70 millones de habitantes de Bangladesh, seis millones en el Bajo Egipto y 22 millones en Viet Nam, mientras que los pequeños estados insulares del Pacífico y del Caribe podrían sufrir daños catastróficos.

El cambio climático también puede generar mayores impactos para la salud de la sociedad, principalmente en países en desarrollo, debido a los altos niveles de pobreza y la poca capacidad de respuesta de los sistemas de salud pública. Actualmente es posible encontrar casos de dengue en cantidades mayores que las comunes, especialmente en América Latina y partes de Asia oriental, y el cambio climático podría ampliar aún más el alcance de esta enfermedad.

Y finalmente el cambio climático también está alterando a los ecosistemas y la biodiversidad. Alrededor de la mitad de los sistemas de arrecifes de coral del mundo han sufrido “descoloramiento” como resultado del calentamiento de los mares. La creciente acidez del océano es otra amenaza a largo plazo de los ecosistemas marinos. Con un

calentamiento de 3°C, entre 20% y 30% de las especies terrestres podrían enfrentar la extinción.

Todos estos efectos que provoca el cambio climático global los están padeciendo todos los países del mundo, sin importar si son desarrollados o en vías del desarrollo, por eso es importante una solución en conjunto y la cooperación por parte de todos los países emisores de dióxido de carbono.

### 1.2.3. Principales países emisores

Los países industrializados, con un escaso veinte por ciento de la población mundial, son responsables del 60 por ciento de las emisiones anuales de dióxido de carbono. De estos, el emisor más importante es Estados Unidos, ya que produce más del 20 por ciento. En cuanto a las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> desde 1950 a 1992 - estos gases permanecen en la atmósfera durante años- los países industrializados son responsables del 74 por ciento y Estados Unidos del 28 por ciento. Las emisiones de los países en desarrollo, aunque están aumentando rápidamente, no alcanzarán el nivel de las de los países industrializados hasta 2035, según las previsiones.<sup>6</sup>

A pesar de que son los países industriales los principales causantes del cambio climático, el resto de los países también deben participar en la formulación de soluciones óptimas para revertir el problema, dado que las consecuencias no respetan ningún tipo de frontera. A pesar de que sean los países desarrollados los principales emisores de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, también los países en vías de desarrollo los emiten, lo cual no los deslinda de responsabilidad y mucho menos los exenta de las graves consecuencias. Al ser un problema mundial, la solución debe otorgarse en el ámbito internacional, sin importar quienes emiten más y quienes menos. Lo que si deben hacer los principales países emisores es un mayor esfuerzo por reducirlas y adquirir el liderazgo en la lucha contra el cambio climático global, ya que sin ellos cualquier esfuerzo será en vano.

---

<sup>6</sup> Grupo Intergubernamental de expertos del cambio climático. "Implicaciones de las propuestas de limitación de emisiones de CO<sub>2</sub>", p, PNUMA, Estados Unidos, 2007. P. 9

El mayor inconveniente que existe frente a la lucha contra el cambio climático, es precisamente que los principales países emisores en lugar de haber disminuido sus emisiones de CO<sub>2</sub>, las han incrementado. Entre ellos se encuentra Estados Unidos, principal emisor de CO<sub>2</sub>. Cuando firmó el Protocolo de Kioto en 1997, se comprometió a reducir sus emisiones en un 6%, pero poco después se retiró y hoy en día sus emisiones de dióxido de carbono han aumentado en un 15%, con respecto a los niveles de 1990. El problema con Estados Unidos es que no se ha comprometido en el ámbito internacional a reducir sus emisiones, debido a que sus gobernantes consideran que su economía se vería seriamente afectada, ya que tendrían que detener sus actividades industriales para lograrlo. Ante la negativa estadounidense de formar parte del Protocolo de Kioto, hay quienes consideran que sin las reducciones de CO<sub>2</sub> de este país, cualquier esfuerzo internacional será inútil.<sup>7</sup>

Por otro lado, están los países que conforman la Unión Europea, quienes en conjunto son los segundos emisores de dióxido de carbono a la atmósfera. A pesar de que muchos de sus miembros se han mostrado muy participativos en las negociaciones para disminuir los gases de efecto invernadero, están muy lejos de cumplir sus objetivos. Se comprometieron a reducir en más de un 8% las emisiones de gas con efecto invernadero para 2008-2012, pero solo han logrado reducir las emisiones en un 2.9%.

Otro caso es el de China, el segundo más grande emisor de gases con efecto invernadero, sin considerar a la Unión Europea. En el caso de China por ser un país en desarrollo, todavía no se le ha exigido que reduzca sus emisiones; sin embargo, es un país cuyo crecimiento económico e industrial se ha dado de manera muy acelerada provocando asimismo grandes emisiones en comparación con otros países. Por ejemplo, un chino consume entre el 10 y 15% de la energía que consume un ciudadano estadounidense, pero con una economía que crece a toda velocidad, varios analistas esperan que para mediados de este siglo estas cifras se equiparen. Los combustibles fósiles juegan un papel muy

---

<sup>7</sup> *Ibíd.*, p. 13

importante, ya que China es el mayor productor de carbón, asimismo el consumo de petróleo se ha duplicado en los últimos 20 años.<sup>8</sup>

En el caso de Rusia las emisiones de gas bajaron un 35%, mucho más de lo que se había comprometido. Sin embargo ya está pensando vender su cupo de emisiones no usadas a los países en desarrollo que necesitan emitir más gases de lo que estipula Kioto. Japón en 1990 era responsable del 8,5% de las emisiones de gases contaminantes. En 2002 decidió ratificar el Protocolo de Kioto y se comprometió a reducir las emisiones en un 6% de los niveles tomados en 1990; sin embargo un año después de su ratificación había aumentado en un 11% las emisiones de gas que causan el efecto invernadero. Finalmente India es otro de los países en desarrollo que no están obligados a reducir sus emisiones por esa condición. Aún cuando este país sólo ha publicado sus datos en 1994, se estima que las emisiones aumentaron más de un 50% en los años 90.<sup>9</sup>

En el caso de México, las emisiones de gases de efecto invernadero continúan a la alza, ocupando el décimo cuarto lugar a nivel mundial en la emisión de los mismo debido en gran medida al uso del petróleo como principal fuente generadora de energía.

Estos países que conforman la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono, son en su mayoría industrializados, y en caso de China se trata de una economía en pleno proceso de expansión, que dependen de los hidrocarburos, principalmente del petróleo y ahora del gas para su crecimiento económico. Actualmente, ante el problema del cambio climático y la escasez en las reservas de petróleo, en algunos países se empiezan a desarrollar nuevas fuentes de energía, para poder disminuir el uso de hidrocarburos, sin embargo el daño causado por tantos años de sobreexplotación es difícil de revertir y más si consideramos que no existe ningún recurso que sustituya al petróleo para la producción de productos terminados, solo puede hacerlo en la generación de energía. El problema se agrava aun más si continúa imperando el interés por el crecimiento económico antes que el interés por solucionar el problema climático a escala planetaria.

---

<sup>8</sup> Ídem.

<sup>9</sup> *Ibíd.* P. 14

Las naciones al parecer comienzan a entender la problemática ambiental que nos aqueja actualmente y que de seguir así afectará a las futuras generaciones. Los efectos nocivos han llegado a mermar la vida de todas las personas en cualquier parte del globo terráqueo y por ello ha surgido la necesidad de formular políticas internacionales que ayuden a asumir la responsabilidad de todos los países. El mejor acuerdo, hasta el momento, asumido por la comunidad internacional es el Protocolo de Kioto, pero llegar a su formulación no fue una tarea sencilla, debido al interés de algunos países, por que siguieran siendo los hidrocarburos la base industrial de la civilización actual.

### 1.3. Solución Internacional al cambio climático global: Protocolo de Kioto

EL Protocolo de Kioto es el resultado de la cooperación internacional para evitar que siga creciendo el problema del cambio climático global. Dicho Protocolo fue aprobado en el 2001, su propósito es reducir las emisiones de dióxido de carbono causante del efecto invernadero en 5,2% para 2008-2012, por debajo de sus niveles de 1990.

Dadas las características del fenómeno climático, su tratamiento exige un esfuerzo continuo a través del tiempo, asimismo requiere de múltiples políticas y mediadas internacionales que permitan definir una respuesta global a un problema de escala planetaria. La evidencia más clara de que se trata de un reto de largo recorrido lo constituye el propio proceso de negociaciones internacionales que ha dado lugar a la adopción de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y a su Protocolo de Kioto.

El proceso de articulación del marco de cooperación internacional necesario para abordar el reto del cambio climático ha sido muy complejo. Son muchas las implicaciones ambientales, económicas y sociales del fenómeno, así como diversas las circunstancias de las distintas regiones y países para afrontar el problema lo que ha propiciado que las negociaciones internacionales sobre cambio climático hayan sido tan difíciles en el pasado, lo sean en la actualidad y sin duda lo sigan siendo en el futuro.

Las negociaciones internacionales se han dado en diferentes fases que esquemáticamente pueden agruparse de la siguiente manera: reconocimiento del problema, definición del



marco para su tratamiento, revisión de los compromisos, concreción de las reglas e inicio de la acción.

### 1.3.1 Primera Etapa (1972-1989): Reconocimiento del problema

La comunidad internacional tardó casi dos décadas para acordar la necesidad de diseñar un marco de cooperación para abordar el reto del cambio climático. Fueron años de estudios, análisis y debates, en torno a la existencia o no, de bases científicas que explicaran el fenómeno a nivel mundial y sobre todo la contribución del hombre a este problema.

El punto de partida de esta primera fase cabría situarlo en las conclusiones de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano celebrada en Estocolmo en 1972. Tomando nota de las alertas procedentes del mundo científico, la Conferencia decide recomendar a la Organización Mundial de Meteorología (OMM) que, en cooperación con el Consejo Internacional de la Ciencia (CIC) emprendiese las actividades necesarias para mejorar la comprensión de las causas naturales y artificiales de un posible cambio climático.<sup>10</sup>

También fruto de esta Conferencia será la creación, del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), que juega un papel muy destacado en la lucha frente al cambio climático. Surgió asimismo, el debate científico sobre la interferencia de la acción humana en la evolución natural del clima y si sus acciones debían ser motivo de preocupación en el futuro. Evidentemente esta discusión no estuvo exenta de influencias económicas y políticas que giraban en torno al consumo de combustibles fósiles, mismos que eran considerados los principales causantes del cambio climático.

La primer Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en Ginebra en 1979, de la cual surgió el Programa Mundial del Clima, sirvió para impulsar y encauzar las investigaciones,

---

<sup>10</sup> Teresa Gutiérrez Espinosa, “El protocolo de Kioto como instrumento internacional” Tesis de Maestría en Relaciones Internacionales UNAM- FCPYS, p. 18

sin embargo no pudo evitar que las enormes discrepancias subsistieran. En 1985, en otra Conferencia auspiciada por el PNUMA y la OMM, para evaluar el papel desempeñado por el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en las variaciones del clima, se concluyó que «como resultado del incremento de los gases de efecto invernadero, en la primera mitad del siglo XXI podría darse un incremento medio de la temperatura global mayor que cualquier otro en la historia de la humanidad». Así, lentamente fueron acumulándose indicios de los posibles efectos de las emisiones antropogénicas.

En 1987, la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, en su informe titulado «Nuestro futuro común», subrayó la necesidad de iniciar negociaciones para un tratado multilateral sobre el clima. También recomendaba investigar los orígenes y efectos del cambio climático, vigilar científicamente su evolución y establecer políticas internacionales para la reducción de las emisiones a la atmósfera de los gases de efecto invernadero.<sup>11</sup>

Un año después, en 1988 la OMM y el PNUMA decidieron crear el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, más conocido por sus siglas en inglés IPCC, como Agencia especializada de Naciones Unidas. Su existencia estaba justificada por la necesidad de disponer de una valoración científica, objetiva, equilibrada e internacionalmente coordinada, para el mejor conocimiento de la incidencia de los gases de efecto invernadero en el clima terrestre y los impactos de sus posibles alteraciones.

Los informes ofrecidos por el IPCC s constituyen la aportación más relevante del Grupo de Expertos y han tenido una influencia notoria en el proceso de negociación internacional. El primero, publicado en 1990, propició la decisión de los gobiernos de elaborar un convenio internacional, el segundo, adoptado en 1995 y publicado en 1996 facilitó la negociación del Protocolo de Kioto y el tercero, concluido en el año 2001, supuso un importante acicate para alcanzar el Acuerdo Político de Bonn y los Acuerdos de Marrakech sobre las reglas de aplicación del Protocolo.

---

<sup>11</sup> *Ibíd.*, p. 19

Con estos impulsos primordialmente científicos, el fenómeno del cambio climático, de por sí tan intangible y aparentemente lejano, fue ganando atención entre los gobiernos que comenzaron a percibirlo como un problema mucho más real y próximo. Por ello, a raíz del Primer Informe de Evaluación del IPCC, que confirmaba la existencia de bases científicas de las preocupaciones relativas al cambio climático, la Organización de las Naciones Unidas, que ya se había ocupado de esta cuestión en varias ocasiones, adoptó, en 1990, la resolución 45/212 en la que, tras reiterar su reconocimiento de que el cambio climático constituye una preocupación común de la humanidad, decide establecer un único proceso de negociaciones intergubernamentales bajo los auspicios de la Asamblea General. A tal efecto logran constituir un Comité Intergubernamental de Negociación (CIG), con el fin de preparar una convención general eficaz sobre el cambio climático.

### 1.3.2 Segunda Etapa (1990-1994): Definición del Marco

El Comité Intergubernamental de Negociación logró concretar una respuesta política internacional al cambio climático comenzó con la adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Siglas en Inglés: UNFCCC en 1992. La Convención fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992 y quedó abierta a la firma, tal y como la Asamblea había solicitado en la Cumbre de Río de 1992 donde 155 países la suscribieron. Entró en vigor el 21 de marzo de 1994 y ha sido ratificada por 189 Estados y una Organización de Integración Económica Regional, la Comunidad Europea. De esta forma se configura como uno de los tratados internacionales que ha recibido mayor apoyo.

Esta convención establece un marco para la acción cuyo objetivo es la estabilización de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, para evitar que interfiera peligrosamente con el sistema climático. La UNFCCC se basa en los siguientes principios:

- Las partes (o países que conforman la UNFCCC) deben proteger el sistema climático para el beneficio de las generaciones presentes y futuras, en base a la equidad y a la responsabilidad común pero diferenciada.

- Las necesidades específicas y circunstancias especiales de los países en desarrollo, especialmente de aquellos más vulnerables a los efectos adversos del cambio climático, debe ser tomadas en especial consideración.
- Las partes deben tomar medidas precautorias para anticipar, prevenir o minimizar las causas de cambio climático. La falta de certeza científica absoluta no será razón para posponer medida para controlar daños serios o irreversibles. Las partes tienen el derecho y el deber de promover el desarrollo sostenible.
- Las partes deben cooperar en la promoción de un sistema económico internacional que contribuya al crecimiento económico sostenible y el desarrollo de todas las partes. Las medidas para combatir el cambio climático no deben constituir un medio para la discriminación o la restricción del comercio internacional.<sup>12</sup>

En esta convención, las partes se comprometen a desarrollar, actualizar y publicar inventarios nacionales de Gases Efecto Invernadero, desarrollar programas para la mitigación del Cambio Climático mediante la reducción de emisiones y el uso de sumideros, establecer medidas para la adaptación al Cambio Climático, promover y cooperar en el desarrollo de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, que reduzcan o prevengan la emisión de estos gases, incluyendo a los sectores agrícola y forestal.

### 1.3.3 Tercera Etapa (1995-1997): Revisión de los Compromisos

Tras la adopción de la Convención en 1992, el Comité Intergubernamental volvió a reunirse en otras seis ocasiones, hasta febrero de 1995, para adelantar los trabajos previos a la celebración de la primera Conferencia de las Partes. En este período, las negociaciones cubrieron un amplio abanico de asuntos entre los que cabría mencionar los instrumentos financieros, tanto para asegurar la operatividad de los órganos de la Convención, como para ayudar a los países en desarrollo a cumplir sus obligaciones. Otras cuestiones abordadas por

---

<sup>12</sup> Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Siglas en Inglés: UNFCCC) Nueva York el 9 de mayo de 1992.

el Comité, se referían a las metodologías para medir las emisiones de las distintas fuentes y las captaciones por los sumideros.

La Conferencia de las Partes se reunió por vez primera en Berlín el 28 de marzo de 1995, entre los puntos de su agenda, además de las cuestiones institucionales y organizativas, el más importante era el relativo al cumplimiento de lo previsto en la Convención en su art. 4.2 (d) sobre la revisión de los compromisos de reducción de emisiones para determinar si eran o no adecuados. El resultado de la intensa negociación que tuvo lugar se vio plasmado en la primera decisión adoptada por la conferencia de las Partes en la que, tras concluir que los compromisos recogidos en el artículo 4.2 (a) y (b) de la Convención no eran adecuados, las Partes acordaban iniciar un proceso para emprender la acción oportuna en el período posterior al año 2000, que incluyese el reforzamiento de los compromisos contemplados en el mencionado artículo 4, mediante la adopción de un Protocolo u otro instrumento jurídico.<sup>13</sup>

En la Decisión también se especificaban los criterios que deberían guiar el proceso, sus objetivos prioritarios, sus limitaciones, las fuentes y consideraciones que deberían tenerse en cuenta, el órgano que debería llevarlo a cabo y la fecha para la conclusión de sus trabajos que se decidió fuese el año 1997, a fin de que los resultados pudiesen ser adoptados en la tercera Conferencia de las Partes.

Como objetivos prioritarios del proceso para reforzar los compromisos concernientes a países desarrollados, la Decisión fija los siguientes: elaborar políticas y medidas, así como establecer objetivos cuantificados de limitación y reducción de gases de efecto invernadero para períodos concretos tales como 2005, 2010 y 2020. Además prohíbe expresamente introducir nuevos compromisos para los países en vías de desarrollo, aunque si permite que se reafirmen estos últimos.

Conforme lo dispuesto en esta Decisión, que pasaría a ser conocida como el Mandato de Berlín, el 21 de agosto de 1995 se reunió en sesión constitutiva el denominado Grupo Especial del Mandato de Berlín. Sus trabajos se desarrollarían durante dos años y darían como resultado el Protocolo de Kioto adoptado en 1997.

---

<sup>13</sup> Teresa Gutiérrez Espinosa, Op. Cit, P. 22

#### 1.3.4 Cuarta etapa: (1998-2001) Concreción de las Reglas

Las intensas negociaciones posteriores culminaron en la CoP-3 en Kioto, Japón, en diciembre de 1997, cuando los delegados acordaron un Protocolo para la UNFCCC que compromete a los países desarrollados y a los países en transición hacia una economía de mercado a alcanzar objetivos cuantificados de reducción de emisiones. Estos países, conocidos dentro de la UNFCCC como Partes del Anexo I, se comprometieron a reducir su emisión total de seis gases de efecto invernadero hasta al menos un 5,2% por debajo de los niveles de emisión de 1990 durante el período 2008-2012 (el primer período de compromiso), con objetivos específicos que varían de país en país. El nivel de compromiso de estos países se refleja en el Anexo B del Protocolo de Kioto (PK) en forma de porcentajes respecto al año base de 1990. El Protocolo también estableció tres mecanismos para asistir a las Partes del Anexo I en el logro de sus objetivos nacionales de un modo costo-efectivo:<sup>14</sup>

- a. El comercio de emisiones entre países desarrollados, el cual consiste en la transferencia de reducciones de carbono entre países industrializados basadas en compras de derechos de emisión a países que están por debajo de sus cuotas. Las unidades de venta se denominan: Assigned Amount Units (AAU's).
- b. El Mecanismo de Implementación Conjunta, basado en la transferencia de créditos de emisiones entre países desarrollados, es un mecanismo basado en proyectos, permitiendo acreditar unidades de reducción de emisiones a favor del país inversor en proyectos de reducción de carbono. Las unidades de venta se denominan: Emission Reduction Units (ERU's).
- c. El tercer mecanismo corresponde al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Este mecanismo es el único que involucra a países en desarrollo. El MDL permite que proyectos de inversión elaborados en países en desarrollo puedan obtener beneficios económicos adicionales a través de la venta de "Certificados de Emisiones

---

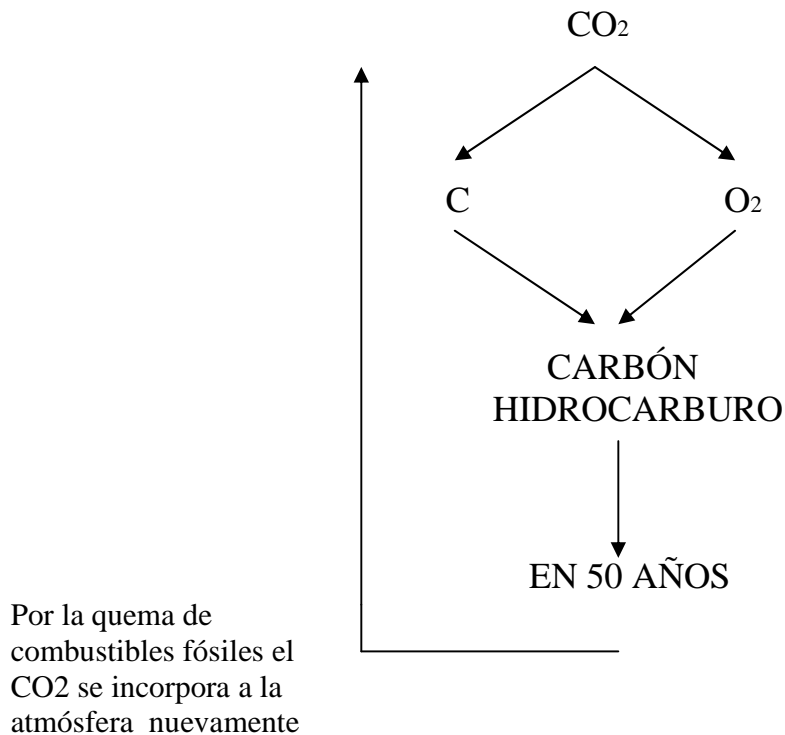
<sup>14</sup> Protocolo de Kioto, de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, Organización Nacional de las Naciones Unidas, México, 1998. P. 14

Reducidas” (CER’s), mitigando la emisión o secuestrando gases de efecto invernadero de la atmósfera. El propósito del MDL es ayudar a los países en desarrollo a lograr un desarrollo sostenible, así como ayudar a los países con metas de reducción a cumplir con sus compromisos cuantificados. El MDL a diferencia de los otros mecanismos permite contabilizar las reducciones desde el año 2000 y no estar limitado a los cinco años del primer período de compromiso, 2008 –2012.

#### 1.4. La ineficiencia de los mecanismos del Protocolo de Kioto

La poca eficiencia del Protocolo de Kioto se debe a que los países continúan emitiendo CO<sub>2</sub> a gran escala, principalmente los países industrializados y aquellos países cuyas economías se encuentran en expansión. Lo ideal sería dejar de quemar combustibles fósiles, y dejar sepultado el excedente de CO<sub>2</sub> en forma de carbón de hidrocarburos como se muestra a continuación:

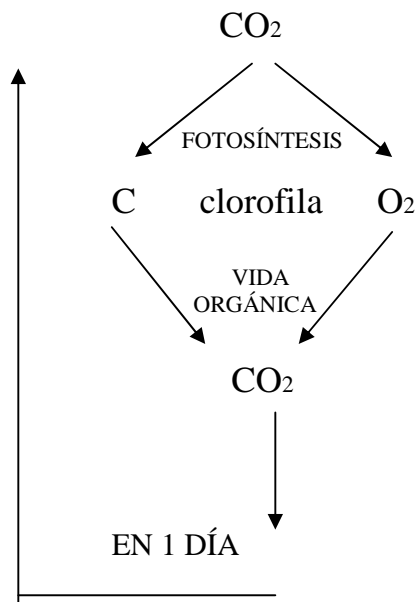
FIG. 1



Sin embargo esta opción no es viable, ya que los países continúan quemando CO<sub>2</sub> debido a que su industria sigue basada en hidrocarburos. Es decir, si de antemano se sabe que los países no podrán cumplir con sus cuotas de emisiones de gases efecto invernadero, al menos a corto plazo; entonces, ¿porqué seguir pensando en esa reducción de emisiones como la única opción?

Por otro lado el mismo protocolo de Kioto permite que los países que logren reducir los niveles de emisión de gas de efecto invernadero por debajo de lo estipulado, vendan la diferencia a aquellos países que no cumplen con los objetivos. Gracias a esta permisión, algunos países están siendo beneficiados, sobre todo aquellos que cuentan con extensiones de selvas y bosques, ya que los países pagan por que las sigan preservando. Sin embargo, nuevamente resulta ser ineficiente esa opción debido a que el carbón eliminado gracias a la fotosíntesis vuelve a ser liberado en un periodo menor a 24 horas.

FIG. 2



La compra de bonos de gases de efecto invernadero además de ser ineficiente es bastante costosa para aquellos países que los requieran. De aquí se desprende la idea de ese sistema de comercio, debido a que los países tendrán que pagar una multa por comprar las emisiones no usadas por otros países, y el costo será elevado, por lo que al final terminarán

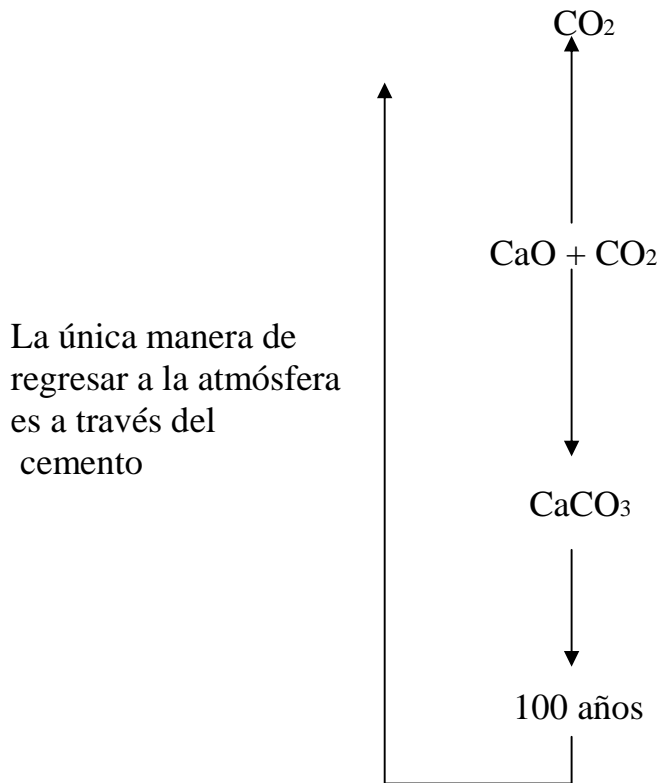


por implementar medidas ecológicas para reducir los niveles de CO<sub>2</sub> y otros gases con efecto invernadero. Sin embargo, lo anterior aún no sucede ya que para muchos países sigue siendo más rentable pagar por esos bonos que dejar de emitir CO<sub>2</sub>.

Otra alternativa es la que ofrecen algunos países a partir del desarrollo de energías limpias y renovables, ya que podrán venderlas a los países cuyas emisiones de CO<sub>2</sub> sobrepasan los límites impuestos por el protocolo; además de obtener a cambio beneficios económicos. Tal es el caso de Dinamarca que viene desarrollando energía eólica, al igual que Alemania. Japón actualmente se encuentra desarrollando tecnologías industriales eficientes y Reino Unido está tratando de abrirse paso en el campo de energías renovables y de las olas. Esta pareciera ser una mejor opción ante el problema del cambio climático global, sin embargo apenas se inicia la transición hacia estas fuentes de energía y a pesar de que ya se habla de una Revolución energética, aún parece lejana una revolución industrial que permita sustituir por completo el uso de hidrocarburos. Quizá a largo plazo sea una buena opción, pero el problema climático ya no puede esperar, debe ser resultado de manera inmediata y a nivel global si no queremos sufrir mayores consecuencias a las ya previsible en la actualidad.

Es necesario buscar nuevas alternativas tanto eficientes como viables económicamente, que nos permita disminuir los efectos provocados por el cambio climático. Es por eso que la propuesta de este trabajo consiste en hacer uso de los arrecifes tanto naturales como artificiales, debido a que es la única manera de sepultar el excedente de CO<sub>2</sub> casi de manera definitiva como se verá a continuación:

FIG. 3



El ciclo del carbono llevado a cabo a través de los arrecifes, prácticamente permite que el CO<sub>2</sub> quede sepultado de manera definitiva, la única manera de extraerlo es con la finalidad de utilizarlo en la industria del cemento, pero a pesar de ello la cantidad extraída es mínima comparada con los ciclos anteriormente señalados. Además, permitirá que los países que actualmente pagan por métodos ineficientes, reduzcan el gasto al construir y preservar arrecifes, ya que se prevé un gasto menor y una mayor eficiencia.

Los arrecifes naturales y artificiales son una opción alternativa para la comunidad internacional, con el fin de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, y revertir los efectos del calentamiento global; sin embargo no podemos dejar de lado factores que actualmente están afectando a estos ecosistemas y que pueden ser decisivos para su preservación o utilización en un futuro como sumideros de CO<sub>2</sub>.

## Capítulo 2. Los arrecifes naturales contra el cambio climático global

### 2.1 La Sedimentación Carbonatada en los Océanos.

El contenido de los carbonatos en las formaciones sedimentarias, es uno de los índices litológicos más importantes. La idea sobre la distribución de los sedimentos carbonatados contemporáneos sobre el fondo oceánico se presenta en la Tabla 1. Más del 90% de la superficie de distribución de los sedimentos arcillosos carbonatados se exponen en las zonas pelágicas de arcillas de origen planctónico, compuestos principalmente por restos de forameníferos planctónicos y de nanoplancton (principalmente los coccolitoferidos).<sup>15</sup>

Las aguas frías profundas presentan siempre una escasez de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), por esta razón la calcita biogénica empieza a disolverse en la profundidad. Por eso toma una gran importancia en la distribución de los carbonatos pelágicos. La profundidad crítica, es la profundidad a partir de la cual, la composición de carbonato de calcio en los sedimentos cae debajo de 10%.<sup>16</sup>

Tabla 1.

Superficies cubiertas por sedimentos carbonatados depositados sobre el fondo de los océanos			
Contenido de carbonato de calcio en %	Superficie en % del fondo oceánico		
	Pacífico	Atlántico	Índico
10-30	2.7	16.8	12
30-50	8.7	17.5	11
50-70	28.8*	15.4	16
70-90	-	16	25
Más de 90	-	2.4	7

\*Todo lo que es superior al 50%

<sup>15</sup> Monin, Lisitzin. Oceanología. "Geología del Océano e historia geológica del Océano", Rusia, 1980. P. 30

<sup>16</sup> Ídem.

la investigación de la posición de la superficie en profundidad crítica mostró que en los océanos Pacífico e Índico la superficie sube de los 5.5 kms en zonas ecuatoriales hasta cerca de 3 km en zonas cercanas a los polos.

Globalmente la importancia relativa en porcentaje de la superficie ocupada por esa zona de profundidad crítica superior a los 5 km en los océanos atlántico e índico es mucho mayor en el primero, esto corresponde a la diferencia en el grado de distribución de los sedimentos carbonatados y margosos. En condiciones semejantes entre más alta sea la masa absoluta de carbonato de calcio más baja se encuentra la profundidad crítica. En los mares con más masa de carbonato de calcio disuelto en el mar o en conchas, mas profunda es el límite de disolución.<sup>17</sup>

El material presentado permite explicar la distribución preferencial de carbonatos pelágicos sobre las crestas y las elevaciones del fondo oceánico, los flancos de las trincheras profundas y en las partes poco profundas de las cuencas marinas. En consecuencia las zonas donde se presentan las más altas concentraciones de carbonato de calcio superior al 90% se encuentran con mayor frecuencia en las elevaciones que situadas en zonas áridas. Al contrario las masas absolutas más altas de  $\text{CaCO}_3$  pelágicas se encuentran en las elevaciones del cinturón ecuatorial de mayor producción biológica (zonas arrecifales) e igualmente en los cinturones al norte y al sur separados del Ecuador por cinturones de sedimentación de sílice.

En las zonas húmedas de los océanos hay tasas de masa absoluta de  $\text{CaCO}_3$  que alcanzan generalmente de 4 a 7.8 gramos por  $\text{cm}^2$  en mil años. En las zonas áridas la masa absoluta equivale aproximadamente a los 63gr/ $\text{cm}^2$  en mil años y por ejemplo las masas absolutas de sedimentación biogénica de  $\text{CaCO}_3$  en la región de las Bahamas alcanzan 50 y hasta 80 gr/ $\text{cm}^2$  en mil años.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p. 310

<sup>18</sup> *Ídem.*

De tal manera, la relación de la sedimentación carbonatada en la zonalidad vertical y climática es muy clara. La zonalidad pericontinental aparece principalmente por el desarrollo de los carbonatos neríticos alrededor de los océanos o en sus límites, justo en donde se desarrollan los arrecifes de coral.

Todo lo anteriormente explicado muestra también que en todas las épocas geológicas claramente prevalece el depósito biogénico de carbonatos.

EDAD	CONTENIDO DE CARBONATOS % DEL PESO	MASA ABSOLUTA DE $\text{CaCO}_3$ gr/cm <sup>2</sup> /1000 años
Cuaternario	33%	1.14
Neógeno Superior	38%	0.96
Neógeno Inferior	41%	0.76
Paleógeno Superior	49%	0.55
Paleógeno Medio	37%	0.41
Paleógeno Inferior	17%	0.40
Cretácico	40%	0.59

Fuente: Monin, Lisitzin. *Oceanología. Geología del Océano e historia geológica del Océano*, 1980.

## 2.2. Definición de arrecife natural

Los arrecifes de coral pertenecen al Reino Animal, Filo Cnidario, Clase Anthozoa y han estado presentes en el planeta tierra, desde pocos millones de años después de que los organismos marinos desarrollaran esqueletos, formando parte de los mares primitivos. Los arrecifes coralinos son una comunidad biológica que nace en el piso marino y que consta de una estructura sólida de piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) lo bastante fuerte para soportar la fuerza de

las olas. Los organismos dominantes son corales que tienen un exoesqueleto calcificado, y las algas, muchas de las cuales están calcificadas.<sup>19</sup>

Su importancia a nivel mundial es vital, ya que los arrecifes son de los principales productores de roca caliza<sup>20</sup>. Es así una trampa de CO<sub>2</sub> como ninguna, lo que hace del fondo del mar con condiciones de sedimentación carbonatada el mejor sumidero de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la historia del planeta.

### 2.3 Formación de los Arrecifes de Coral

Estas grandes formaciones de piedra caliza son depositadas por organismos vivos durante miles de años. Los organismos vivos están confinados a la capa superior del arrecife, donde añaden carbonato de calcio sobre los esqueletos muertos depositado por sus predecesores. Éstos forman el exoesqueleto de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), para proteger la colonia compuesta de miles de pólipos.

Los pólipos se encuentran dentro de pequeñas copas de CaCO<sub>3</sub> que ellos mismo han construido. Muchas de estas copas cementadas forman la colonia. Algunas colonias son de formas ramificadas mientras que otras tienen formas masivas que alcanzan gran tamaño. Cuando cientos de colonias de pólipos crecen una al lado de la otra se forma un arrecife.

Los pólipos van a vivir en simbiosis con unas algas unicelulares llamadas zooxantelas, quienes se encargan de llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis.

El coral le provee a la zooxantela un ambiente seguro y nutrientes tales como dióxido de carbono, fósforo y nitrógeno, componentes de desecho de la respiración celular del coral. A cambio sus hospedadores reciben productos fotosintéticos como oxígeno y moléculas orgánicas provenientes de la fijación de dióxido de carbono y aumentan su capacidad para depositar carbonato de calcio.

---

<sup>19</sup> Secretaría de Marina. Dirección General Adjunta de Oceanografía y Dirección de Protección al Medio Ambiente Marino. "Arrecifes Artificiales". [http://www.semarmar.gob.mx/digadoc/pro\\_act\\_arre.htm](http://www.semarmar.gob.mx/digadoc/pro_act_arre.htm)

<sup>20</sup> La caliza es en esencia carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub> = CaO + CO<sub>2</sub>)

### 2.3.1 Factores que influyen en su crecimiento.

Los cuatro factores importantes que afectan el desarrollo del arrecife son la temperatura, luz, salinidad e inmersión. La distribución de los arrecifes se da en aguas cálidas, predominando entonces, en los mares tropicales. Los límites para el crecimiento normal de corales de arrecife está entre 17 y 34° C, pero los arrecifes bien desarrollados se establecen entre 21 a 22°C grados.<sup>21</sup>

La luz es también un factor determinante para el buen desarrollo de los arrecifes debido a la simbiosis del coral con las algas, las cuales ayudan al proceso de calcificación del coral. Por esta razón, el crecimiento del coral es más rápido a profundidades menores a los 35 m. La salinidad es otro factor que afecta el crecimiento arrecifal. Se cree que los corales hermatípicos requieren de la salinidad del mar abierto y toleran salinidad de 30 a 38 partes por mil. Las salinidades muy altas pueden limitar el crecimiento del coral.

Otro factor que afecta los corales es la turbidez y la sedimentación, que pueden inhibir el crecimiento de estos organismos. La turbidez del agua produce una disminución en la penetración de la luz, lo cual afecta la fotosíntesis hecha por las algas y esto a su vez incide en la tasa de calcificación del coral. La sedimentación de las partículas en el agua taponan los corales impidiendo la salida de los pólipos para atrapar el alimento.

El coral tiene larga vida, a excepción de mortalidad por depredación o catástrofes físicas. La mayoría de las colonias persisten sin evidencia de envejecimiento, así por ejemplo existen colonias grandes y masivas que alcanzan de 3 a 4 metros y tienen, en promedio, entre 300 y 400 años de edad.

### 2.4 Tipos de arrecifes en el mundo.

Existen tres tipos de arrecifes: arrecifes marginales, arrecifes de barrera y atolones. El arrecife marginal crece fuera de una masa terrestre, pero está todavía unida a ella. Un ejemplo es el arrecife marginal de los cayos de Florida. En el caso del arrecife de barrera, éste se encuentra separado de la masa terrestre por una laguna. Los dos mejores ejemplos

---

<sup>21</sup> Clinton J. Dawes. "Botánica Marina". Editorial Limusa, México, 1986. Pp. 477-478.

de este tipo de arrecife son el Great Barrier Ref. de Australia y el arrecife de barrera de Belice, Centroamérica. Un atolón es un arrecife de forma circular a oval en torno a una laguna central; no está asociado a alguna masa terrestre visible. Las islas pequeñas que pueden formarse sobre este tipo de arrecifes suelen localizarse del lado de barlovento (mar adentro).<sup>22</sup>

La característica más sobresaliente de los atolones es su tamaño. Ejemplos claros, son las lagunas de los atolones Eniwetok y Kwajalein, los cuales tienen de 16 a 60 Km de diámetro y poseen varias islas marginales pequeñas. El atolón de Eniwetok consta de casi 40 islas, la mayoría localizadas del lado del barlovento. Otro ejemplo es la laguna del atolón de Glover, que se encuentra localizada en el Caribe y la cual tiene casi 12 Km de largo y 9 Km de ancho, además de poseer cuatro islas pequeñas del lado del sudeste.<sup>23</sup>

## 2.5 Localización de los arrecifes naturales en el Mundo y en México.

Los arrecifes de coral se encuentran en los océanos, generalmente entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio, debido a que los corales constructores de arrecifes viven en estas aguas. Estos corales se encuentran principalmente en la zona fótica (menos de 50 metros de profundidad), donde la luz solar alcanza el suelo y ofrece a los corales suficiente. Asimismo, siempre se ubican al oriente de los continentes de tal manera que los más grandes complejos arrecifales están en el Océano Índico, en el lado oriental de Australia, en el Mar Caribe, en el Mar Rojo.

El sistema arrecifal más grande del mundo es la Gran Barrera Arrecifal Australiana que tiene una longitud de 2,500 km y casi 100 km de ancho. El segundo lugar lo ocupa el gran arrecife del Caribe Mesoamericano, el cual se desarrolla a lo largo de las costas de México, Belice, Guatemala y Honduras, con una extensión aproximada de 1,000 km.<sup>24</sup>

En aguas territoriales mexicanas, los arrecifes que se extienden desde el sur del Caribe Mexicano, llegan de manera discontinua a Yucatán, Campeche y Veracruz, se unen al

---

<sup>22</sup> *Ibíd.* p. 479.

<sup>23</sup> *Ibíd.* P. 480.

<sup>24</sup> Secretaría de Marina. Op. Cit.



Sistema Arrecifal de Belice y a su vez forman parte del Sistema Arrecifal del Caribe Occidental. En el Estado de Veracruz, frente a los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado, se encuentra el Parque Nacional denominado Sistema Arrecifal Veracruzano, con una extensión total aproximada de 52,238 hectáreas y cuenta con 1.5 millas en su parte más ancha.

La siguiente tabla, muestra todos los arrecifes en la República Mexicana, así como su localización por Estado.

Arrecifes del Norte, Centro y Sur del Caribe Mexicano	Desde Isla Contoy al Norte del Estado de Quintana Roo hasta la Frontera con Belice.
Arrecifes Profundos de Cozumel.	Suroeste de la Isla de Cozumel, Q. Roo.
Banco Chinchorro.	Sur del Estado de Quintana Roo Frente a Majahual.
Arrecife Alacranes	Norte de la Plataforma del Estado de Yucatán.
Arrecifes del Banco de Campeche.	Plataforma del Estado de Campeche y algunas porciones de Yucatán
Sistema Arrecifal Veracruzano	Frente al Pto. de Veracruz y Punta de Antón Lizardo, Ver.
Isla Lobos.	Tuxpan, Ver.
Cabo Pulmo.	Entre La Paz y San José del Cabo, B.C.S.
Huatulco	Bahías de Huatulco del Estado de Oaxaca

Fuente: Secretaría de Marina. Dirección General Adjunta de Oceanografía y Dirección de Protección al Medio Ambiente Marino. “Arrecifes Artificiales”.  
[http://www.semar.gob.mx/digadoc/pro\\_act\\_arre.htm](http://www.semar.gob.mx/digadoc/pro_act_arre.htm)

Se estima que la superficie que ocupan los arrecifes de coral, es en todo el mundo de 284.300 kilómetros cuadrados, equivalente a la mitad del tamaño de Francia o a las islas británicas e Irlanda, es decir conforman menos del 0,1 por ciento de los océanos.

Indonesia, Australia y Filipinas son, las naciones con mayores arrecifes, seguidas por Francia, que ocupa el cuarto puesto con sus 14.280 kilómetros cuadrados de arrecifes de coral en sus territorios de ultramar. Gran Bretaña es la 12ª nación coralífera con más de 5.500 kilómetros cuadrados – el 2% de la superficie mundial total -, situados todos ellos también en los territorios de ultramar.<sup>25</sup>

México tiene arrecifes coralinos en sus aguas del océano Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe en la península de Yucatán. Se extiende desde el sur del Caribe Mexicano, donde forman parte del Sistema Arrecifal Beliceño y llegan de manera discontinua hasta Yucatán, Campeche y Veracruz. En esta última zona, el arrecife forma una barrera discontinua de casi mil kilómetros de longitud que se prolonga hasta Honduras. Es la segunda más grande después de la Gran Barrera de Arrecifes de Australia. En el Mar de Cortés se encuentra un arrecife coralino llamado Cabo Pulmo, que es el arrecife más norteño de todo el Pacífico Oriental.<sup>26</sup>

## 2.6 Viabilidad de los arrecifes ante el cambio climático global.

Existen muchos estudios sobre la importancia de arrecifes en el mundo, sin embargo, son muy pocos los que logran relacionarlo con la importancia primordial que es la de sepultar CO<sub>2</sub>.

En México el profesor Vladimir Pliego Moreno y Roger Mauvois, ambos profesores investigadores del Instituto Politécnico Nacional han estudiado esa importancia de los arrecifes. Sus investigaciones coinciden en que los arrecifes juegan un papel vital a nivel planetario, debido a su intervención en el ciclo del carbono.

Ellos explican que a lo largo del ciclo del carbono, los corales fijan el CO<sub>2</sub> de dos maneras: una indirecta, a través de la fotosíntesis de las algas unicelulares (zooxantelas) que habitan

---

<sup>25</sup>Atlas de UNEP-WCMC

<sup>26</sup> Secretaría de Marina. Op. Cit.

en los corales, y otra directa, que se produce durante la formación de su esqueleto calcáreo por precipitación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>).<sup>27</sup>

Esta forma directa de absorción de CO<sub>2</sub> por los arrecifes reviste gran importancia, pues se calcula que las producciones actuales de carbonato de calcio en arrecifes van de 1 a 3 kg/m<sup>2</sup>/año. La fijación de carbonato por precipitación de carbonato de calcio en todo el planeta ha sido calculada, extrapolarando datos obtenidos en los arrecifes australianos, en 111 millones de toneladas de carbono cada año, es decir, el equivalente al 22% del dióxido de carbono de origen antrópico que se produce en la actualidad. Las actividades humanas generan de 6000 a 8000 millones de toneladas de carbono en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Se incrementa cerca de 2000 a 3000 millones de toneladas por año, así que entre 3000 a 5000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> son absorbidas por los océanos y la biosfera terrestre.<sup>28</sup>

Existen datos de oceanógrafos soviéticos que muestran una tasa promedio de sedimentación de carbonatos de 1.14 g/cm<sup>2</sup> en mil años. Si a partir de esta cifra hacemos cuentas en función de la superficie oceánica y haciendo la conversión de carbonatos a CO<sub>2</sub>, se depositan 1.8 gigatoneladas (1.8x10<sup>9</sup>) de CO<sub>2</sub>. Estos datos expresan que la magnitud de dióxido de carbono que es depositado en los mares es equiparable al excedente anual de CO<sub>2</sub> atmosférico.<sup>29</sup>

Aquí es donde la fijación de CO<sub>2</sub> durante la formación de los esqueletos de carbonato de calcio de los arrecifes juega un papel importante. Ya que los arrecifes tienen tasas de sedimentación de carbonatos de más de 25 veces superiores al promedio citado.

Ambos investigadores consideran que otra ventaja de la fijación de CO<sub>2</sub> por los arrecifes radica en que entrando éste a los sedimentos inicia un ciclo que durará millones de años antes de regresar a la atmósfera, mientras que en otros procesos biológicos (fotosíntesis en bosques y algas) el CO<sub>2</sub> es regresado prácticamente de manera inmediata.

---

<sup>27</sup> Vladimir Pliego Moreno y A. Roger Mauvois G. "Los arrecifes en la Dimensión Ambiental". En *Ecología y Medio Ambiente en la Cuenca del Pacífico*. Sedesol, 1992. p. 68

<sup>28</sup> Idem.

<sup>29</sup> Ibid, pp. 68 y 69

Estas investigaciones arrojan datos lo suficientemente útiles para considerar a los arrecifes como una opción viable al cambio climático global, al sepultar el dióxido de carbono de la atmósfera. Sin embargo, no podemos dejar de lado que en la actualidad es el mismo cambio climático, además de otros factores, el que está terminando con los arrecifes. Por lo cual es importante considerar tanto las ventajas como desventajas en la utilización de arrecifes para sepultar CO<sub>2</sub>, ya que es muy posible que debido a la destrucción causada por el calentamiento del océano, sea actualmente poco viable su utilización.

#### 2.6.1 La destrucción del arrecife de coral.

Desafortunadamente la acción del hombre ha generado graves alteraciones al medio ambiente, mismas que en muchos casos no pueden ser subsanadas a corto plazo, ó en el peor de los escenarios se vuelve imposible reconstruir lo que en un momento fue alterado por las manos humanas. Actualmente, más de la mitad de los arrecifes de coral encontrados en el mundo, se encuentran amenazados y tienen un mediano o alto riesgo de desaparecer. Así mismo, una gran parte de los arrecifes mexicanos, localizados en el Mar de Cortes, El Golfo de México, Las costas del Pacífico y el Caribe mexicano, se encuentran dañados por diferentes factores.

Las principales causas que ponen en riesgo a los arrecifes son las siguientes:

- 1.- La Sobreexplotación y la pesca destructiva.
- 2.- Extracción de coral
- 3.- Turismo y Desarrollo industrial en las zonas costeras.
- 4.- Calentamiento Global
- 5.- La Contaminación de los mares y océanos.
- 6.- La Contaminación y erosión de la tierra.<sup>30</sup>

- 1.- La sobreexplotación y la pesca destructiva

---

<sup>30</sup> Brown Be. *Disturbances to reefs in recent times*. Chapman & Hall Ed. New York, 1997. Pp. 354–379.

El océano ha sufrido fuertes impactos a causa del hombre, quien lo considera fuente inagotable de recursos y lo ha utilizado como depósito final de sus desperdicios. Asimismo, ha llevado a cabo actividades económicas como la pesca, que ha permitido la subsistencia de comunidades en áreas costeras pero que en contra parte ha causado un mayor deterioro de los arrecifes coralinos, tanto por lo inadecuado de los implementos: trampas, explosiones, arrastre, venenos y otros, como por las prácticas indiscriminadas: pesca deportiva, arranque de coral vivo para cal y materia de construcción, extracción de animales de ornato como peces y el mismo coral, destrucción de larvas y reproductores en periodos de desove, vertido de desechos de la pesca; todo ese propiciado por la alta demanda económica, el desarrollo urbano y portuario.<sup>31</sup>

La sobrepesca es considerada uno de los factores más nocivos para los arrecifes de coral. Ocurre cuando los peces u otros animales marinos son extraídos a tasas más rápidas de las que les toma para reproducirse. Muchos animales del arrecife son especialmente vulnerables a la sobreexplotación debido a que les toma tiempo alcanzar la madurez sexual. Los científicos estiman que el 36 por ciento de los arrecifes del mundo ya están sobreexplotados por la sobrepesca y lo peor es que muchas especies están en peligro de extinción como la almeja gigantes y el mero.<sup>32</sup>

Además de la sobreexplotación, existe también problemas en lo que se refiere a las técnicas empleadas para realizar esta actividad, ya que en la mayoría de los países se lleva a cabo una pesca destructiva principalmente por el uso de dinamita y veneno. En el caso de la pesca con dinamita o pesca con “explosión”, se realiza fácilmente y de forma barata con dinamita o bombas caseras creadas a partir de materiales disponibles localmente. Los peces mueren por las ondas expansivas generadas por la explosión y luego son recogidos en la superficie o colectados del fondo por los buzos.

---

<sup>31</sup> Roger. Mauvois, “El arrecife de Coral. Un ecosistema planetario como alternativa al calentamiento global.” Revista del Servicio Geológico Mexicano, AÑO 2/ NO.3/ABRIL 2008.

<sup>32</sup> The Coral Reef Alliance.”Los arrecifes de coral y la pesca con explosivos.” San Francisco, 2005. [www.coral.org](http://www.coral.org)

Estas explosiones no sólo matan grandes cantidades de peces y otros organismos marinos, también destruyen la estructura física del arrecife, la cual es vital para el funcionamiento de ecosistemas de arrecife de coral y otros procesos costeros. En promedio, una bomba de 1 kilogramo (35 onzas), del tamaño de una botella, puede dejar un cráter de aproximadamente 1 a 2 metros de diámetro, matando del 50 al 80 por ciento del coral en esa área<sup>33</sup>. Pueden tomar cientos de años para que la estructura física de un arrecife de coral se reconstruya después de haber sido reducido a escombros por pescadores usando explosivos. Aún cuando es ilegal, la pesca con dinamita se practica en hasta 30 países en el Sudeste Asiático y Oceanía, y además es común en el África Oriental.

La pesca con veneno, comúnmente conocida como “pesca con cianuro,” es otro método de pesca destructivo utilizado para capturar peces vivos para acuarios y en el comercio de alimentos. Los pescadores que usan este método bucean en el arrecife y vierten cianuro de sodio ó blanqueador en las grietas del arrecife para adormecer a los peces, y poder capturarlos más fácilmente. Los impactos de estos venenos en el arrecife varían desde el emblanquecimiento hasta la muerte.<sup>34</sup>

Ambas técnicas empleadas son las más dañinas a los ecosistemas y sumamente destructivas para el arrecife causando un daño permanente alrededor de todo el mundo. Pero no son las únicas técnicas empleadas en el mundo, ya que en el caso de México es muy común el uso de redes de arrastre para llevar a cabo la actividad pesquera. Ésta técnica también es perjudicial para los arrecifes ya que arrasan con peces y todo lo que se encuentra alrededor.

## 2- Extracción de coral.

En muchos países, las especies del arrecife de coral son extraídas y comercializadas en numerosos mercados nacionales e internacionales para ser usadas como artesanías, medicinas tradicionales, material de construcción, ornamentos marinos vivos, coral y “roca viva” (por ej. rocas de coral con organismos vivos adheridos) para acuarios. Estas prácticas

---

<sup>33</sup> Ídem.

<sup>34</sup> Conferencia Internacional de Pesca Responsable. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Cancún, México, 1992. En [www.fao.org](http://www.fao.org)

han generado grandes beneficios económicos de manera inmediata, pero a largo plazo pueden ser destructivas de continuar la extracción de manera irresponsable.

Las actividades que requieren el uso del coral son las siguientes:

- ❖ **Minería para la Construcción:** En África del Este, Sur Asiático y el Pacífico, los corales son extraídos como caliza y material de construcción, algunas veces son usados como ladrillos o relleno de carreteras y también para producir cemento para la construcción de nuevos edificios.
- ❖ **Extracción para Calcio:** El coral muerto es recolectado para producir suplementos de calcio.
- ❖ **Extracción para artesanías/joyería:** Las especies de coral son utilizadas en el negocio de los ornamentos secos, coleccionados y comercializados como artesanías y joyería. Los adornos de coral y la joyería son a menudo vendidos a los turistas y exportadores.
- ❖ **Extracción para Acuarios Marinos:** El coral vivo es colectado para ser usado por la industria de acuarios marinos y acuarios públicos.
- ❖ **Recolección para uso médico:** Los investigadores han estado usando corales en análisis clínicos para implantes de estructura ósea; las importaciones de coral para fines médicos se incrementaron un 500% desde 1991 a 1992 (Fenical, 1996).

Muchos países han prohibido la extracción de coral, debido a que la destrucción de este ecosistema ha propiciado pérdidas económicas importantes. Desafortunadamente no existe un manejo eficiente para la extracción de coral que sea desarrollado de manera sostenible para así causar un impacto mínimo. Lo ideal sería no extraerlo, pero sabemos que eso resulta imposible para las empresas dedicadas a su explotación.

### 3.- Turismo y desarrollo industrial en zonas costeras.

Aunado a lo anterior, la actividad turística tampoco ha favorecido a los arrecifes coralinos, por el contrario, han sido afectados por las construcciones hoteleras que han terminado en primera instancia con el manglar, considerado el protector más seguro del arrecife de coral

por su eficacia en detener sedimentos y contaminantes del continente hacia el mar, por su criadero natural de gran parte de la fauna que participa de los intercambios en la cadena trófica del arrecife y por mantener alejado al hombre, gracias a los insectos. Muchos de los manglares en el Caribe han sido destruidos, siendo muy notorio en países como República Dominicana, las Islas Vírgenes, Puerto Rico, Guadalupe, Martinica y otras islas del Caribe. De esta manera al terminar con ese escudo protector, los arrecifes reciben de manera directa grandes cantidades de desechos que terminan por dañarlo gravemente.

Igualmente, el desarrollo de edificios y urbanizaciones a lo largo de las costas, ha tenido también un impacto significativo sobre los arrecifes. Esto se debe a varias causas. La construcción de muchos de estos desarrollos conlleva la deforestación del área a ser construida. Al remover la cobertura vegetal del área, la tierra expuesta es removida por la lluvia y llega a los cuerpos de agua en forma de sedimentos. Una vez que llegan al arrecife, estos sedimentos causan una disminución en la cantidad de luz que llega al fondo, reduciendo la capacidad de fotosíntesis en el ecosistema y afectando el equilibrio entre las especies.

Los residentes de estos desarrollos costeros también generan aguas usadas y desperdicios, muchos de los cuales llegan hasta el arrecife. Esta agua usada y desperdicios domésticos contienen nitratos fosfatos y otros nutrientes de plantas, lo que ocasiona un crecimiento desmedido de algas que compiten por espacio, luz y nutrientes con los corales y otros habitantes del arrecife.

#### 4.- Calentamiento Global.

Debido a este calentamiento global los arrecifes se encuentran en la actualidad sufriendo de blanqueamiento, que es una respuesta fisiológica genérica de los corales arrecifales hacia las perturbaciones, y sucede ya sea por la pérdida de zooxantelas y/o por la disminución en la concentración de sus pigmentos (Brown, 1997). La mayoría de los corales hermatípicos contienen entre uno y cinco millones de zooxantelas por cm<sup>2</sup> de superficie de tejido vivo y de 2–10 pg de clorofila *a* por zooxantela; sin embargo, durante los fenómenos de



blanqueamiento los corales pueden perder entre 60–90% de sus zooxantelas, y cada zooxantela pierde entre 50 y 80% de sus pigmentos fotosintéticos (Glynn, 1990). Aunque se han dado varias hipótesis sobre las causas de su ocurrencia, todo indica que el blanqueamiento se presenta cuando las zooxantelas sufren daños en el fotosistema II; dicho deterioro ocurre a nivel enzimático y en especial puede deberse a la ocurrencia de temperaturas elevadas en el agua de mar. Las consecuencias del blanqueamiento son múltiples, pero particularmente ha llamado la atención la disminución severa en la capacidad de depósito de carbonatos, y el consecuente cese virtual del crecimiento arrecifal<sup>35</sup>

Aunado a lo anterior, la conservación de los arrecifes se ve amenazada de igual manera por fenómenos climatológicos como El Niño, siendo el de 1998 uno de los más catastróficos ya que causó la pérdida de más del 90% del coral en algunas partes del Océano Índico, lo que supuso el 5% de los arrecifes de coral del mundo.

Los fenómenos naturales y en mayor medida la intervención del hombre han provocado que en la actualidad el 58% de todos los arrecifes de coral estén amenazados.

#### 5.- Contaminación de mares y océanos.

La industrialización de las costas, los derrames de petróleo y la contaminación producida por motores de combustión, son una amenaza para los arrecifes de coral. Hay evidencia fundamentada que indica que los derrames producidos en el Golfo Pérsico, así como el producido en el Canal de Panamá, provocaron grandes pérdidas de arrecife de coral, así como una reducción en las poblaciones de peces a corto plazo.

#### 6.- Contaminación y erosión de la tierra

Sedimentos, pesticidas, detergentes y otros contaminantes provenientes de actividades humanas, pueden dañar a los arrecifes cuando son transportados por los ríos hasta los

---

<sup>35</sup> C M. Eakin. “Where have all the carbonates gone?” A model comparison of calcium carbonate budgets before and after the 1982–1983 El Niño at Uva Island in the eastern Pacific. *Coral Reefs* 15, 1996. Pp. 109–119.

mares. Esto conlleva tanto a la asfixia de los corales como al boom de nutrientes y al impedimento del paso de luz solar que afecta directamente el coral.

La destrucción de coral por estos factores esta claramente ejemplificado, en un estudio realizado por el Instituto de Recursos Mundiales en el año 2006, en el cual se observó que más del 80 por ciento del sedimento, y 50 por ciento de los contaminantes que llegan a las aguas costeras del Arrecife Mesoamericano se originan de actividades humanas en zonas montañosas de Honduras, Guatemala fue identificada como la fuente de cerca de una sexta parte de todos los sedimentos y casi una cuarta parte de todo el Nitrógeno y Fósforo que entra a las aguas costeras a lo largo del Arrecife Mesoamericano.<sup>36</sup>

En el caso de México y Belice, el estudio indica que, un porcentaje muy bajo de sedimento a nivel regional proviene de ambos países. Belice contribuye con un 10-15 por ciento de los nutrientes, y se estima que México contribuye con un 5 por ciento de los nutrientes para todas las cuencas de la región del Arrecife Mesoamericano.<sup>37</sup>

De acuerdo con el escenario de uso de suelo que favorece los mercados y políticas ambientales limitadas, la descarga de nutrientes muy probablemente incrementará un 10 por ciento para el año 2025, mientras que la descarga de sedimento podría incrementar un 13 por ciento o más. En caso de implementarse políticas ambientales que favorecen el desarrollo sostenible, la descarga de nutrientes y sedimentos probablemente será reducida al menos en un 5 por ciento de los niveles actuales, promoviendo así la recuperación de corales degradados.<sup>38</sup>

Actualmente existen muchas organizaciones como son La Alianza para el Arrecife Mesoamericano de la Red Internacional de Acción para los Arrecifes de Coral, Fundación de las Naciones Unidas la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, que están utilizando este estudio para identificar las áreas agrícolas en la región que necesitan reducir el uso de plaguicidas y la erosión del suelo, creando acuerdos de

---

<sup>36</sup> Instituto de Recursos Mundiales (WRI). “Contaminación causada por humanos está dañando valiosos arrecifes”. Belice, 12 de Diciembre 2006. p.29 En [www.wri.org](http://www.wri.org).

<sup>37</sup> *Ibíd.* p. 30

<sup>38</sup> *Ídem.*

colaboración con compañías agrícolas, para ayudarles a ejecutar practicas de manejo que reduzcan los impactos sobre el Arrecife.<sup>39</sup>

Como podemos observar, son muchos los factores negativos a los que están expuestos los arrecifes de coral, la mayoría de ellos son causados por el ser humano, quien solo se ha preocupado por obtener ganancias económicas sin preservar el medio que le provee todos los recursos para lograrlo. Por desgracia la destrucción que hemos propiciado empieza también a afectarnos, y de seguir evitando la sustentabilidad no dudemos que en un futuro no muy lejano, estemos hablando de la autodestrucción del ser humano.

#### 2.6.2 Efectos sociales de la destrucción del arrecife de coral

La pérdida de arrecifes tiene un impacto significativo sobre la sociedad mundial, principalmente porque hasta la fecha no han sido contemplados como uno de los principales sumideros de CO<sub>2</sub>, lo cual revertiría el calentamiento global y todos los efectos nocivos que se han generado a partir del mismo. Ahora bien, el sector económico, que es lo que más preocupa a los gobiernos de todos los países, también se ve afectado, particularmente en lo que se refiere a la pesca y al turismo.

El Fondo Mundial para la Protección de la Naturaleza, ha presentado en Ginebra, Suiza, un informe en el que pone de manifiesto la degradación de los sistemas de arrecifes coralinos, y su daño a la biodiversidad y economía mundial. El informe señala claramente la importancia de los arrecifes para la economía, principalmente porque aporta beneficios de hasta 30.000 millones de dólares netos al año en bienes y servicios.

El mismo informe señala que más del 60 por ciento de los arrecifes de coral del planeta serán destruidos en los próximos 30 años, y eso provocará la disminución de los ingresos monetarios (en ciertos casos de hasta el 75 por ciento), pérdidas de empleo y fuentes alimenticias principalmente en países en desarrollo, muchos de ellos en situación de pobreza. No debemos olvidar que muchos países basan su alimentación en productos

---

<sup>39</sup> Ídem.

pesqueros y al destruirse el coral muchas especies no sobrevivirán o migraran hacia otros lugares en búsqueda de su sobrevivencia.

En el caso del turismo, el arrecife coralino ha sido uno de las principales atracciones para millones de buceadores y turistas tanto nacionales como extranjeros. El turismo sostenible podría constituir una fuente de ingresos importante para la población local, sin embargo, demasiado a menudo, los desarrollos turísticos irresponsables han ocasionado graves daños a los arrecifes y un consecuente hundimiento económico.

Por otro lado, la pérdida de arrecifes también tiene un impacto sobre la medicina, ya que muchas de las sustancias químicas presentes en los corales y en las especies que habitan en el arrecife han mostrado actividad medicinal en el caso de muchas enfermedades. De perder esta biodiversidad, los seres humanos estaríamos perdiendo la cura potencial de enfermedades ya existentes y de otras que aún no se han manifestado.

El problema es alarmante, tanto desde el punto de vista ambiental como económico y también de salud, el ser humano debe de hacer algo para remediar la situación de los arrecifes ya que de una u otra manera los afectados seremos nosotros mismos. En diversos foros se ha planteado la importancia de preservar los ecosistemas coralinos, el mismo director del Programa de Mares Amenazados de WWF, Simon Cripps, declaró que “las pérdidas serán inmensas si los gobiernos no se percatan de la importancia ecológica y económica de estos ecosistemas y de desentienden de su conservación”.<sup>40</sup>

En el mismo informe Hoeg-Guldberg explicó que en lugares como las islas Maldivas y las Sevelles, en el Océano Indico, ya han perdido un 90 por ciento de sus tesoros marinos. De seguir así “más de 500 millones de personas sufrirán directamente las consecuencias económicas de la desaparición de los arrecifes de coral y el impacto será devastador en, al menos, trece naciones del Pacífico”.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> Informe del Fondo Mundial para la protección de la naturaleza (WWF), The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation, Ginebra, Suiza, 28 de Febrero 2003.

<sup>41</sup> Ídem.

Los gobiernos por lo tanto deben de actuar de manera conjunta para evitar que el daño siga creciendo, quizá lo que menos les interese a muchos gobernantes son las graves repercusiones ambientales, pero por lo menos deben hacerlo para evitar daños económicos para la población. Además, su cuidado y preservación en un futuro puede generar mayores beneficios, si los gobiernos se percatan de la importancia de los arrecifes como sumideros de CO<sub>2</sub>, de ser así el curso de la historia del hombre cambiaría por completo porque eliminaríamos la peor amenaza del ser humano, el calentamiento global.

## 2.7 La propuesta ante la destrucción de los arrecifes naturales

La idea general no solo es preservar los arrecifes naturales, sino también construir arrecifes artificiales que logren liberar presión a los primeros y generar sumideros de CO<sub>2</sub> que ayuden a revertir el cambio climático global.

Se trata de invertir en proyectos que den como resultado la generación en mayor proporción de arrecifes artificiales, viables económicamente y cuyos resultados sean visibles a corto plazo. Es importante destacar que esta propuesta no incluye la construcción de arrecifes basados en enseres de desecho como llantas, autos viejos, barcas, aviones, etc. La mayoría de estos, no están diseñados para tener larga duración en las adversas condiciones marinas de corrosión, corrientes, marejadas, etc. Estos elementos al corto plazo se convierten más perjudiciales al medio ambiente y al ser humano que benefactores.

Por lo tanto pueden seguirse construyendo arrecifes artificiales en playas desnudas bajo aguas no muy profundas. Sin embargo, en este trabajo se plantea la posibilidad de crear arrecifes en otras zonas oceánicas, en aquellas donde el ser humano pueda controlar los factores primordiales para el crecimiento del coral, como la luz y la temperatura. Es cuestión de innovar y el ser humano es experto en eso, por lo cual, de existir verdadera voluntad, en un futuro habrá grandes estructuras arrecifales en medio del océano.

En el siguiente capítulo se explica con mayor detalle en que consisten los arrecifes artificiales y las posibilidades de que el ser humano los utilice para subsanar los daños que ha provocado a lo largo de su existencia.

### **Capítulo 3. El uso de arrecifes artificiales como el contraveneno al cambio climático global**

La creación de arrecifes artificiales se ha convertido en una de las estrategias más eficaces para la conservación de la biodiversidad marina en México y en el mundo. Día a día surgen nuevos proyectos y observamos como las estructuras artificiales creadas y desechadas por el hombre, son cubiertas de vida en el fondo marino.

Un arrecife artificial, además de conservar la flora y la fauna marina, presenta una forma de desarrollar la economía en equilibrio con la naturaleza y también contribuye con la captura de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Es importante considerarlos en este trabajo debido a que actualmente los arrecifes naturales son insuficientes frente al gran problema climático que vivimos y la construcción de nuevos arrecifes permitirá que en un futuro se propicie una captura de CO<sub>2</sub> mas fructífera para el ser humano.

Desafortunadamente los arrecifes naturales y artificiales solo han sido estudiados en el aspecto económico, es decir, como un recurso que incrementaría la actividad pesquera y turística en algunos estados. En este trabajo no pretendo descartar esa importancia, ya que es vital para la sobrevivencia del ser humano, pero sí quiero recalcar que la mayor aportación de los arrecifes es la de sepultar CO<sub>2</sub>, lo cual desgraciadamente no ha sido considerado por los gobiernos de la comunidad internacional.

#### 3.1 Definición de arrecife artificial

El concepto de Arrecifes Artificiales se originó en Japón, durante el siglo XVIII y en los Estados Unidos se ha utilizado desde 1830. A partir de los primeros descubrimientos, muchos países los han diseñado, construido, instalado y usado.<sup>42</sup> Los arrecifes artificiales consisten en la instalación de estructuras construidas con diversos materiales y diseños en fondos marinos poco productivos, con el objeto de que tales estructuras se conviertan en lugares de refugio, reproducción, alimentación, crianza y crecimiento de las especies que

---

<sup>42</sup> Secretaría de Marina. Op. cit.

tienen importancia para la pesca. A partir del uso pesquero se derivó la aplicación de arrecifes artificiales en sitios para mitigación del impacto humano sobre el hábitat perturbado, mediante la rehabilitación del ambiente además de la pesquería, ofreciendo amplias posibilidades de beneficio ecológico.<sup>43</sup>

### 3.2 Experiencia internacional en la construcción de arrecifes artificiales

Diversos países han diseñado, construido e instalado los arrecifes artificiales, con el objetivo prioritario de promover la captura de peces, alcanzar incrementos del 20% al 4000%; siendo su segunda función la prevención de la sobre explotación pesquera.<sup>44</sup>

Japón, se ha constituido como el país líder a nivel mundial en el desarrollo de la tecnología para hábitats acuáticos para pesquerías, siendo su meta principal el aumento de la producción pesquera comercial.

Estados Unidos sigue siendo el país dominante en cuanto a estudios relaciones con la conservación y rehabilitación de hábitats. Filipinas, ha producir 900 Kg por año en un arrecife de 254 m<sup>2</sup> construido en madera y bambú para apoyo a la pesca artesanal ribereña, con un costo mínimo de 100 dólares. En Hawái un arrecife artificial aumentó la diversidad de 6 a 25 especies, incrementándose la captura de 0.6 kg/ha. a 41 kg/ha.<sup>45</sup>

También, países como Taiwán y Francia, han creado estructuras arrecifales con mucho éxito para incrementar las poblaciones de peces o para reducir la presión pesquera sobre áreas ya sobreexplotadas. Asimismo, en algunos países del Sureste Asiático como: Malasia, Tailandia y las Filipinas, se han establecido programas extensivos de arrecifes artificiales. En el Golfo de Tailandia los arrecifes de llantas tienen un propósito adicional, el de mantener a los barcos de arrastre alejados de las aguas costeras. En el Continente

---

<sup>43</sup> Rafael Girón Botello y Georgina Ramírez Soberón. “Arrecifes Artificiales en la Cuenca del Pacífico”. En Ecología y Medio Ambiente en la Cuenca del Pacífico, Sedesol, México, 1992 p. 98

<sup>44</sup> Grover R., Sonu Ch. “Artificial habitat technology in the world-today and tomorrow”. Japan-USA Symposium on artificial habitats for fisheries proceedings. Tokyo, Japan, 1991.

<sup>45</sup> Rafael Girón Botello y Georgina Ramírez Soberón. Op. cit. p.100



Americano hay más de 500 sitios donde existen arrecifes artificiales, estos han sido creados por grupos locales que han participado con donaciones y trabajo voluntario.<sup>46</sup>

En México los primeros intentos para construir arrecifes artificiales se desarrollaron en las Islas Marías en 1967, para que los reos del penal realizaran pesca con anzuelo. Se construyeron con carrocerías de autos y se instalaron cerca de la playa. Después de esa fecha, se hicieron intentos por seguir construyendo arrecifes pero no tuvieron el apoyo esperado por las autoridades.<sup>47</sup>

En nuestro país como en muchos otros, han preferido el uso de arrecifes para cuestiones económicas, siendo la pesca el principal motor para su construcción. En este contexto, el proyecto Arrecifes Artificiales en Colima, es el primero autorizado con apoyo del gobierno federal al Instituto Nacional de Pesca, a través de CRIP-Manzanillo. Posteriormente surgieron otros proyectos en el estado de Tamaulipas, donde se instaló un arrecife por parte de un grupo de biólogos y buzos, obteniéndose buenos resultados.

En el estado de Quintana Roo se han realizado investigaciones para el mejoramiento de la pesquería de langosta, utilizando arrecifes artificiales en la bahía de la Ascensión.<sup>48</sup> En el estado de Campeche existen cinco arrecifes artificiales para mejorar la producción pesquera, dentro de un proyecto realizado por el gobierno estatal. En Baja California se han construido arrecifes artificiales como colectores de larvas de cangrejo *Pachygrapsus crassipes*, y para mejorar la pesquería del erizo mexicano *Strongilocentrotus franciscanus*.<sup>49</sup>

---

<sup>46</sup> Secretaría de Marina, Op. cit.

<sup>47</sup> *Ibíd.* p. 101

<sup>48</sup> Lozano. "Refugios artificiales en la pesquería de langostas del Caribe mexicano". "I Reunión internacional sobre mejoramiento de hábitats acuáticos para pesquerías (arrecifes artificiales)" Manzanillo, Colima, México, 1992.

<sup>49</sup> Baqueiro E., R. Méndez. "Arrecifes artificiales, una alternativa para mejorar las capturas de pesca riberaña". 5ª. Conferencia Internacional sobre arrecifes artificiales. Long Beach, California, USA, 1991.

### 3.3. Beneficios de la Creación de Arrecifes Artificiales

La construcción de arrecifes artificiales, han generado grandes beneficios a muchos países del mundo, no solo en términos económicos sino también en la rehabilitación de los hábitats naturales. Entre los grandes beneficios de su creación están los siguientes:

1. Disminución de presión sobre arrecifes naturales.
2. Generación de espacios para nueva vida submarina.
3. Beneficios económicos a la población local por medio del ecoturismo.
4. Disminución de pesca ilegal dificultando el uso de redes de arrastre.
5. Absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera

#### 1. Disminución de presión en arrecifes naturales.

Uno de los factores más destructivos para los arrecifes naturales, es la sobreexplotación. Esto sucede cuando un gran número de pescadores o buzos utilizan un solo arrecife para obtener sus recursos y para bucear. Los arrecifes artificiales presentan un sitio alternativo de buceo por lo que disminuyen la presión sobre un solo arrecife. Esto permite la regeneración de vida en los arrecifes naturales y otorga descanso a los ecosistemas sobreexplotados.

#### 2. Generación de espacios para nueva vida submarina.

Cada arrecife es capaz de sostener una determinada cantidad de vida según su tamaño y las condiciones de su ambiente. A medida que se erosionan los arrecifes, se disminuye la cantidad de vida que son capaces de sustentar. Esto afecta directamente a la cantidad de pesca y recursos marinos que se pueden explotar.

La creación de arrecifes artificiales genera nuevos espacios de vida y refugio para cierta cantidad de flora y fauna. La colonización de estos arrecifes, depende de la profundidad y del medio en el que se encuentre, pero en general son colonizados por algunos tipos de esponja, alga, coral, anémonas, camarones, cangrejos y distintas especies de peces.

### 3. Beneficios económicos por medio del ecoturismo.

Cada vez son más las personas que se interesan por la exploración submarina y los arrecifes son una gran atracción para el buceo. Esta actividad ecoturística permite el desarrollo económico de la comunidad en armonía con la naturaleza. En 1985, Las Bahamas reportó un ingreso de 90 millones de dólares por dicho turismo. México es hoy en día, uno de los países con mayores posibilidades de desarrollo en esta actividad. Los mares de este país ofrecen todo tipo de atractivos y podrían ofrecer aun más con la construcción de nuevos arrecifes artificiales.

### 4. Disminución de pesca ilegal dificultando el uso de las redes de arrastre.

Existe un gran número de pesquerías que hacen uso ilegal de redes de arrastre. Este tipo de pesca, sin respetar las normas ambientales, arrasa con todo tipo de vida por donde pasa. Una vez que terminan con los recursos de una zona, se mueven para explotar otra. Esto también afecta a las pesquerías ribereñas que son regionales y que utilizan técnicas sustentables de pesca. Los arrecifes artificiales impiden este tipo de pesca ya que las redes de arrastre quedan atoradas en los arrecifes. Sin embargo sabemos que las personas que realizan esta actividad, muchas veces no les interesa arrasar con el arrecife con la finalidad de adquirir las especies marinas, por lo cual lo ideal es que existan leyes que prohíban el uso de las redes de arrastre, para la mejor preservación de los arrecifes.

### 5. Absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

Como ya ha sido mencionado, la mayor importancia de los arrecifes a nivel planetario es su intervención en el ciclo del carbono, particularmente en la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Los arrecifes naturales resultan insuficientes frente al calentamiento global que se vive en la actualidad, por lo cual la construcción de arrecifes artificiales en playas y si es posible en diferentes partes del océano, puede ser vital para revertir el problema. Lo importante finalmente es lograr la mayor absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera y con una exitosa construcción de arrecifes artificiales, en la que participen toda la comunidad internacional, se puede lograr.

### 3.4 Tipos de construcciones

Algunos arrecifes artificiales se han formado con barcos hundidos, bloques y tubos de concreto, troncos de madera, carrocerías de automóviles, estructuras prefabricadas con fibra de vidrio y plástico y llantas usadas. La tecnología es cada vez más refinada, ya que en Japón las industrias han sido capaces de desarrollar cerca de 100 diseños comerciales de unidades prefabricadas de arrecifes, hechas de material duradero y fuerte (concreto, acero y plástico). Por ejemplo, se han construido arrecifes artificiales denominados Tsukiiso, especialmente para expandir arrecifes naturales o crear nuevas áreas.

Es importante mencionar que en Japón, el uso de llantas para arrecifes artificiales ha sido prohibido debido a su posible relación con ciertas sustancias tóxicas en el ambiente marino. Se han tenido experiencias desagradables con arrecifes hechos de llantas que no han sido bien anclados y que al soltarse destruyen arrecifes naturales y las llantas van a dar a las playas adyacentes. Otras estructuras como las carrocerías de automóviles, si estas se mueven por la acción de las corrientes generadas por las tormentas pueden ocasionar un peligro para la pesca de arrastre como la de camarón.

Los sitios para la creación de arrecifes artificiales deberán ser cuidadosamente seleccionados, tomando en consideración el tipo de fondo, la acción del oleaje, especialmente en época de tormentas y corrientes, se recomienda que se ubiquen en fondos duros rocosos o con grava porque los fondos blandos pueden fácilmente desaparecer por las arenas, además de localizarse cerca de un área con vegetación de donde obtendrán su alimento los peces. Asimismo, no debemos olvidar que existen características particulares para su formación, abarcando los aspectos físicos, químicos, biológicos y geológicos. También, es importante que los arrecifes artificiales sean hechos con buenos materiales y diseños de la construcción.

Por todo lo anterior, es necesario primeramente instalar pequeños arrecifes artificiales que generen la información mínima indispensable para recomendar el sitio y tipo de arrecife más conveniente, así como para conocer los beneficios y riesgos que generarían su

construcción. La idea principal es que se construyan no solo en las costas, si no también en el océano, para lograr una mayor efectividad.

Además se requiere control gubernamental de los países involucrados en la construcción, tanto a nivel nacional como a nivel internacional en caso de colocar estructuras en el océano fuera de la jurisdicción de algún país en particular. Esto es necesario para evitar cualquier desorden ambiental provocado por el hundimiento de estructuras, de esa manera los riesgos y los beneficios serían compartidos así como la remediación en caso de ser necesario.

Para la instalación de cualquier arrecife artificial debe contar primeramente con un a serie de estudios de factibilidad, que consideran la selección de sitios determinando, corrientes superficiales y profundas, incidencia de ciclones, temperatura, profundidades, tipo de compactación de fondos, pendiente, especies presentes, contaminación, entre los principales. Asimismo, debe considerar la selección de materiales no contaminantes de bajo costo, fácil transportación, durables y con cavidades adecuadas a los organismos que habitarán el arrecife, también el diseño de la estructura que garantice su fijación al fondo y la no acumulación de sedimentos.

Existe una creciente demanda por arrecifes artificiales que cumplan ciertos requerimientos mínimos como son: estables, duraderos, seguros, estéticos, reversibles, económicos, monitoreables, no contaminantes y funcionales. Lo anterior es indispensable para una construcción exitosa en cualquier país o en cualquier región del planeta.

Asimismo, hay diversos proyectos que pueden emplearse para la construcción de arrecifes artificiales, cumpliendo con los requerimientos anteriormente señalados, por lo cual se mencionaran los de mayor viabilidad en la lucha contra el calentamiento global.

### 3.5 Modelos viables para la construcción de arrecifes en el mar.

Existe un proyecto realizado en el Golfo Pérsico, exactamente en Las Palmeras en Dubái, en donde se logró dar un ambiente propicio para la generación de arrecifes a partir del 8 de Enero del 2005.

Básicamente, el arrecife consiste en un cilindro central hecho de concreto de 2.5 metros de altura y 1.4 m de diámetro. El cilindro está lleno de piedras y arena del fondo marino, para lograr incrementar su peso y estabilidad al momento de ser arrojado al mar. En el cilindro de concreto se colocaron unas pipas plásticas en 14 hileras verticales de 1.5 a 2.4 metros de largo, su diámetro es variable van de los 9 a 18 cm. Las pipas de plástico están hechas de polietileno, que es un material ligero en peso y resistente.<sup>50</sup>

Los resultados fueron sorprendentes, ya que lograron probar que el artefacto utilizado es lo suficientemente resistente a tormentas marítimas. También, en Marzo del 2005, observaron claramente la colonización de varias especies que empezaban a ser atraídas por el arrecife. Después de 6 meses, en Julio de 2005, el arrecife se cubrió con una gran variedad de corales, anémonas, gasterópodos, moluscos, entre otros animales invertebrados, que son característicos en áreas donde existen arrecifes naturales.<sup>51</sup>

El Proyecto en Dubái demuestra la posibilidad de crear condiciones óptimas para la formación de arrecifes de coral, con lo cual no solo se da una solución al calentamiento global, también beneficia económicamente a la región por la atracción de vida marina para la pesca y en el caso de Dubái para atraer el turismo.

Otro tipo de arrecife artificial sumamente exitoso es el creado por ReefBall Development Group, con sede en Florida, Estados Unidos, el cual en muchos países es considerado líder mundial en la investigación y la aplicación de este hábitat. Esta organización formada por voluntarios, en sus proyectos incluyen programas de capacitación para sus asociados en áreas de la fabricación de los elementos de concreto bajo su supervisión, de tal manera que

---

<sup>50</sup> Christopher Hopkins, “*Test Report for ‘Reef Systems’ at the Palm Jumerah, AquaMarine Advisers*”, 2005. [www.aquamarine.se](http://www.aquamarine.se)

<sup>51</sup> Idem.

se controlen la calidad, se sigan programas de colocación segura y estable, así como se incluyan programas de recuperación y trasplante de corales.

La organización ReefBall Development Group ha participado en más de 3000 proyectos exitosos alrededor en 40 países del mundo que a la fecha suman más de medio millón de elementos ReefBall colocados y bajo monitoreo constante. De esta manera se han instalado exitosamente elementos de diseño de ReefBall en países como Australia, Estados Unidos, Filipinas, Malasia, República Dominicana, Curasao, Mar Báltico, Suiza, España, México, Maldivas, etc.<sup>52</sup>

El diseño de los Reefballs se ha ido mejorando continuamente; semeja una semiesfera hueca con agujeros de distintos tamaños en su cuerpo, que por la técnica empleada en su fabricación, cada una será única y diferente al resto, ya que el personal encargado del colado de los moldes controla la localización y tamaño de los agujeros que va dejando en cada molde al vaciar el concreto. Tanto el hueco central como los agujeros del cuerpo se conforman con la ayuda de globos de hule especiales que permiten variar el espesor de la pared al poder modificar su volumen inflándose a voluntad del encargado del moldeo. Los agujeros tienen una abertura mayor en la cara exterior y menor en el interior y varios agujeros se pueden comunicar entre sí si se desea. En la parte de la corona del elemento se tiene una abertura de mayor tamaño. Estas características agregan estabilidad..<sup>53</sup>

Las corrientes al pasar por los agujeros de los elementos Reefballs producen un gran número de corrientes secundarias en diferentes direcciones que tienden a minimizarse entre ellas. Por la abertura superior se produce una corriente ascendente que arrastra gran cantidad de nutrientes. Estos efectos provocan la atenuación efectiva del oleaje a la vez que inducen a los organismos a establecerse alrededor de los elementos, por lo que pronto se convierten en atractivos naturales que alojan gran diversidad de vida. Los Reefballs forman un entorno que atrae vida marina, da refugio y fomenta el desarrollo de la cadena trófica. Una vez cubiertos por algas y corales son un gran atractivo visual para los nadadores.<sup>54</sup>

---

<sup>52</sup> ReefBall Foundation, Inc. Services Division. Florida, Estados Unidos. En [www.reefball.com](http://www.reefball.com)

<sup>53</sup> Ídem.

<sup>54</sup> Ídem.



FIG. 4. Los Reef Balls, en zonas costeras. [www.reefball.orb](http://www.reefball.orb)

La mayor parte del peso de cada elemento se localiza en la parte inferior para mejor estabilidad. Cuando los elementos se colocan en zonas de oleaje de alta energía como el caso de arrecifes colocados a baja profundidad o cercanos a la costa, los elementos son anclados convenientemente para evitar ser arrastrados por la acción del oleaje.

En cuanto al material utilizado, la organización creadora especifica un control estricto de la calidad del concreto para la fabricación de sus elementos, cuyas características químicas y mecánicas se mejoran mediante la adición de aditivos probados y compatibles con el medio ambiente marino. Primeramente se agrega microsilica al concreto para que al ser colocado en el mar tenga el mismo pH del agua de mar. Luego se le agregan otros dos aditivos para incrementar la fuerza del concreto y para que se le formen burbujas en la superficie de los elementos para darle una textura rugosa con fin de facilitar el establecimiento de vida marina en la superficie de los elementos.<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> Ídem.



También se controla la resistencia mecánica de los elementos para asegurar su integridad al paso de los años. Los Reefballs se fabrican para durar más de 500 años. La resistencia mecánica de diseño es una necesidad también para evitar desperdicio durante el desmolde y manejo de los Reefballs para minimizar el número de elementos que se rompan durante la fabricación y manejo. Los elementos Reefball no llevan acero de refuerzo, sino que su resistencia se logra con los aditivos especiales que además le agregan resistencia a la abrasión. Por otro lado, la resistencia especificada para el concreto de los Reefballs es de 250 kgs/cm<sup>2</sup> para levantar los elementos de la base durante el colado y de hasta 550 kgs/cm<sup>2</sup> para su instalación. Esto asegura la longevidad de los elementos.<sup>56</sup>

Los resultados han sido sorprendentes, ya que alcanzan productividades espectaculares de desarrollo de biomasa. Por ejemplo, en promedio cada uno de los elementos ReefBall produce alrededor de 180 Kg. de biomasa (animal o vegetal) cada año. Agregando que la vida esperada de los elementos es de 500 años se puede decir que más de 9 mil millones de kilos de biomasa se agregarán a los océanos del mundo por los siguientes cinco siglos como resultado de los esfuerzos de ReefBall.<sup>57</sup>



FIG. 5 La formación de coral en los Reef Balls.  
[www.reefball.org](http://www.reefball.org)

Este tipo de arrecife artificial es de los más confiables a nivel internacional, ya que muchos países los han instalado con gran éxito al atraer a diversas especies acuáticas y principalmente por la formación de coral. Evidentemente, deben seguirse estrictamente las especificaciones de diseño, ya que hace algunos años en Bahía de Mujeres cerca de

---

<sup>56</sup> Ídem.

<sup>57</sup> Ídem.

Cancún, algunos Reefballs fueron desplazados por el empuje de una embarcación que fue hundida en la zona para aumentar el atractivo pero que no estuvo convenientemente anclada. Es importante por lo tanto no solo tener el mejor diseño de arrecifes, sino también seguir especificaciones necesarias para obtener el mayor beneficio de ellos.

De esta manera los ReefBall serán considerados en este trabajo como otra opción para la construcción de arrecifes artificiales en diversos países del mundo o regiones.

La tercera opción de arrecife artificial que se plantea en este trabajo es también muy interesante, ya que permitiría resolver diversos problemas al ser construido. Se trata de arrecifes artificiales mediante contenedores geotextiles llenados con arena ó mejor conocidos como Sandtainers, lo cuales fueron desarrollados con un sistema operacional que permite construirlos mediante barreras separadas de la costa, de tal suerte que se cumplieran varias condiciones: que se aprovechara al máximo los materiales nativos, que el equipo de construcción fuese económico, ligero y fácil de transportar y que requiere de mano de obra no especializada de la localidad. Los Sandtainers han logrado amortiguar la energía del oleaje, proteger las playas contra efectos de la erosión, ofrecer a los bañistas zonas tranquilas y establecer un sitio bioecologicamente atractivo para diversas formas de vida marina.<sup>58</sup>

En México se han desarrollado desde 1972 materiales de construcción utilizando cimbras permeables de textil sintético que se llenan directamente en el sitio de la obra mediante una mezcla de arena y agua, todo lo cual evita utilizar maquinaria pesada, tránsito terrestre y procedimientos peligrosos. Ello permite, a diferencia de otros métodos, el que se lleven a cabo estructuras separadas de la costa mediante el empleo de buzos con experiencia en el llenado de los contenedores con arena bajo el agua.<sup>59</sup>

---

<sup>58</sup> Mauricio Porraz y Antonio Maza. "Low Cost Structures Using Operational Designs Systems, Coastal Sediments" ASCE/Charleston, South Carolina, Noviembre 1977.

<sup>59</sup> Mauricio Porraz. "Arrecifes artificiales mediante contenedores geotextiles llenados con arena". Comité Mexicano de Ingeniería de los Recursos Oceánicos. S.C. México, 2002 p. 11

El procedimiento en si es muy sencillo, consiste en colocar el contenedor geotextil en el sitio exacto que señala el proyecto, y llenarlo hidráulicamente con una bomba tragasólidos. En cuestión de minutos se logra un elemento resistente, de varias toneladas, quedando la arena totalmente compactada en su interior, formándose lo que bien puede calificarse como una arenisca.<sup>60</sup>

El equipo empleado es ligero, económico y fácil de transportar; solo se requiere una lancha, un compresor para suministrarles aire a los buzos, una pequeña planta de generación eléctrica, la bomba sumergible con sus mangueras, coples y el equipo de buceo.

Otra ventaja es que se optimiza el empleo de mano de obra no especializada de la localidad, para colocar y llenar los contenedores, ya que el personal se adiestra y adquiere experiencia rápidamente durante la ejecución misma de las obras, así como el que se emplean materiales nativos (arena y agua). Este sistema permite que las estructuras se lleven a cabo sin necesidad de caminos de acceso a la obra y que su cresta sea sumergida, lo cual no afecta el aspecto paisajístico de la zona marina.

Aunque las barreras de arrecifes artificiales se han utilizado ya desde hace algún tiempo, éstas se han venido empleando siguiendo un patrón de una sola línea paralela o casi paralela a la costa, sin embargo se ha visto que una mejor manera de incrementar los resultados es utilizando una barrera doble de arrecifes artificiales. La barrera más alejada de la costa constituirá la primera línea de defensa, siendo la que disipará la mayor cantidad de energía del oleaje incidente, creando con ello una bahía atractiva y segura del lado de sotamar, lo cual resulta muy útil para los desarrollos turísticos.

Otro aspecto sumamente importante a tomar en cuenta al construir los arrecifes artificiales en forma de barrera doble, es el bioecológico. Los esfuerzos para construir barreras artificiales iniciaron alrededor del año de 1916 en los Estados Unidos de América con fines de pesca deportiva y aunque este aspecto se mantuvo en estado latente durante muchos

---

<sup>60</sup> Ídem.

años, éstos han resurgido nuevamente con nuevo ímpetu, orientados no solamente hacia el aspecto de pesca deportiva sino de la comercial.<sup>61</sup>

Algunos de los arrecifes artificiales construidos con esta opción se encuentran en grandes desarrollos turísticos en México, en Cancún, localizado en la Península de Yucatán. Desde mediados de los años Setenta han sido muchos los hoteles que se han establecido en la faja costera entre Punta Nizuc y Punta Cancún a lo largo de 40 kilómetros de hermosas arenas blancas. Sin embargo esta zona es visitada con cierta frecuencia por huracanes.<sup>62</sup>

En 1988 el huracán Gilberto, en 1993 Andrew y en 1995 el Roxanne se encargaron de barrer gran cantidad de la hermosa arena blanca hacia mar adentro, formando una berma sumergida a un par de centenar de metros de la playa. Los dueños de los hoteles intentaron proteger sus propiedades con soluciones llamadas de tipo duro, pero no dieron resultado, por lo cual se optó por utilizar una opción de tipo sustentable como la mejor manera de lograr una protección que además de ser la más viable resultaba ser la forma más económica de proteger las playas. Esta consistió en una serie de múltiples arrecifes artificiales separados de la costa, utilizando para ello la arena disponible de la berma sumergida para llenar directamente en el sitio grandes contenedores de textil permeable, Sandtainers, los cuales se unen firmemente entre si por medio de bandas geotextiles de alta tenacidad, con lo que se logra una estructura monolítica.<sup>63</sup>

A la fecha los resultados obtenidos desde el punto de vista de ingeniería costera han sido muy positivos, lográndose una autorecuperación de las playas erosionadas en corto tiempo. Asimismo se hace notar que en estos últimos tres años se han desarrollado otros 18 proyectos similares en las costas del Estado de Quintana Roo.

---

<sup>61</sup> Mauricio Porraz y Alejandro Solar. “*Double Barriers of Artificial Reefs to Rehabilitate and Stabilise Tourist Beaches in Cancun, México*”. Proceedings of the Fifth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries. Cape Town, South África, Abril 2002.

<sup>62</sup> Ídem.

<sup>63</sup> Mauricio Porraz, “Arrecifes Artificiales para Restaurar Playas Turísticas”. Memorias de la conferencia Internacional de Construcción para el Turismo, La Habana, Cuba, junio de 2000.

Desde el punto de vista ecológico, se ha notado un muy pronto desarrollo de algas sobre las superficies y una atracción de especies marinas diversas, incluyendo langostas que buscan refugio en los nichos y sombras que se forman, y peces diversos, incluyendo depredadores, todo lo cual constituye un atractivo para el ecoturismo, hoy tan de moda.

Las Declaraciones de Impacto Ambiental emitidas por el Instituto Nacional de Ecología han resultado de lo más favorable al observarse como se fijaba y se desarrollaba vida marina sobre ellas apenas unas cuantas semanas después de instaladas. La Coordinación General de Obras Marítimas y Portuarias de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes revisó y aprobó los proyectos sin ninguna objeción.<sup>64</sup>

En el aspecto económico, la sencillez de esta tecnología, así como el hecho de que como ya se había comentado, el equipo que se utiliza es pequeño y de bajo costo, lo cual permite que el mantenimiento se realice mediante el empleo de técnicos y con refacciones locales permite que el proceso resulte atractivamente económico. En nuestro país inclusive ello ha dado lugar a que pequeñas comunidades pesqueras hayan podido financiar sus propias obras.

El caso de estos arrecifes artificiales han sido probados en nuestro país, y quizá resultan una opción por los buenos resultados obtenidos en nuestras playas, por el bajo costo que representan y porque cumplen con el objetivo principal que es el de crear vida marina.

Ahora bien, estos tres tipos de arrecifes artificiales son considerados en este trabajo como los más viables por el éxito obtenido en diversos países. De esta manera, pueden ser utilizados para aminorar la presión que existe en los arrecifes naturales y colaborar con una mayor absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Sin embargo, podemos observar que estos arrecifes artificiales están diseñados para ser colocados en la cercanía de las playas, ninguno de ellos plantea la posibilidad de colocarse en el océano. Por lo cual es importante también plantear esa posibilidad, ya que entre más arrecifes artificiales y naturales existan,

---

<sup>64</sup> Mauricio Porraz, Op. cit. p.12

mayor será la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera y en el menor tiempo posible podremos revertir el calentamiento global.

### 3.6 Arrecifes artificiales en alta mar.

La creación de arrecifes artificiales en el océano, parecería ser una idea utópica, sin embargo no es imposible de llevar a cabo, ya que existen proyectos que demuestran la posibilidad de utilizar el océano como principal sumidero de CO<sub>2</sub>, gracias a la capacidad innovadora del ser humano.

La creación de arrecifes en las Palmeras de Dubái es un ejemplo claro de la alta posibilidad que existe de crear arrecifes en el fondo oceánico, debido a que el proyecto únicamente era con fines turísticos, sin embargo al arrojar el artefacto para crear arrecifes, se dieron cuenta en poco tiempo de la presencia de organismos vivos. Es una prueba de la factibilidad de instalarlos en el océano, debido a que en ese lugar nunca se habían formado arrecifes, el entorno tampoco contaba con las características específicas para la generación de los mismos; a pesar de eso solo bastó sumergir un artefacto para que en poco tiempo los animales acuáticos habitaran ahí y formaran el arrecife.

Ahora bien, los arrecifes que se crearon en las Palmeras en Dubái no se encuentran en medio del océano, sin embargo muestran que a pesar de no contar con las condiciones que requiere un arrecife su crecimiento fue posible.

Por otro lado existe otro proyecto que demuestra que el ser humano es capaz de acondicionar el medio para la creación de diversos hábitats, lo cual en este trabajo es muy importante debido a que hay la posibilidad de crear hábitats acuáticos en donde crezcan los arrecifes. El proyecto al que me refiero es el llamado “Biosfera 2” y consiste en una estructura de 1,27 hectáreas (3,15 acres) originalmente construida para formar un ecosistema artificial cerrado en Oracle, Arizona (EE. UU.) por *Space Biosphere Ventures*, compañía que cuenta como principales delegados con John Polk Allen y Margret Augustine. Fue construida entre 1987 y 1991, diseñada para comprender el complejo entramado de interacciones en un ecosistema, así como para estudiar la viabilidad de

biosferas cerradas en la colonización espacial y permitir el estudio y manipulación de una biosfera sin dañar la Tierra. Su nombre se debe a estar modelada sobre una primera biosfera: nuestro ecosistema terrestre. Se financió principalmente a través de la compañía Edward Bass. El proyecto costó 200 millones de dólares y se prolongó de 1985 a 2007.<sup>65</sup>

El lugar es totalmente hermético, lo cual permitió a los científicos monitorear la química del aire, el agua y la tierra contenida en ella. Asimismo, un equipo médico efectuó un seguimiento continuo del estado de salud de la tripulación humana.



FIG. 6 Biosfera 2, Vista exterior. Fuente: <http://images.google.com.mx>

En su interior hay una selva, un océano de 850 m<sup>2</sup> con un arrecife de coral, un manglar de 450 m<sup>2</sup>, 1900 m<sup>2</sup> de sabana, un desierto de 1400 m<sup>2</sup>, 2500 m<sup>2</sup> de tierras cultivables, un hábitat humano con alojamiento y oficinas, y ciertas instalaciones técnicas bajo tierra. Cuentan con sistemas de tuberías independientes, para calefacción y agua fría y la energía eléctrica es proporcionada por una central de gas natural.

---

<sup>65</sup> Reuters, “El proyecto Biósfera 2 ha llegado a su fin” El Universal. México 17 de julio 2006. P. 27

En el 2006 la estructura dejó de ser hermética y la finca, situada en una zona de ciudades dormitorio alrededor de Tucson, fue propuesta para su urbanización y conversión en futura comunidad residencial

El 5 de junio de 2007, la propiedad, incluidas tierras circundantes con una extensión de 668 ha (1650 acres), fue vendida a una promotora de casas residenciales por 50 millones de dólares. Parte del terreno sería destinado a viviendas y a un hotel turístico. La reserva, no obstante, permanecería abierta para su exhibición.<sup>3</sup> El 26 de junio de 2007, la Universidad de Arizona anunció que continuaría con la investigación en Biosfera 2. La noticia acabó con el miedo a la destrucción del famoso terrario de cristal. Responsables de la Universidad comunicaron que gracias a donaciones privadas y becas podrían financiar tanto la investigación como los costes operativos por un espacio de tres años, prorrogables a diez.<sup>66</sup>

El proyecto tuvo muchas críticas, pues decían que los que habitaban la estructura tenían contacto con el exterior, sin embargo nada se comprobó, pero lo que si se logró fue crear diversos ecosistemas en un pequeño espacio, incluyendo los arrecifes artificiales. Con lo que se puede demostrar la capacidad del hombre para crear lo que desee en su entorno.

A pesar de que ninguno de los dos proyectos que mencioné trata sobre construcción de arrecifes en el fondo oceánico, ambos muestran la posibilidad de construir estructuras en cualquier lugar del mundo. Sin embargo para que permanezcan en el océano y cerca de la superficie es necesario crear estructuras flotantes, las cuales ya existen aunque no para ese uso.

Un tipo de estructura de la que hablo, es la que actualmente se encuentra en el Puerto de Mónaco la cual fue construida con la finalidad de ampliar el puerto debido al enorme tráfico marítimo, potenciado fundamentalmente por el turismo, unido a la dificultad de amarre de navíos.

---

<sup>66</sup>[www.wikipedia.com.mx](http://www.wikipedia.com.mx)



El proyecto para ampliar el puerto inició a mediados de los años 80, el Principado encargó la realización de estudios acerca de las condiciones hidrográficas, geotécnicas, estéticas y de impacto ambiental que implicarían la ampliación del puerto, así como cual sería el mejor método o solución constructiva. Numerosos estudios fueron llevados a cabo, la mayoría en laboratorios Europeos, utilizando modelos matemáticos y teniendo en cuenta las condiciones de la obra:

- Zona de gran calado o gran profundidad de la cota de agua respecto del fondo marino: 55 metros.
- La pobre calidad del suelo marino. Esto dificulta el implante de sistemas tradicionales de cimentación.
- La necesidad de minimizar el impacto medioambiental, tanto marino como urbano.<sup>67</sup>

Los estudios derivaron en la construcción de un dique semiflotante como solución más favorable. Las enormes dimensiones del dique rompeolas diseñado, permite la ampliación del puerto de La Condamine en 8.000 m<sup>2</sup>, facilitando el atraque de grandes barcos, además de actuar como dique de abrigo de protección del actual puerto. Sus medidas son las siguientes:

- 352 m<sup>2</sup> de eslora (longitud)
- 28 m de manga o anchura (44m totales en la base del cajón, al disponer de dos alerones estabilizadores de 8m cada uno)
- 19m de puntal (calado)

Imagen: Nuevas obras realizadas:

1. Cajón trapezoidal de 1 Ha, ubicado en la base de Fort Antoine
2. Dique semiflotante
3. Muelle rompeolas
4. Acondicionamiento de diques existentes

---

<sup>67</sup> Construction Chemicals. "Dique semiflotante para la ampliación del puerto de la Condamine (Mónaco)" España, 2003. p. 2

## 5. Reorganización del antiguo puerto

El interior del cajón está acondicionado como almacén para embarcaciones deportivas y aparcamiento para unos 360 vehículos. La cubierta superior alberga las nuevas oficinas de la Autoridad Portuaria, locales, zonas de recreo, un faro-restaurante, paseos peatonales y viales para el tráfico rodado.

Algo interesante de destacar es que debido a la orografía de la costa monegasca así como a sus limitadas instalaciones portuarias para la construcción de este dique, se optó por buscar un puerto relativamente cercano que pudiese albergar una obra de este calibre. Finalmente se decidió ejecutar las obras en la dársena sur del dique seco de Crinavis, en la bahía de Algeciras (Cádiz - España). Dicha Bahía dista el Principado unos 1.500 km.<sup>68</sup>

Tras su construcción en Algeciras, este enorme cajón prefabricado de hormigón fue sometido a flotación y arrastrado vía marítima durante 14 días por dos remolcadores, rumbo a la Costa Azul. Este dato es increíble porque estamos hablando de que lograron transportar el mayor muelle flotante del mundo, constituido por una doble estructura de hormigón armado de 352 m de longitud total, dividida en planta en 7 plots o zonas de 48 m de longitud cada uno, más un último plot de 16 m correspondiente a la zona de la rótula metálica de anclaje.<sup>69</sup>

Todo el trascurso, el dique permaneció flotando por si mismo, lo cual es impresionante a pesar de su peso y el tamaño del mismo.

A su llegada al puerto deportivo del Principado, el dique semiflotante se encastró quedando unido al antiguo puerto, mediante una enorme rótula metálica de 650 toneladas y se ancló al fondo marino mediante cadenas sujetas a pilotes. La flotación del cajón no es libre, con el fin de poder contrarrestar la energía de impacto del oleaje sin experimentar movimientos importantes.<sup>70</sup>

---

<sup>68</sup> *Ibíd.* P. 3

<sup>69</sup> *Ídem.*

<sup>70</sup> *Ibíd.* P. 6

La vida útil del dique está garantizada por un periodo mínimo de 100 años, por lo que los sistemas constructivos así como todos los materiales a utilizar fueron sometidos a estrictos controles de calidad, técnicas, avaladas por pruebas de laboratorios independientes.

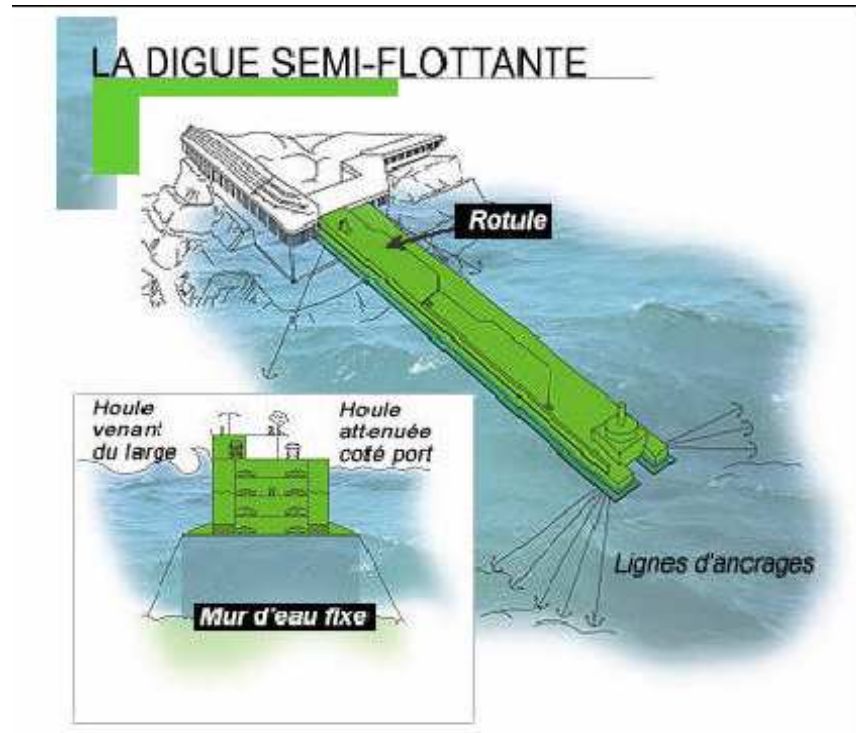


FIG. 7 Flotación limitada mediante una enorme rótula Metálica y cadenas



FIG. 8 Flotación del dique rompeolas. Bahía de Argel 19 de Junio de 2002.

Este dique construido en Algeciras y trasladado a Mónaco, demuestra que podemos utilizar material similar para construir plataformas que sirvan para sujetar arrecifes artificiales. Esta idea es totalmente posible, si consideramos todo el peso que aguanta este tipo de diques, se podrían hablar de estructuras flotantes de este tipo con capacidad de resistir el peso de varios arrecifes artificiales así como la vida acuática que se generen en ellos. Además si juntamos la capacidad innovadora del hombre para crear las condiciones necesarias para la generación de arrecifes, que quedo constatado en el proyecto de Biosfera 2, mas la posibilidad de construir estructuras flotantes en el océano, estaríamos hablando de una solución óptima al cambio climático global. La absorción de CO<sub>2</sub> por parte de arrecifes naturales y artificiales, revertiría el problema climático, siempre que contemos con un número considerable de estructuras en el océano, más la labor de los arrecifes naturales en las costas de algunos países.

La idea de construir arrecifes en el mar parecería utópico, sin embargo existen proyectos que van mucho más lejos, al grado de considerar la posibilidad de que en un futuro el ser humano pueda habitar en profundidades oceánicas gracias a la construcción de ciudades marinas. Existen en la actualidad grandes construcciones con esa intención; mismas que en mi opinión podrían ser utilizadas para el soporte de arrecifes en el océano, incluso algunas de ellas pueden servir para monitorear a los mismos. Estos proyectos han sido probados y ha quedado constatada su eficiencia, sin embargo para muchos la idea de habitar en el océano está lejos de la realidad, y no dejan de considerarlo utópico; pero, si las construcciones de esos artefactos ya existen podrían ser utilizados en algo fructífero para la vida humana, como por ejemplo en la construcción de arrecifes artificiales.

Las imágenes siguiente son ejemplos de estructuras diseñadas por un prestigiado arquitecto francés llamado Jacques Rougerie, que ya existen y que podrían en un momento dado apoyar en la solución al calentamiento global.



FIG. 9. Aqualab. Pequeño Laboratorio bajo el agua. Fuente: <http://www.rougerie.com>



FIG. 10. Aquabulle. Observatorio bajo el agua Fuente: <http://www.rougerie.com>

Ambas imágenes muestran estructuras no muy grandes y que podrían ser utilizadas para monitorear el crecimiento del arrecife así como su comportamiento. Esto podría ser de manera periódica para evitar lo menos posible la intromisión del ser humano y permitir que el arrecife crezca y se desarrolle sin presión alguna.

Todo esto puede ser instalado en los océanos para hacer frente al calentamiento global, a partir del uso de arrecifes naturales y artificiales. Se podría decir que se cuenta con la tecnología para hacerlo; sin embargo, existe un inconveniente mucho mayor que es el derecho de mar, mismo que delimita la jurisdicción de los estados en los mares y océanos. Es importante destacarlo, porque se necesita abarcar grandes extensiones oceánicas para poder hacer frente al calentamiento global y mucho depende de la cooperación internacional para hacerlo, así como a la modificación de ciertas normas como lo veremos a continuación.

### 3.7 Derecho de mar, un obstáculo para la construcción de arrecifes en el océano.

En el ámbito internacional existen ciertas leyes que los países deben de seguir con la finalidad de que exista paz entre las naciones. El derecho de mar, fue creándose ante la necesidad de establecer límites en él por parte de los países. Es importante mencionarlo en la construcción de arrecifes artificiales en el océano, ya que no se puede construir en cualquier lugar de éste y menos que un país decida hacerlo en un lugar fuera de su jurisdicción. Ante el derecho de mar, y la normatividad que de él emana, lo único que puede facilitar la construcción de arrecifes artificiales es la cooperación internacional para frenar el calentamiento global.

Las normas relativas al derecho internacional de mar fueron de carácter generalmente consuetudinario, hasta la I Conferencia de las Naciones Unidas sobre el derecho del mar, celebrada en Ginebra en 1958. Participaron en ella ochenta y seis países, setenta y nueve de los cuales eran miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Como resultado de esta conferencia se adoptaron las siguientes convenciones: a) Convención sobre el mar territorial y la zona continua. b) Convención sobre el alta mar. c) Convención

sobre pesca y conservación de los recursos vivos del alta mar. d) Convención sobre la plataforma continental. A partir de ahí muchas disposiciones sobre el derecho de mar se fueron imponiendo, sin embargo fue hasta 1982 cuando se crea el proyecto definitivo en la conferencia de Montego Bay (Jamaica). La mayoría de los países lo adoptaron, excepto Estados Unidos por su oposición al régimen de explotación de los fondos marinos y oceánico, tampoco la firmó Venezuela, ni España. Sin embargo la Convención sobre el derecho del mar ya es algo más que un conjunto de normas incorporadas en un tratado multilateral; es la auténtica codificación de una costumbre internacional que se formó aceleradamente en los últimos años.<sup>71</sup>

En la convención queda estipulado hasta dónde abarca la jurisdicción de un estado, que corresponde a su territorio terrestre, el espacio aéreo y el dominio marítimo integrado por el mar nacional y el mar territorial. Además, es importante precisar para esta investigación que los estados costeros, gozan de ciertos derechos especiales, sobre la zona contigua, la zona económica exclusiva y la plataforma continental, igual que comparte derechos, en pie de igualdad con los demás Estados miembros de la sociedad internacional, en el alta mar y en la “zona” (que antes de la Convención de 1982 se conocía como “fondos marinos y oceánicos”).

El mar nacional forma parte del territorio del Estado, que tiene sobre él plena soberanía, y está formada por las aguas situadas dentro del límite de sus fronteras terrestres, y de las líneas de base a partir de las cuales se comienza a medir la extensión del mar territorial. Es así como el mar nacional comprende lagos, mares interiores, puertos, ciertas bahías y golfos, canales y los ríos que en todo o en parte no sean internacionales.

Por lo tanto es en el mar nacional donde los estados costeros no tienen ningún problema en construir arrecifes artificiales o llevar a cabo la explotación de las especies que habitan en esta zona, ya que tienen plena jurisdicción.<sup>72</sup>

---

<sup>71</sup> Modesto Seara Vázquez “Derecho Internacional Público”. Editorial Porrúa, México 2001. P. 275

<sup>72</sup> María del Carmen Rodríguez Hernández y Claudia Hernández Fernández “La reglamentación internacional del medio marino”. (Compiladoras, “Océano: ¿fuente inagotable de recursos?”, UNAM-SEMARNAP, México, 1999, pp. 423

Por otro lado está el mar territorial, el cual es el espacio marítimo situado entre el mar nacional y el alta mar. Forma parte del territorio del Estado, que ejerce sobre él plena soberanía aunque sometida a ciertas limitaciones. Estas últimas quedaron establecidas en la Convención de Montego Bay de 1982, la cual establece en su artículo 3: “Todo Estado tiene derecho a establecer la anchura de su mar territorial, hasta un límite que no exceda de 12 millas marinas, medidas a partir de líneas de base determinadas de conformidad con la convención.”

El límite externo queda fijado a una distancia máxima de doce millas, en línea recta, de las líneas de base, que son a su vez el límite externo de las aguas interiores o mar nacional, y se definen del modo siguiente: a) líneas de bajamar a lo largo de las costas; b) si hay arrecifes, será la línea de bajamar del lado del arrecife que da al mar; c) líneas de base recta, cuando la costa tenga profundas aberturas y escotaduras o en los que hay una franja de islas a lo largo de la costa situada en su proximidad inmediata.

Las doce millas están fijadas en la Convención de 1982 anchura máxima, lo que quiere decir que los Estados pueden darle a su mar territorial la extensión que deseen dentro de ese límite. Asimismo, está permitido el cruce de buques extranjeros, bajo el derecho de paso inocente por el mar territorial, mismo que debe ser sin escales e ininterrumpido.

Por lo tanto en el mar territorial, los estados también tienen plena jurisdicción, por lo menos hasta las 12 millas náuticas que establece el derecho internacional, hasta ese límite no existirán problemas en caso de que decidieras construir arrecifes artificiales.

Entre el mar nacional y territorial, que forman parte del territorio del Estado y el alta mar, donde impera el principio de libertad y predomina el interés general de la sociedad internacional, frente al de los Estados individuales, hay unas instituciones que se caracterizan por el goce de derechos particulares del Estado costero. Son éstas las de la zona contigua, la plataforma continental y la zona económica exclusiva.



La zona contigua, es la parte de mar vecina del mar territorial, y sobre la cual el Estado costero puede ejercer una serie de competencias de carácter limitado. Estas competencias se refieren principalmente al control necesario para impedir y castigar posibles violaciones, dentro del territorio o el mar territorial, a sus leyes y reglamentos en materia de aduanas, fiscal, migratoria y sanitaria.<sup>73</sup>

La extensión máxima de la zona contigua no podrá superar las veinticuatro millas, contadas a partir de las líneas de base de las aguas territoriales. En esta zona el Estado no tiene plena jurisdicción, por lo que la construcción de arrecifes no se podría llevar a cabo de manera unilateral.<sup>74</sup>

La plataforma continental es el lecho y el subsuelo de las áreas submarinas que se extienden más allá de su mar territorial y a todo lo largo de la prolongación natural de su territorio hasta el borde exterior del margen continental, o bien hasta una distancia de 200 millas marinas contadas desde las líneas de base a partir de las cuales se mide la anchura del mar territorial, en los casos en que el borde exterior del margen continental no llegue a esa distancia.

En la plataforma continental, el Estado costero tiene derechos exclusivos de explotación de los recursos naturales que allí se encuentran; esto es, los recursos minerales y no vivos, del suelo y subsuelo, y los recursos vivos de especies sedentarias. Calificar a esos derechos como de soberanía es bastante discutible, pero eso es lo que la Convención establece, y su ejercicio exclusivo corresponde al Estado costero, e independientemente de que los ejerza o no, ningún otro Estado podrá emprender actividades de explotación sin consentimiento del Estado costero.<sup>75</sup>

Los derechos sobre la plataforma continental no tiene incidencia sobre la condición jurídica de las aguas suprayacentes ni del espacio aéreo situado encima; tampoco podrá dar lugar a

---

<sup>73</sup> *Ibíd.*, p. 427

<sup>74</sup> *Ídem.*

<sup>75</sup> *Ibíd.*, p. 430

interferencia alguna con la navegación y otros derechos y libertades previstos en la Convención.

En esta zona es claro que el Estado costero tiene cierta soberanía para realizar algunas actividades, sin embargo en la Convención no establece plena jurisdicción, ya que otros estados tienen la libertad de navegar por ahí y en el caso de construir arrecifes artificiales existirían conflictos, ya que obstaculizarían el paso. Por lo que, en caso de hacerse debe existir una perfecta planeación, para no generar problemas de otro tipo y sobre todo debe darse el consentimiento de los otros Estados, esto debe hacerse a pesar de que la convención otorga mayor preferencia a los Estados costeros; pero solo lo hace en lo que refiere a la explotación de recursos.

Por otro lado se encuentra la zona económica exclusiva que es un área situada más allá del mar territorial y adyacente a éste, donde el Estado costero goza de una serie de derechos, que la Convención de 1982 enumera en su artículo 56:

- a. Derechos de soberanía, “para los fines de exploración y explotación, conservación y administración de los recursos naturales tanto vivos como no vivos” de las aguas, lecho y subsuelo del mar.
- b. Jurisdicción respecto al establecimiento y utilización de islas artificiales, instalaciones y estructuras, así como la investigación científica marina, la protección y preservación del medio marino.<sup>76</sup>

Los otros Estados tienen también una serie de derechos en las zonas económicas exclusivas ajenas: libertad de navegación, sobrevuelo, tendido de cables y tuberías submarinas.

Esta zona es importante, pues según lo que establece la Convención, los Estados costeros pueden construir o autorizar la construcción de estructuras en la zona económica exclusiva, por lo que no existiría ningún problema en establecer grandes plataformas que sostengan arrecifes artificiales para revertir el cambio climático global y al mismo tiempo conservar

---

<sup>76</sup> Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. “Ley Federal del Mar”. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de enero de 1986, p. 11

las especies que en ellos habitan. Sin embargo, nuevamente debe darse la cooperación con el resto de las naciones para señalar zonas por donde puedan atravesar las embarcaciones, sin perjudicar a los arrecifes artificiales.

Finalmente esta el alta mar que se entiende como la parte del mar, más allá de los límites externos de la zona económica exclusiva. Se caracteriza por los principios de igualdad y libertad. La igualdad significa que todos los Estados tienen los mismos derechos y las mismas obligaciones, independientemente de su tamaño y poder o de que tengan costas o sean países sin litoral.<sup>77</sup>

La libertad de los mares se entiende en los siguientes aspectos principales:

- a. Libertad de navegación, según el cual, “todos los Estados, sean ribereños o sin litoral, tienen el derecho de que los buques que enarbolan su pabellón naveguen en alta mar”
- b. Libertad de pesca, que implica que todos los Estados tienen derecho a que sus nacionales realicen actividades de pesca en alta mar, siempre que respeten las normas para la protección de los recursos vivos.
- c. Libertad de tender cables y tuberías submarinos.
- d. Libertad de sobrevuelo.
- e. Libertad de construir islas artificiales y otras instalaciones; sin que se pueden construir en lugar que interfieran con la navegación en rutas establecidas.
- f. Libertad de investigación científica, que debe ser con fines pacíficos.<sup>78</sup>

Por lo tanto en alta mar también existe la posibilidad de llegar a un consenso internacional y construir arrecifes artificiales. Evidentemente, se requiere la participación de varios Estados para construir el mayor número posible de ellos y con eso contrarrestar el calentamiento global. Nuevamente es necesario planearlo debidamente para no evitar el cruce de embarcaciones y provocar y desastre ecológico.

---

<sup>77</sup> Ídem.

<sup>78</sup> Modesto Seara Vázquez, Op. Cit, p. 280

Lo primordial es que exista un trabajo en conjunto por parte de la sociedad internacional y un verdadero interés en revertir el calentamiento global. No es el momento de buscar culpables, finalmente todos en menor o mayor proporción estamos causando nuestra destrucción y es por eso el deber es encontrar una solución. Es un hecho que la producción masiva de gases de efecto invernadero se concentra principalmente en los países de altas latitudes y boreales; pero el contraveneno más eficiente se encuentra en las latitudes tropicales, bajo el mar. El trabajo en conjunto será ideal ya que algunos estados tienen los recursos económicos para llevar a cabo la construcción de arrecifes y los otros cuentan con los recursos naturales para lograrlo.

Debemos hacer algo de manera inmediata, mientras más pasa el tiempo más será el deterioro del medio ambiente y se acercará con mayor prontitud el final de la vida del hombre en el planeta. Es el momento de que todo problema económico, político o social pase a segundo plano, con la finalidad de responder al llamado de nuestro medio ambiente, para ello es necesaria la cooperación en todo ámbito social, ya que la construcción de arrecifes puede ayudar a revertir el problema, pero si seguimos gastando energía como hasta ahora nunca lograremos ese objetivo. No podemos dejar toda la labor a los arrecifes naturales y artificiales, el hombre debe disminuir sus emisiones de CO<sub>2</sub>, su hábito de consumo excesivo de energía y todo lo que este en sus manos para evitar que el cambio climático global siga avanzando.

#### **Capítulo 4. Comparación entre los arrecifes naturales y artificiales con otros métodos para almacenar CO<sub>2</sub>.**

El calentamiento global se ha convertido en la actualidad el mayor problema para la supervivencia de la humanidad, pero también, su solución representa un reto en el ámbito internacional. La preocupación cada vez es mayor, dando como resultados cientos de investigaciones que pretenden minimizar el problema, pero que hasta la fecha ninguna tiene aspectado revertirlo.

Una de las propuestas más sobresalientes ha sido el cambio de fuentes de energía, cuya intención es minimizar el uso de los hidrocarburos que han sido los principales causantes del calentamiento global. Evidentemente esta alternativa no tiene nada que ver con sepultar CO<sub>2</sub>, sino más bien emitirlo en menor proporción. Existen países que tienen proyectos muy desarrollados en la materia, algunos de ellos incluso abastecen de energía a su población a partir de nuevas fuentes de energía.

Las energías renovables más sobresalientes en las que se trabaja actualmente son:

- La energía eólica que es la energía cinética o de movimiento que contiene el viento, y que se capta por medio de aerogeneradores o molinos de viento.
- La energía hidráulica, consistente en la captación de la energía potencial de los saltos de agua, y que se realiza en centrales hidroeléctricas.
- La energía mareomotriz, que se obtiene de las mareas (de forma análoga a la hidroeléctrica).
- La undimotriz, a través de la energía de las olas.
- La energía solar, recolectada de forma directa en forma de calor a alta temperatura en centrales solares de distintas tipologías, o a baja temperatura mediante paneles solares domésticos, o bien en forma de electricidad utilizando el efecto fotoeléctrico mediante paneles fotovoltaicos .
- La energía geotérmica, producida al aprovechar el calor del subsuelo en las zonas donde ello es posible.
- La biomasa, por descomposición de residuos orgánicos, o bien por su quema directa como combustible.

Estas fuentes alternas de energía pretenden sustituir el uso de hidrocarburos por lo menos en materia energética; sin embargo, no contemplan como una mejor opción la disminución del uso de energía, debido a que su consumo representa uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. Lo anterior solo se refiere a términos económicos, porque es un hecho que para la subsistencia del ser humano lo ideal sería disminuir el uso de energía, y no solo sustituirla por otra.

Es evidente que el uso de fuentes alternas de energía, pretenden únicamente cubrir la demanda a nivel mundial, a partir de la “crisis energética”, y con eso mantener el modelo económico actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, lo cual exige también una demanda igualmente creciente de energía.

Por otro lado no todos los países cuentan actualmente con el desarrollo tecnológico para sustituir a los hidrocarburos, lo cual representa un gran inconveniente, pues lo que se necesita es actuar de manera inmediata y contar con la participación de la comunidad internacional para obtener resultados satisfactorios. Es muy probable que ante la escasez del petróleo, muchos países deban recurrir al uso de fuentes alternas de energía, sin embargo, el coste de las mismas será muy elevado pues solo algunos países las han desarrollado y es muy seguro que vendan su tecnología. La realidad es que actualmente las fuentes de energía renovable abastecen solo el 13% de la demanda energética primaria mundial, mientras que alrededor del 80% del suministro de energía primaria proviene aún de los combustibles fósiles.

A pesar de eso, las fuentes renovables son una realidad para el futuro, pero a mi parecer no representan la solución al calentamiento global, al menos a corto y mediano plazo. Además solo sustituyen a los hidrocarburos en cuestión energética, pero no sustituye al petróleo en lo que respecta a los productos que se obtienen de él, por lo que se seguirá utilizando este recurso por algunos años más hasta encontrarle un sustituto. Posiblemente las emisiones se disminuyan pero aún se estaría lejos de revertir el calentamiento global y por lo tanto asegurar la permanencia del ser humano en el planeta tierra.

Existen proyecciones que dejan en claro que faltan algunos años para que las fuentes alternas de energía logren dar frutos. Una de esas proyecciones señala que para el año 2050, alrededor del 77% de la electricidad se producirá a partir de fuentes de energía renovable (incluyendo las grandes centrales hidroeléctricas), por lo que tenemos que esperar todavía 40 años y en ese tiempo no se habrá sustituido por completo el uso de hidrocarburos. Para ese mismo año el 56% de la demanda de energía primaria será cubierta por fuentes de energía renovable, mientras que el resto por las fuentes de energía convencionales.<sup>79</sup>

En caso de que lo señalado en esta proyección suceda, las emisiones de CO2 disminuirían de 24.350 millones de toneladas en 2003 a 10.590 millones de toneladas en 2050. Se produciría una caída de las emisiones anuales per cápita de 3,8 toneladas/cápita a 1,2 toneladas/cápita. A pesar del cierre de las centrales nucleares y del aumento de la demanda de electricidad, disminuirían de forma importante las emisiones de CO2 en el sector eléctrico.<sup>80</sup>

Asimismo es posible que a largo plazo, las mejoras en eficiencia y el mayor uso de vehículos eléctricos renovables, así como una notable expansión del transporte público, reduzcan aún más las emisiones de CO2 en el sector del transporte. Con una cuota del 35% del total de emisiones en 2050, el sector eléctrico disminuiría notablemente, aunque seguirá siendo la principal fuente de emisiones de CO2, seguido del transporte y de la industria.<sup>81</sup>

A pesar de que existirá esta disminución, nuevamente es a largo plazo y no se podrá hacer nada con las emisiones que ya existen en nuestro ambiente. Con lo anterior, no quiero decir que no sea importante, pero no representa la solución inmediata que se le debe dar al cambio climático global.

---

<sup>79</sup> Greenpeace y European Renewable Energy Council “Revolución Energética. Una perspectiva energética mundial sostenible” España, Noviembre 2008, p. 4.

<sup>80</sup> *Ibíd.*, p. 6

<sup>81</sup> *Ídem.*

Asimismo en cuestión de costos, existen muchos países que no podrían adquirir esa tecnología. Los costes de generación de electricidad son ligeramente mayores comparados con los combustibles convencionales pero hay quienes consideran que se pueden ver compensados, en gran medida, por la reducción de la demanda de electricidad. Se provee un coste adicional del suministro de electricidad máximo de 10 mil millones de dólares por año para 2010. Estos costes adicionales, seguirán disminuyendo después de 2010, llegando a ser para el 2050 más económicos que el mismo petróleo.

Es evidente que las fuentes alternas de energía, ayudarán en el futuro a disminuir en gran medida las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por la generación de electricidad, para que esto suceda es importante desarrollarlas en todo el mundo con la finalidad de ir sustituyendo a los hidrocarburos. Es una buena medida, pero la construcción de arrecifes demuestra una solución inmediata, pues con ellos se disminuiría la cantidad de CO<sub>2</sub> que ya existe en la atmósfera de manera definitiva. Pero para cualquier proyecto cuya finalidad sea disminuir el CO<sub>2</sub> de la atmósfera debe ir acompañado por el compromiso del ser humano de disminuir su consumo energético.

#### 4.1 Métodos para la captación y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Otro de los métodos que pretende reducir las emisiones de dióxido de carbono y que es la más parecida a la construcción de arrecifes artificiales es la captación y almacenamiento de dióxido de carbono, en formaciones geológicas, en el océano, en carbonatos minerales, o para ser utilizado en procesos industriales.

El método consiste en la separación del CO<sub>2</sub> emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo. Es considerado como uno de las mejores opciones para estabilizar las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. Y consiste en alternativa al calentamiento global muy similar a la de los arrecifes por su capacidad de absorber CO<sub>2</sub>.

Las grandes fuentes puntuales donde puede aplicarse la captación de CO<sub>2</sub>, son las instalaciones de combustibles fósiles o de energía de la biomasa de grandes dimensiones, las principales industrias emisoras de CO<sub>2</sub>, en la producción de gas natural, en las plantas



de combustible sintético y en las plantas de producción de hidrógeno alimentadas por combustibles fósiles.

#### 4.1.1 Almacenamiento en formaciones geológicas

Como lo mencioné anteriormente existen diversos lugares de almacenamiento. En lo que respecta a las formaciones geológicas existen tres que han sido objeto de una amplia consideración para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>: yacimientos de petróleo y gas, formaciones salinas profundas y capas de carbón inexplorables. En cada caso, el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> se consigue mediante su inyección en forma condensada en una formación rocosa subterránea.<sup>82</sup>

Las formaciones rocosas porosas que retienen o que han retenido fluidos anteriormente (como gas natural, petróleo o salmuera) son candidatos potenciales para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Las formaciones aptas para el almacenamiento pueden aparecer en cuencas sedimentarias terrestres y marítimas (depressiones naturales a gran escala situadas en la corteza terrestre que se llenan de sedimentos). Las capas de carbón también pueden utilizarse para almacenar CO<sub>2</sub> cuando sea poco probable que el carbón sea explotado posteriormente y siempre que la permeabilidad sea suficiente. La opción de almacenar CO<sub>2</sub> en capas de carbón y mejorar la producción de metano aún está en la fase de demostración.<sup>83</sup>

Actualmente hay tres proyectos de almacenamiento a escala industrial en funcionamiento: el proyecto Sleipner en una formación salina marítima en Noruega, el proyecto Weyburn de recuperación mejorada de petróleo en Canadá, y el proyecto In Salah en un yacimiento de gas de Argelia. Hay otros proyectos previstos, pero aún no se han concretado.<sup>84</sup>

---

<sup>82</sup> Jorge Loredó Pérez, Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible.

“Almacenamiento de CO<sub>2</sub> en capas de carbón en la cuenca carbonífera central asturiana”. España, p. 13

<sup>83</sup> Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático global PNUMA, “La Captación y almacenamiento de dióxido de carbono”. Resumen para responsables de políticas y Resumen Técnico. 2005, p. 30

<sup>84</sup> Ídem.

Las estimaciones representativas de los costos de almacenamiento en formaciones salinas y yacimientos petrolíferos y de gas agotados es aproximadamente de 8 dólares por cada tonelada de CO<sub>2</sub> inyectado. Los costos de vigilancia, que varían entre 0,1 y 0,3 dólares de los EE.UU. por tonelada de CO<sub>2</sub>, son adicionales. Los costos de almacenamiento más bajos corresponden a los depósitos terrestres, de poca profundidad y alta permeabilidad, y/o los lugares de almacenamiento en que los pozos y la infraestructura de yacimientos petrolíferos y de gas existentes pueden ser reutilizados.

#### 4.1.2 Almacenamiento oceánico

Una posible opción de almacenamiento de CO<sub>2</sub> consiste en inyectar el CO<sub>2</sub> captado directamente en los fondos oceánicos (a más de mil metros de profundidad), en que la mayor parte quedaría aislada de la atmósfera durante siglos. Ello puede lograrse mediante el transporte de CO<sub>2</sub> por gasoductos o buques a un lugar de almacenamiento oceánico, donde se inyecta en la columna de agua del océano o en los fondos marinos. Posteriormente, el CO<sub>2</sub> disuelto y disperso se convertiría en parte del ciclo global del carbono.<sup>85</sup>

El almacenamiento oceánico continúa en la fase de investigación, pues aún no existe ninguna demostración que demuestre su eficiencia. No obstante, se han realizado experimentos sobre el terreno a pequeña escala, así como 25 años de estudios teóricos, de laboratorio y modelos de almacenamiento oceánico de CO<sub>2</sub>.

Si bien se carece de experiencia respecto del almacenamiento oceánico, se ha tratado en ciertas ocasiones de estimar los costos de los proyectos de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en cuyo marco se liberaría CO<sub>2</sub> en el fondo del mar o en las profundidades oceánicas. En el siguiente cuadro se estima el costo aproximado de sepultar CO<sub>2</sub> en el océano.

---

<sup>85</sup> *Ibíd.*, p. 37

Método de almacenamiento oceánico	Costo (US\$/tCO2 inyectado, neto)	
	A 100 km de la costa	A 50 km de la costa
Gasoducto fijo	6	31
Buque/plataforma de desplazamiento	12-14	13-16

Los costos de captación de CO<sub>2</sub> y de su transporte hasta la costa (por ejemplo, por gasoductos) no están comprendidos en el costo del almacenamiento oceánico. No obstante, los costos de los gasoductos marítimos o los buques, así como cualquier costo energético adicional, sí están incluidos en el costo del almacenamiento oceánico.<sup>86</sup>

Las cifras indican que, para las distancias cortas, la opción de los gasoductos fijos resultaría más económica. Para las distancias más largas, el buque en desplazamiento o el transporte por barco hasta una plataforma con la inyección posterior serían posibilidades más atractivas.

#### 4.1.3 Carbonatación mineral y usos industriales

Existen otras dos opciones para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. La primera es la carbonatación mineral, que se refiere a la conversión de CO<sub>2</sub> en carbonatos inorgánicos sólidos mediante reacciones químicas. La segunda opción consiste en el uso industrial del CO<sub>2</sub> de forma directa o como materia prima para la producción de diversas sustancias químicas que contienen carbono.

##### 4.1.3.1 Carbonatación mineral

*Esta opción corresponde a los arrecifes, ya que la carbonatación mineral se refiere a la fijación de CO<sub>2</sub> mediante el uso de óxidos alcalinos y alcalinotérreos, como el óxido de magnesio (MgO) y el óxido de calcio (CaO), que están presentes en las rocas de silicatos de formación natural como la serpentina y el olivino. Las reacciones químicas entre estos materiales y el CO<sub>2</sub> producen compuestos como el carbonato de magnesio (MgCO<sub>3</sub>) y el*

---

<sup>86</sup> *Ibíd.*, p. 39

carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ , comúnmente conocido como piedra caliza). La cantidad de óxidos metálicos presentes en las rocas de silicatos que pueden encontrarse en la corteza terrestre excede de las cantidades necesarias para fijar todo el  $\text{CO}_2$  que produciría la combustión de todas las reservas de combustibles fósiles existentes.<sup>87</sup>

Estos óxidos también aparecen en pequeñas proporciones en algunos desechos industriales, como la escoria y las cenizas del acero inoxidable. La carbonatación mineral produce sílice y carbonatos que se mantienen estables durante largos períodos de tiempo y que, por tanto, pueden eliminarse en zonas como las minas de silicato o pueden reutilizarse con fines de construcción, si bien es probable que esa reutilización sea mínima en relación con las cantidades producidas. Tras la carbonatación, el  $\text{CO}_2$  no sería liberado en la atmósfera. Como consecuencia, apenas sería necesario vigilar los lugares de eliminación y los riesgos conexos serían casi insignificantes. Es difícil estimar el potencial de almacenamiento en esta fase inicial de desarrollo. En todo caso, estaría limitado por la fracción de reservas de silicatos cuya explotación sea posible desde el punto de vista técnico, por cuestiones ambientales como el volumen de la eliminación de productos, y por obstáculos jurídicos y sociales relacionados con el lugar de almacenamiento.<sup>88</sup>

El proceso de carbonatación mineral se produce de forma natural y se conoce como “meteorización”. Uno de los inconvenientes que existen es que en la naturaleza, el proceso es muy lento, sin embargo en el caso de arrecifes la formación de los esqueletos de carbonato de calcio se da en pocas semanas, por lo que en un lapso de 10 años se tendrían arrecifes completamente formados y absorbiendo  $\text{CO}_2$  de manera natural. El tiempo no es muy largo si consideramos las otras opciones como el uso de fuentes alternas de energía que pronostican una disminución de  $\text{CO}_2$  hasta dentro de 50 años. Asimismo, en caso de querer acelerar el proceso, existen métodos que están investigando para lograrlo.<sup>89</sup>

Desafortunadamente, no han sido considerados los arrecifes naturales y artificiales en este proceso. Las investigaciones realizadas se refieren más a un proceso comercial, en el que se

---

<sup>87</sup> Jorge Loredo Pérez. Op. Cit, p. 14

<sup>88</sup> Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático global PNUMA. Op. Cit, p. 42

<sup>89</sup> *Ibíd.*, p. 46

requeriría la explotación minera, la trituración y la molienda de los minerales, así como su transporte a una planta de tratamiento que reciba un flujo concentrado de CO<sub>2</sub> de una planta de captación. La energía requerida para este proceso de carbonatación oscilaría entre el 30 y el 50 por ciento de la salida de la planta de captación.

Un sistema de almacenamiento de CO<sub>2</sub> con carbonatación mineral requeriría un insumo energético por kWh del 60 al 180 por ciento más que una central eléctrica de referencia sin captación ni carbonatación mineral. El mejor caso que se ha estudiado hasta la fecha es el de la carbonatación húmeda de olivino de silicato natural. El costo estimado de este proceso varía entre 50 y 100 dólares de los EE.UU. por tonelada neta de CO<sub>2</sub> mineralizado (además de los costos de captación y transporte de CO<sub>2</sub>, pero teniendo en cuenta las necesidades energéticas adicionales).<sup>90</sup>

El proceso de carbonatación mineral requeriría la explotación de entre 1,6 y 3,7 toneladas de silicatos por cada tonelada de CO<sub>2</sub>, y produciría de 2,6 a 4,7 toneladas de materiales desechables por cada tonelada de CO<sub>2</sub> almacenado como carbonatos. Por tanto, se trataría de una operación de grandes dimensiones, con un impacto ambiental similar al de las actuales actividades de explotación minera a cielo abierto y a gran escala.<sup>91</sup>

Con lo que podemos observar que este método además de utilizar mucha energía, tiene un fuerte impacto ambiental y un costo más elevado que los anteriormente mencionados, por lo que no resulta ser viable para la solución inmediata y global que deseamos darle al calentamiento global. Lo anterior solamente en lo que respecta al método utilizado para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> a partir de la carbonatación mineral, sin que eso incluya la construcción de arrecifes, que aún no han sido estudiados en el ámbito internacional como una solución al calentamiento global.

---

<sup>90</sup> Ídem.

<sup>91</sup> Ídem.

#### *4.1.3.2 Uso Industrial*

Los usos industriales del CO<sub>2</sub> comprenden los procesos químicos y biológicos en donde el CO<sub>2</sub> actúa como reactivo, por ejemplo, los que se utilizan para la producción de urea y metanol, así como diversas aplicaciones tecnológicas que usan directamente el CO<sub>2</sub>, como en el sector hortícola, la refrigeración, el envasado de alimentos, la soldadura, las bebidas y los extintores de incendios.<sup>92</sup>

Los usos industriales del CO<sub>2</sub> pueden contribuir a mantenerlo fuera de la atmósfera mediante su almacenamiento en el “depósito químico de carbono (las reservas de productos manufacturados carbonatados). Es una opción al cambio climático solo si la cantidad y duración del almacenamiento de CO<sub>2</sub> es significativas. La duración típica de la mayor parte del CO<sub>2</sub> utilizado actualmente para los procesos industriales corresponde a períodos de almacenamiento de tan sólo días a meses. Posteriormente, el carbono almacenado es degradado a CO<sub>2</sub> para ser emitido de nuevo a la atmósfera. Esas escalas cronológicas tan breves no aportan una contribución válida a la mitigación del cambio climático.

#### 4.2 Aspectos legales.

Al igual que los arrecifes artificiales, el almacenamiento geológico, oceánico y la carbonatación mineral cuentan con ciertos inconvenientes legales. En el caso del almacenamiento terrestre muy pocos países han desarrollado marcos jurídicos y normativos, lo cual es importante que se considere debido a que pueden surgir problemas como fugas de CO<sub>2</sub> a la atmósferas o impacto ambiental, en donde si existieran regímenes de vigilancia, se podría determinar la responsabilidad.

Por otro lado en el derecho internacional consuetudinario, los Estados pueden ejercer su soberanía en su territorio y, por tanto, podrían emprender actividades como el almacenamiento de CO<sub>2</sub> (tanto geológico como oceánico) en las zonas que se encuentren dentro de su jurisdicción. Aunque en caso de que el almacenamiento fuera transfronterizo, los Estados tienen la responsabilidad de asegurarse de que las actividades realizadas dentro

---

<sup>92</sup> *Ibíd.*, p. 47

de su jurisdicción o bajo su control no causen daños al medio ambiente de otros, así como en zonas que se encuentren fuera de los límites de la jurisdicción nacional.

En lo que respecta al almacenamiento oceánico, existe una limitante internacional que es el derecho de mar, en el que al igual que la construcción de arrecifes, los Estados no tienen plena jurisdicción y debe existir cierto consenso en caso de querer efectuarse, para no dañar a terceros países.

Finalmente, la carbonatación mineral puede tener un impacto ambiental similar al propiciado por las actividades de explotación minera a cielo abierto, por lo que seguramente habrá normas ambientales que no permitan a gran escala esta actividad porque nuevamente se estaría dañando al medio ambiente, lo que no tendría lógica si lo que deseamos es el efecto contrario.

En el caso de la construcción de arrecifes artificiales, también sabemos que existen obstáculos jurídicos para su construcción, sin embargo pueden eliminarse con la cooperación de la comunidad internacional y el apoyo de todas las naciones.

#### 4.3 Zonas de mayor potencial

En el mundo hay varios países que pueden llevar a cabo la captación y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>, de acuerdo a los métodos anteriormente señalados. De acuerdo a este esquema serán los países nórdicos donde se halle la solución, por ser éstos los que cuentan con la tecnología, al ser los que más han explotado el subsuelo con la finalidad de extraer hidrocarburos y sin dejar a un lado que son ellos los principales causantes del calentamiento global. Por lo que tienen una solución a todo el daño generado al medio ambiente.

En el siguiente mapa se muestran la distribución mundial de las grandes fuentes estacionarias de CO<sub>2</sub>, mismas que se encuentran en zonas industriales y urbanas. Muchas de estas fuentes están a pocos kilómetros de zonas que podría ser apropiada para el almacenamiento geológico.



FIG. 11 Fuentes estacionarias de CO<sub>2</sub>. Fuente: Compilación de información de dominio público sobre fuentes de emisión mundiales, Agencia Internacional de Energía – gases de efecto invernadero, 2002. [www.iea.org](http://www.iea.org)

El siguiente mapa ejemplifica claramente, que los países que se encuentran ubicados al norte son los que mas consumen energía y por lo tanto los que emiten grandes cantidades de CO<sub>2</sub>.

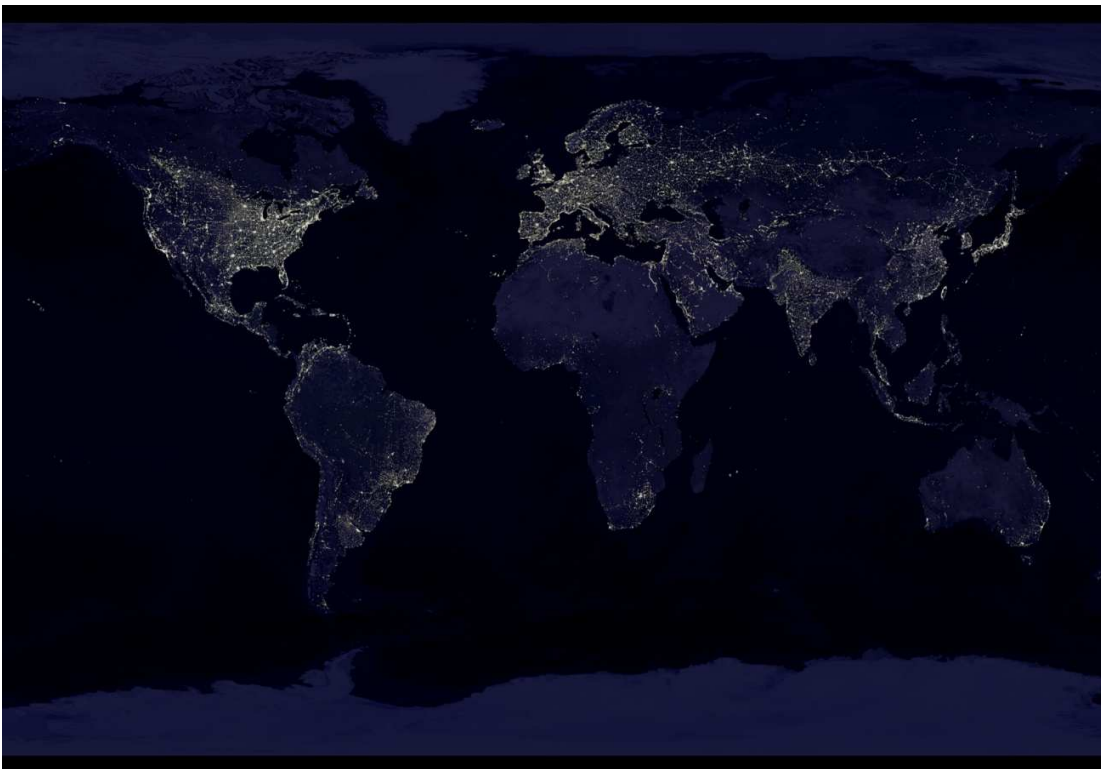
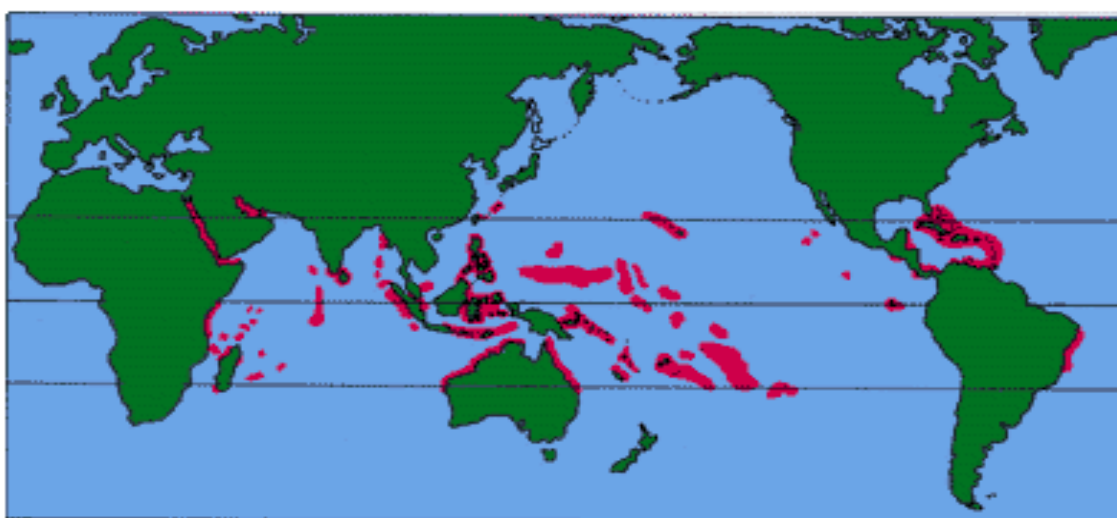


FIG. 12. Países con más consumo de energía.



En el caso de los arrecifes naturales y artificiales, vistos como la solución al calentamiento global no depende ahora de los países desarrollados que paradójicamente son los que mas contaminan, y que se encuentran en las latitudes boreales templadas; más bien el contraveneno más eficiente se encuentra, bajo este esquema, en las latitudes tropicales, bajo el mar.

El siguiente mapa muéstralas zonas donde existen arrecifes y por lo tanto estratégicas para lograr la disminución de CO2 de la atmósfera.



### **Coral Reef Hotspots Around the World**

FIG. 13. Zonas con arrecifes. Fuente: Conferencia del Dr. Roger Mauvois. “Importancia ambiental de los arrecifes coralinos” ESIA-TICOMAN.

De esta manera existen diversos métodos que pueden emplearse de manera inmediata para eliminar las altas concentraciones de CO2 de la atmósfera, tanto los países industrializados como los que están en vías de desarrollo tienen la posibilidad de tomar acciones claras para lograrlo. Es decir, si los países nórdicos cuentan con la tecnología y los lugares para sepultar CO2 de manera exitosa, sería conveniente que lo hicieran. En el caso de la construcción de más arrecifes artificiales en las zonas tropicales, es una medida que

también debe ser adoptada por el reto de los países en pro del medio ambiente y de la humanidad.

En el primer caso es claro que solo puede llevarse a cabo la captación y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en ciertas zonas que sean viables geológicamente hablando. En el caso de los arrecifes existe una opción que contempla una solución más global, pues pueden construirse también en alta mar y con ello lograr una mayor captación, siempre y cuando exista la participación de todos los países tanto industrializados como los que están en vías de desarrollo. Los primeros pueden colaborar con la tecnología y el capital monetario, mientras que los segundos con los recursos naturales necesarios y el conocimiento técnico en lo que respecta a la construcción de arrecifes ya que cuentan con la experiencia necesaria para preservar ese hábitat.

#### 4.4 Costos de los arrecifes artificiales.

Desafortunadamente no existe mucha experiencia en la construcción de arrecifes artificiales. La mayoría de los países ante el calentamiento global prefieren invertir en la preservación de sumideros de CO<sub>2</sub> como los bosques, a pesar de que sea una medida ineficiente y muy costosa. La compra-venta de dióxido de carbono continúa siendo uno de los mercados más exitosos económicamente pero totalmente defectuosos en materia ambiental. Los países industrializados se gastan millones de pesos por cada compra de tonelada de carbono. Simplemente en 2003, la compra y venta mundial de bonos de carbono sumó 78 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>; para 2005, aumentó a 799 millones de toneladas, con un valor de 9 mil 401 millones de euros, y en 2006 se comercializaron 1 mil 600 millones de toneladas por 22 mil 500 millones de euros. Durante ese año, los países europeos dominaron el mercado de carbono con 86 por ciento del total de compras. Según el Fondo Mexicano del Carbono (Fomecar) –constituido por el Banco Nacional de Comercio Exterior (Bancomext) – cada tonelada de CO<sub>2</sub>, o bono de carbono, tiene un valor de 15 dólares.<sup>93</sup> Por lo que podemos darnos cuenta los miles de millones de dólares que se

---

<sup>93</sup> Instituto Nacional de Ecología. “Proyectos de bonos de carbono” México, 2007. En [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

emplean en este mercado, que a la fecha no ha dado el resultado deseado en términos ecológicos.

Los arrecifes artificiales, pueden representar un gasto también de millones de dólares, dependiendo el tipo de construcción, pero nada comparado con el capital monetario que se ha invertido hasta la fecha en el mercado de carbono. Asimismo, representa también una mejor opción frente al costo tecnológico que implican las fuentes alternas de energía y los métodos geológicos de captación de CO<sub>2</sub>, que ya han sido mencionados anteriormente.

Existen todo tipo de costos en arrecifes artificiales, algunos incluso se han construido de manera gratuita ante la donación de embarcaciones con ese fin. En México, por ejemplo la Secretaría de Marina ha donado al Estado de Quintana Roo, embarcaciones con desperfectos, para la formación de dicho hábitat. Asimismo, existen otros que se han construido con palos de bambú cuyos precios oscilan entre los 10 y 20 dólares. También muchos países han empleado llantas viejas con esa finalidad, pero desafortunadamente el resultado ha sido totalmente adverso para el medio ambiente.

En este trabajo no se pretende proponer ninguna de esas soluciones ya que los resultados serían pobres para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> y podría resultar incluso contraproducente para el medio ambiente y las especies que habitan en el medio acuático.

Para lograr una verdadera eficiencia se necesita invertir en las mejores construcciones, para generar resultados óptimos. Las construcciones, ya fueron presentados en el capítulo 3, quedando claro que son las de mejor calidad a nivel mundial. En lo que respecta al costo, se requiere una fuerte inversión, pero son materiales que por lo menos duran 100 años sin problema alguno.

En el caso del material utilizado en las Islas de Dubái, el costo aproximado fue de 25 a 30 millones de dólares, un tanto costoso pero no debemos olvidar que se trata de un complejo turístico y por lo mismo el costo es más elevado. No obstante, la inversión es menor que lo

invertido en los mercados de carbono, y también es importante mencionar que son construcciones que duraran muchos años y no requieren nada mas que un constante monitoreo y vigilancia para lograr la preservación del arrecife así como de los animales acuáticos que en el habitan. Por otro lado el uso de Sandtainers y el contenedor geotextil, tienen un costo aproximado de 2 a 3 millones de dólares incluyendo el material y los estudios necesarios para definir el sitio de hundimiento, que son lo que mayor costo económico representa.

Para la construcción de arrecifes en el océano, no existe a la fecha ningún presupuesto, ya que es algo que no ha sido empleado por ningún país, por lo cual sería uno de los inconvenientes a contemplar en su uso. Sin embargo, la tecnología que podría emplearse actualmente ya existe como pudimos ver anteriormente, y puede seguirse desarrollando en caso de existir verdadero interés.

Con los costos se culmina este proyecto, dejando abiertas varias puertas con propuestas viables al calentamiento global. Quiero insistir en que la mejor solución es la que contempla los arrecifes artificiales, tanto en costos como en el éxito que pueden llegar a tener para almacenar CO<sub>2</sub>, que es finalmente el objetivo de este trabajo.

Finalmente quiero incitar a los gobiernos a trabajar en revertir el cambio climático global, ya sea empleando esta u otras alternativas, lo importante es darle la importancia primordial que requiere su solución y sobre todo trabajar en manera conjunta, sin importar el país, el idioma, la religión, etc. Somos seres humanos, y nuestra extinción puede estar a punto de ocurrir si permitimos dejar pasar el tiempo sin hacer nada.

Cualquier utopía puede suceder si realmente así se desea, esta es la propuesta de este trabajo, dejemos hacer lo suyo a la naturaleza, pero colaboremos junto con ella para nuestra subsistencia.

## **Conclusiones**

El cambio climático global es una realidad que está dañando gravemente a todas las especies en el planeta tierra, principalmente al ser humano ya que es una de las especies que de continuar creciendo el problema no lograra adaptarse a los nuevos cambios de temperatura que empiezan a manifestarse, así como a los fenómenos naturales que han cobrado actualmente la vida de millones de personas alrededor del mundo.

Las soluciones en el ámbito internacional han sido débiles ante el grave problema mundial que enfrente el ser humano. Las propuestas a partir del protocolo de Kioto no han dado los resultados esperados, ya que es claro que los gobiernos prefieren continuar utilizando en exceso la energía y continuar con su desarrollo industrial, antes que frenar el cambio climático global. Los gobiernos del mundo no se han comprometido del todo, ya que están más preocupados por encontrar un sustituto del petróleo ante la escasez del mismo.

El mismo protocolo de Kioto plantea varias opciones para que los países logren reducir sus emisiones hasta antes del año 2012, sin embargo, a la fecha son muy pocos los que han logrado esa reducción, otros países, principalmente las industrializadas, pagan a otros por reducir sus emisiones, mientras que en su territorio continúan con sus actividades normales. Lo anterior no ha beneficiado en nada el medio ambiente, pues estamos lejos de revertir el cambio climático global y solo estamos manteniendo en el límite las emisiones de CO<sub>2</sub>. Es evidente que algunas zonas se han visto beneficiadas económicamente a partir del mercado de carbono, mientras la situación ambiental sigue siendo crítica.

Lo ideal para reducir las emisiones, sería que los países industrializados y los que están en vías de industrialización dejaran de consumir hidrocarburos, que son los principales causantes de producir CO<sub>2</sub>. Sin embargo, la civilización actual ha basado su crecimiento industrial en estos recursos no renovables y resulta muy complicado sustituirlo de manera definitiva. Puede sustituirse en el ámbito energético a partir de fuentes alternas de energía, pero es claro que aún no podemos hablar de una revolución industrial, pues los

hidrocarburos seguirán siendo prioritarios para la producción de artículos de primera necesidad.

Ante la insistencia del hombre por continuar utilizando hidrocarburos, una alternativa eficiente para capturar y sepultar CO<sub>2</sub> por muchos años, es la que representan los arrecifes naturales y artificiales, debido a que su ciclo permita que el dióxido de carbono quede sepultado de manera definitiva y solo pueda escaparse nuevamente a la atmósfera si el hombre extrae los arrecifes para utilizarlos en la construcción.

Los arrecifes naturales son actualmente recursos que se encuentran peligro de extinción, debido a que el ser humano nuevamente vuelve a ser uso indiscriminado de ellos. Han sido afectados de diversas maneras, por el turismo, por la pesca, por su extracción, entre otros factores, que han impedido su crecimiento y que hacen que sean insuficientes ante el problema global que se presentan. Es por eso que por si solos se puede concluir que los arrecifes naturales son incapaces de sepultar CO<sub>2</sub>, para revertir el cambio climático global.

Es posible ante la incapacidad de los arrecifes naturales por solucionar el problema ambiental, construir arrecifes artificiales en las zonas tropicales, que son las zonas que cuentan con el contraveneno a nivel mundial.

El proyecto empleado en Dubái, los reefballs, y los contenedores geotextiles son las mejores opciones para construir arrecifes alrededor de las costas tropicales. Han sido probados en el ámbito internacional demostrando su eficiencia y sobre todo demostrando ser completamente amigables con el medio acuático y las especies marinas.

En alta mar también es posible construir arrecifes artificiales, utilizando diques como el de Mónaco para sostenerlos no muy lejos de la superficie, o también pueden emplearse la tecnología del arquitecto francés Jacques Rougerie, mismo que también puede emplearse para monitorear el crecimiento de los arrecifes artificiales en el océano.

El derecho internacional, resulta ser el mayor inconveniente para la construcción de estructuras que sirvan para sujetar arrecifes artificiales, debido principalmente a que en altamar no existe la jurisdicción de un solo estado, y llegar a un acuerdo puede resultar complicado, debido al cruce de embarcaciones y a la actividad pesquera que se realiza en esas zonas.

Existen otras alternativas que están siendo estudiadas actualmente por algunos científicos para capturar el CO<sub>2</sub>. La sustitución de fuentes alternas de energía ha sido utilizada como una de las principales, sin embargo no es viable a corto plazo debido a que se sigue empleando el uso de hidrocarburos para producir electricidad primaria y faltan algunos años para sustituirlo por completo. Asimismo en términos monetarios, el costo resulta ser elevado para muchos países que no cuentan con la tecnología requerida para utilizar esas fuentes alternas de energía.

En un futuro si puede ser benéfico para mantener bajos los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya que habrán sustituido en mayor medida la quema de hidrocarburos y con eso las emisiones de dióxido de carbono, pero por el momento no resulta ser una solución inmediata.

El almacenamiento y captura de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas han sido de las más estudiadas actualmente y para muchos científicos representan la mejor opción para eliminarlo de la atmósfera. Sin embargo, esta solución solo puede emplearse en zonas que hayan sido previamente explotadas para obtener hidrocarburos, y en aquellos países industrializados que cuentan con la tecnología para capturar CO<sub>2</sub> desde las fuentes de emisión.

Los arrecifes naturales y artificiales son la mejor alternativa para lograr capturar el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, debido a que existen grandes kilómetros de océanos que pueden ser empleados con esta finalidad, siempre y cuando exista voluntad de las naciones y un verdadero compromiso por revertir los daños provocados al ambiente y a todas las especies en el planeta.

Los costos que representan la construcción de arrecifes artificiales, también son viables comparados con todo lo invertido en los mercados de carbono y comparado con el costo tecnológico que implican las fuentes alternas de energía y el almacenamiento geológico u oceánico.



## **Bibliografía**

Baqueiro E., R. Méndez. “Arrecifes artificiales, una alternativa para mejorar las capturas de pesca ribereña”. 5ª. Conferencia Internacional sobre arrecifes artificiales. Long Beach, California, USA, 1991

Brown Be. *Disturbances to reefs in recent times*. Chapman & Hall Ed. New York, 1997. Pp. 354–379.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. “Ley Federal del Mar”. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de enero de 1986, p. 11

Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Primera impresión, 2008. ISBN 92-9169-322-7. p. 30

Clinton J. Dawes. “Botánica Marina”. Editorial Limusa, México, 1986. Pp. 477-478.

Compilación de información de dominio público sobre fuentes de emisión mundiales, Agencia Internacional de Energía – gases de efecto invernadero, 2002. [www.iea.org](http://www.iea.org)

Conferencia Internacional de Pesca Responsable. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Cancún, México, 1992. En [www.fao.org](http://www.fao.org)

Construction Chemicals.”Dique semiflotante para la ampliación del puerto de la Conadamine (Mónaco)” España, 2003. p. 2

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Siglas en Inglés: UNFCCC) Nueva York el 9 de mayo de 1992.

Eakin, C M. “Where have all the carbonates gone?” A model comparison of calcium carbonate budgets before and after the 1982–1983 El Niño at Uva Island in the eastern Pacific. *Coral Reefs* 15, 1996. Pp. 109–119.

Girón Botello, Rafael y Ramírez Soberón, Georgina. “Arrecifes Artificiales en la Cuenca del Pacífico”. En *Ecología y Medio Ambiente en la Cuenca del Pacífico*, Sedesol, México, 1992 p. 98

Grover R., Sonu Ch. “Artificial habitat technology in the world-today and tomorrow”. Japan-USA Symposium on artificial habitats for fisheries proceedings. Tokyo, Japan, 1991.

Greenpeace y European Renewable Energy Council “Revolución Energética. Una perspectiva energética mundial sostenible” España, Noviembre 2008, p. 4.

Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático global PNUMA, “La Captación y almacenamiento de dióxido de carbono”. Resumen para responsables de políticas y Resumen Técnico. 2005

Gutiérrez Espinosa, Teresa “El protocolo de Kioto como instrumento internacional” Tesis de Maestría en Relaciones Internacionales UNAM- FCPYS, p. 18

Hopkins Christopher, “*Test Report for ‘Reef Systems’ at the Palm Jumerah, AquaMarine Advisers*”, 2005. [www.aquamarine.se](http://www.aquamarine.se)

Informe del Fondo Mundial para la protección de la naturaleza (WWF), *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*, Ginebra, Suiza, 28 de Febrero 2003.

Instituto de Recursos Mundiales (WRI). “Contaminación causada por humanos está dañando valiosos arrecifes”. Belice, 12 de Diciembre 2006. p.29 En [www.wri.org](http://www.wri.org).

Instituto Nacional de Ecología. “Proyectos de bonos de carbono” México, 2007. En [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

Loredo Pérez, Jorge, Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible. “Almacenamiento de CO2 en capas de carbón en la cuenca carbonífera central asturiana”. España, p. 13

Lozano. “Refugios artificiales en la pesquería de langostas del Caribe mexicano”. “I Reunión internacional sobre mejoramiento de hábitats acuáticos para pesquerías (arrecifes artificiales)” Manzanillo, Colima, México, 1992.

Mauvois Roger, “El Arrecife de coral-un ecosistema planetario al tu por tu con el calentamiento global”, Seminario internacional sobre pensamiento ambiental, Manizales-Colombia, Noviembre 21 de 2007

Mauvois Roger., “El arrecife de Coral. Un ecosistema planetario como alternativa al calentamiento global.” Revista del Servicio Geológico Mexicano, AÑO 2/ NO.3/ABRIL 2008.

Monin, Lisitzin. Oceanología. “Geología del Océano e historia geológica del Océano”, Rusia, 1980. P. 30

Pliego Moreno, Vladimir y Mauvois A. Roger G. “Los arrecifes en la Dimensión Ambiental”. En [Ecología y Medio Ambiente en la Cuenca del Pacífico](#). Sedesol, 1992. p. 68

Porraz, Mauricio y Maza, Antonio. "Low Cost Structures Using Operational Designs Systems, Coastal Sediments" ASCE/Charleston, South Carolina, Noviembre 1977.

Porraz, Mauricio, "Arrecifes Artificiales para Restaurar Playas Turísticas". Memorias de la conferencia Internacional de Construcción para el Turismo, La Habana, Cuba, junio de 2000.

Protocolo de Kioto, de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, Organización Nacional de las Naciones Unidas, México, 1998.

ReefBall Foundation, Inc. Services Division. Florida, Estados Unidos. En [www.reefball.com](http://www.reefball.com)

Rodríguez Hernández, María del Carmen y Hernández Fernández, Claudia "La reglamentación internacional del medio marino". (Compiladoras, "Océano: ¿fuente inagotable de recursos?", UNAM-SEMARNAP, México, 1999, pp. 423

Seara Vázquez, Modesto "Derecho Internacional Público". Editorial Porrúa, México 2001. P. 275

Secretaría de Marina. Dirección General Adjunta de Oceanografía y Dirección de Protección al Medio Ambiente Marino. "Arrecifes Artificiales". [http://www.semar.gob.mx/digadoc/pro\\_act\\_arre.htm](http://www.semar.gob.mx/digadoc/pro_act_arre.htm)