

109  
2el.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

" ALGUNOS FENOMENOS CAOTICOS QUE  
AFECTAN AL CONTROL AMBIENTAL "

TRABAJO ESCRITO  
VIA CURSOS DE EDUCACION CONTINUA  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
CARLOS CUAUHEMOC MUNGUA SALDAÑA



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente Prof. GONZÁLEZ ARREDONDO LETICIA MA. DE LOS A.

Vocal Prof. LUNA PABELLO VICTOR MANUEL

Secretario Prof. ESCALANTE TOVAR CLAUDIO AQUILES

1er. Suplente Prof. CALDERÓN VILLAGÓMEZ HILDA ELIZABETH

2do. Suplente Prof. RAMÍREZ BURGOS LANDY IRENE

Sitio donde se desarrollo el tema: Fundación Roberto  
Medellín. S.C.

Asesor Biol. CLAUDIO AQUILES ESCALANTE TOVAR

Sustentante CARLOS CUAUHTÉMOC MUNGUÍA SALDAÑA

Al Alto Mando  
A Sagan, por ser escéptico  
y a Velikovsky, por ser aún más escéptico

## C O N T E N I D O

Capítulo	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE EL TEMA.....	3
Breve Historia.....	5
Caos Determinista.....	8
Atractores Extraños.....	10
Guía para reconocer el Caos.....	12
La relación de la Teoría del Caos con el Control Ambiental.....	15
III. DESESTABILIZACIÓN EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	17
IV. EL EFECTO MARIPOSA Y LOS CFC.....	25
V. CONCLUSIONES.....	34
GLOSARIO.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	43

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

La actividad humana influye en el medio ambiente, y el medio ambiente influye en las actividades humanas.

¿Qué tan grandes son ambas influencias? ¿Se pueden controlar o evitar?

Debido a que las actividades humanas son capaces de afectar de manera negativa al entorno natural, es necesario reducir o eliminar los posibles daños. El control ambiental cumple con ese fin.

Sin embargo, ¿hasta dónde podemos predecir los efectos que causa la actividad humana sobre el ambiente?

En general, la elección de un sistema de protección ambiental, y en particular, de cualquier tecnología química, obedece a factores económicos y en el mejor de los casos a demandas sociales (a saber, el cumplimiento con la normatividad).

En el "Diplomado Básico en Control Ambiental" impartido por la Facultad de Química de la U.N.A.M. como parte de su Programa de Educación Continua y Apoyo a la Titulación, se destacó la necesidad de recurrir a muchas disciplinas para el estudio de la aplicación de las tecnologías apropiadas para el cuidado del ambiente. La participación de ciencias tanto exactas como sociales es esencial, debido a la complejidad y codependencia entre los diferentes sistemas que son afectados por la contaminación humana.

Existe una rama relativamente nueva de la ciencia, que puede contribuir a la mejor comprensión de los problemas del medio ambiente, es la Teoría del Caos.

La Teoría del Caos nos habla del comportamiento complejo y aleatorio de muchos fenómenos, pero también de los patrones que podemos identificar en ellos. Nos recuerda que la mayoría de los procesos reales son "no lineales", y que pueden ser muy sensibles a pequeños (con frecuencia indetectables) cambios.

La Teoría del Caos toma en cuenta las relaciones que existen entre sistemas aparentemente independientes entre sí, y muestra como éstos son mas que la suma de sus partes.

Con frecuencia, algunos especialistas en disciplinas científicas o humanistas, se concentran tanto en su tema que descuidan el resto del universo, y esto puede ser un error, particularmente en el caso específico de considerar los efectos dañinos causados por las industrias químicas.

En el presente trabajo se discutirá de forma cualitativa, la importancia de algunos fenómenos que influyen en dos casos de control ambiental, (el primero relacionado con el diseño y operación de los sistemas lagunares para tratamiento de aguas residuales, el segundo trata el caso de los CFC), estudiándolos a la luz de la reciente Teoría del Caos, pero antes se ofrece una breve explicación de los términos involucrados.

CAPÍTULO II  
INFORMACIÓN GENERAL SOBRE EL TEMA

En 1986 la Real Academia de Londres aceptó la siguiente definición de "caos":

Comportamiento estocástico que ocurre en un sistema determinista.

"Así, el caos es el <<comportamiento sin ley gobernado completamente por la ley>>" (1).

Por lo general la impresión que causa la palabra "caos" es desfavorable, por ser la palabra opuesta a "orden"; sin embargo la Teoría del Caos es un campo que está cobrando cada día mayor importancia para la investigación científica y tecnológica.

Richard Zanetti, en su editorial correspondiente al mes de agosto de 1991 de la revista Chemical Engineering evalúa la creciente importancia del caos para la industria química y señala que "probablemente tendrá un efecto evolucionario más que revolucionario" (2).

La Teoría del Caos puede ayudar a comprender fenómenos tan variados como el flujo turbulento, las reacciones químicas en superficies de catalizadores, el mezclado en fluidos altamente viscosos, ciertos casos de transferencia de masa y calor, algunas reacciones químicas y bioquímicas, especialmente en la oxidación orgánica (3). Pero, los sistemas que exhiben o pueden llegar a exhibir comportamiento caótico están por todas partes, por ejemplo en los láseres (4), en el decaimiento radiactivo, en la ecología,

en las ondas cerebrales, en la economía (5), en el tiempo meteorológico, en las órbitas de las galaxias (6), en la dinámica predador-presa, y en el crecimiento demográfico (7).

El caos se encuentra presente en las mismas matemáticas, de hecho la Teoría del Caos está fundamentada en éstas. Un caso sencillo e interesante es la iteración de la ecuación  $2x^2-1$  en la cual pronto se encuentra un comportamiento aleatorio.

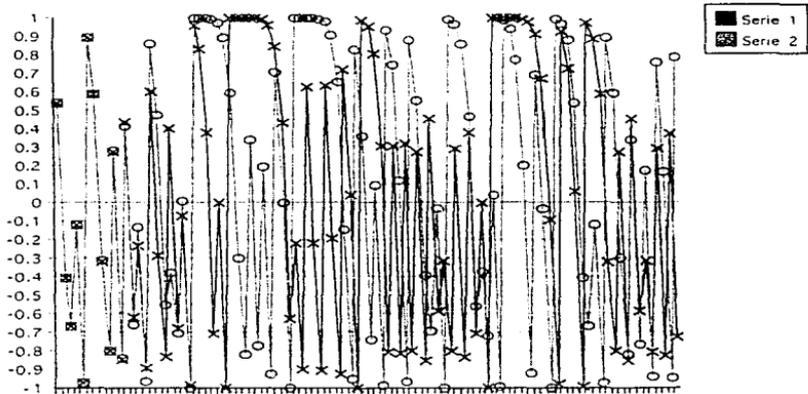


Figura 1

Gráfica adaptada de ¿Juega Dios a los Dados? de Ian Stewart pp.24-25, se grafican los resultados de iterar la misma ecuación, la serie 1 con el valor inicial  $x=0.54321$  y la serie 2 con valor inicial de  $x=0.54322$  nótese como después de 12 iteraciones la dos series se separan completamente y pierden toda semejanza.

## BREVE HISTORIA

La idea del caos es muy antigua, ya desde el Génesis Bíblico o en las diferentes cosmogonías primigenias, se habla del orden que surge del caos.

Tradicionalmente los científicos han buscado la regularidad y el orden en la naturaleza, deduciendo leyes que resultan a partir de su estudio, (como la gravitación universal enunciada por Isaac Newton), estas leyes, (que finalmente son un modelo matemático del universo) proporcionan una gran capacidad para predecir y explicar fenómenos muy variados. El enfoque reduccionista sigue siendo uno de los pilares sobre los que se sostiene la mayoría de las concepciones científicas de nuestro siglo, pues se considera que cualquier sistema se puede dividir en varias partes a fin de estudiarlas por separado, y después (de ser necesario) reunir las nuevamente y así comprender y predecir el funcionamiento del todo.

A pesar de los impresionantes logros técnicos y científicos del método reduccionista, ciertos fenómenos (como el flujo turbulento o el tiempo meteorológico) escapan a la capacidad de predicción a largo plazo.

Uno de los primeros científicos modernos que empezaron a descubrir las limitaciones del método reduccionista fue el francés Henri Poincaré (1854-1912), creador de la teoría matemática de la Topología y especializado en la "mecánica de los sistemas cerrados". El sistema solar puede considerarse, para fines prácticos, uno de dichos sistemas, al estar aislado de manera sensible de las influencias del resto del universo, y por lo tanto

libre de la disipación de energía por la entropía. El sistema solar funciona de tal manera que puede parecer estable por miles de millones de años. Pero Poincaré descubrió que las ecuaciones de Newton fallaban para el caso de más de dos cuerpos, y que la estabilidad de los planetas podía romperse por pequeñas alteraciones gravitatorias de sus propios miembros. "un sistema simple podía estallar en una perturbadora complejidad" (8), de hecho el actual límite de predicción para las futuras posiciones y velocidades planetarias no sobrepasa los 500 millones de años (9).

Es hasta la década de los 60 cuando se inicia el estudio moderno del caos, Edward Lorenz del MIT, había logrado simular con su computadora Royal McBee LGP-300 el comportamiento simplificado del tiempo atmosférico (o "temporle") usando para ello un sencillo y completamente determinista grupo de ecuaciones:

$$\begin{aligned} dx/dt &= 10(x-y) \\ dy/dt &= xz + 28x - y \\ dz/dt &= xy - (8/3)z \end{aligned}$$

Figura 2

Incluso, el modelo mostraba pautas que no eran cíclicas o periódicas, como ocurre en el tiempo atmosférico real.



Figura 3

Al querer ahorrar un poco de tiempo, alimentó a la computadora con los mismos datos que había usado el día anterior, pero con valores redondeados a cierta posición decimal, y puso a la máquina a hacer su trabajo de iteración. Cuando regresó a recoger los resultados, descubrió que las pautas del tiempo atmosférico computadas con las nuevas cifras eran al principio idénticas a las calculadas previamente, pero que conforme avanzaban, divergían rápida y considerablemente. (Ver figura siguiente).

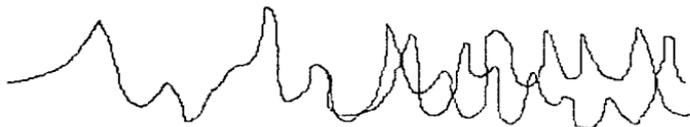


Figura 4

Gráficas de figuras 4 y 5 adaptadas de "Caos" de James Gleick, pag.25, obsérvese el parecido a la iteración de la ecuación  $2x^2-1$  presentada en la figura 1.

En un proceso lineal, un pequeño error de redondeo en los datos, se traduce en un pequeño error en los resultados, pero Lorenz no se enfrentaba a ese caso, el modelo que estudiaba era de naturaleza no lineal, por lo tanto su conclusión fue que un pequeño cambio en las condiciones iniciales podía amplificarse de manera exponencial (esto se llama "sensibilidad crítica a las

condiciones iniciales"), y que la capacidad de predicción a largo plazo no era posible para el tiempo meteorológico real (ni para el simulado!), toda vez que no es factible medir con absoluta precisión las variables necesarias para definir el estado de la temperie en cualquier momento.

Esto da inicio a una serie de estudios muy serios que actualmente están cambiando el paradigma científico.

Las "teorías de la totalidad", de la "autoorganización crítica", de la "dinámica no lineal" o del "caos", tienden a concebir a muchos sistemas como algo más que la suma de sus partes, y descubren sus sorprendentes interrelaciones.

El paradigma reduccionista, está siendo reemplazado por el paradigma holístico; se reconoce lo que desde hace mucho tiempo se creía, que la naturaleza, (y las estructuras humanas) son mucho más complejas e impredecibles de lo que se pensaba.

#### CAOS DETERMINISTA

La naturaleza tiene sus propias leyes, y el azar no es una violación a las mismas.

Podemos conocer perfectamente las ecuaciones que rigen el comportamiento de un sistema dado, sin embargo, puede resultar imposible predecir su estado futuro a largo plazo.

Existen al menos dos razones para ello:

1) Los sistemas no lineales pueden ser muy sensibles a pequeños cambios.

Es decir, alguna diferencia en las condiciones iniciales, por

pequeña que sea, puede dar lugar a cambios que crecen exponencialmente.

En esencia, un estado inicial (P), genera un único estado final (Q), pero este estado final puede ser muy diferente (Q') al que se presentaría con un estado inicial (P') apenas microscópicamente distinguible (10):

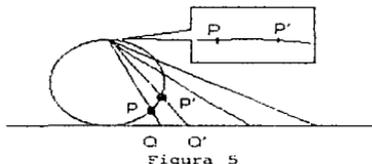


Figura 5

Gráfica adaptada de "Los Mitos de la Materia" de Paul Davies, pág.27. En el recuadro se muestra una hipotética amplificación de miles de veces mostrando la gran cercanía entre P y P'.

2) Es físicamente imposible hacer mediciones perfectas.

Tanto por la limitación de nuestros instrumentos, como por el número de decimales que puede contener una variable continua. Por ejemplo los números irracionales  $\pi$  o  $e$  tienen que truncarse en alguna posición decimal, y si son necesarios para cumplir con un algoritmo iterativo, pueden originar imprecisiones importantes por el error de redondeo, similarmente, cuando se aplican variables como temperatura o presión para resolver modelos iterativos de algún fenómeno, con seguridad también estas variables son redondeadas, y en caso de formar parte de un sistema caótico, perdemos cualquier capacidad de predicción a largo plazo. En

última instancia el principio de incertidumbre de Heisenberg impone una restricción fundamental a nuestra capacidad de medición.

El físico australiano Paul Davies señala que, aún usando el Cosmos entero para almacenar todos los decimales de alguna variable, no podríamos predecir el comportamiento a largo plazo de los sistemas más simples, "...el Universo es su propia y más rápida simulación" (11).

Así, un sistema completamente determinista, cuyas leyes son conocidas y computables, puede derivar en comportamiento caótico, este es el "caos determinista" (12).

#### ATRACTORES EXTRAÑOS

El comportamiento caótico se presenta en los Sistemas Dinámicos los cuales están formados por dos partes:

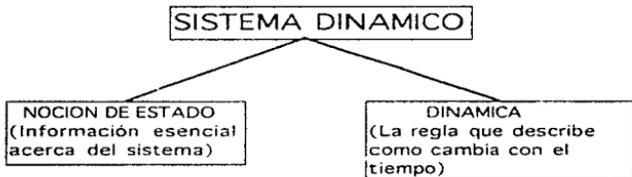


Figura 6

El Espacio de Fases es una visualización de la evolución del sistema dinámico, empleando como coordenadas los diferentes componentes del estado.

Muchas de estas representaciones quedan definidas por un punto o los cambios de posición de un punto, y dependiendo del número de variables pueden tener una, dos, tres o más dimensiones.

La región del Espacio de Fases hacia donde el sistema dinámico tiende a estabilizarse se conoce como "atractor", en efecto, las trayectorias representadas por el estado de fases son "atraídas" hacia ese punto.

Hasta el momento se conocen cuatro tipos básicos de atractores:

- 1) Atractor de punto.
- 2) Atractor de ciclo límite.
- 3) Atractor toroidal.
- 4) Atractor extraño o caótico.

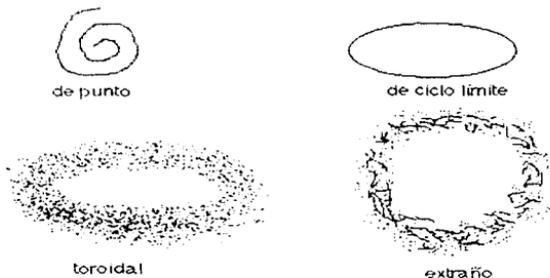


Figura 7

La utilidad de los atractores consiste en proporcionar una imagen de la evolución del sistema, y así facilitar la comprensión

de su comportamiento (13).

Los atractores extraños son la representación gráfica de un sistema que ha entrado en un régimen caótico, y pueden adquirir formas muy variadas y complejas.

#### GUÍA PARA RECONOCER EL CAOS

Muchos sistemas que se comportan de manera regular y predecible, pueden, bajo ciertas circunstancias, comenzar a exhibir comportamientos irregulares.

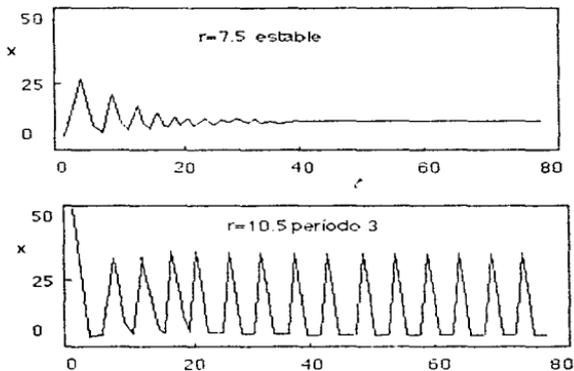


Figura 8

Gráficas adaptadas de "¿Juega Dios a los Dados?" de Ian Stewart, pág. 274, representan el modelo de George Oster para ciclos de población de moscas azules.

Algunos sistemas naturales pueden mantenerse así durante cierto tiempo. Muchos físicos llaman a esto "caos débil" (14).

Pero también puede darse el caso de que el sistema desarrolle un comportamiento más irregular; todo rastro de periodicidad se pierde, así como cualquier capacidad de predicción a largo plazo.

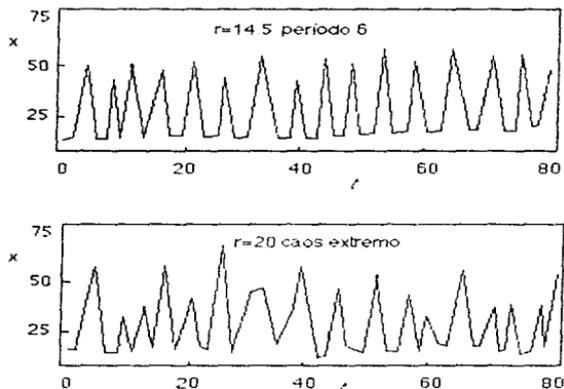


Figura 9

Gráfica adaptada de "¿Juega Dios a los Dados?" de Ian Stewart, pág. 274.

Es el caos completamente desarrollado.

En otros casos, antes de que surja el caos, se observa la aparición de la "duplicación periódica".

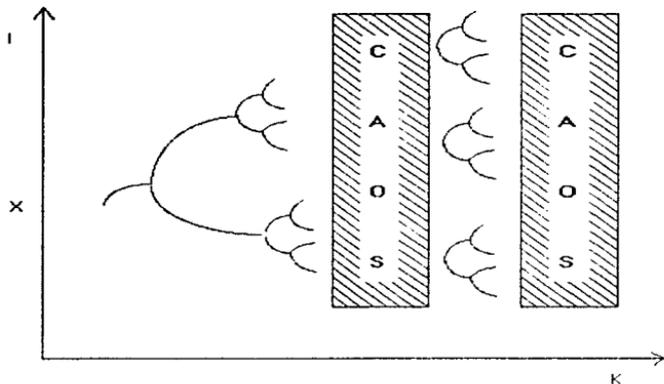


Figura 10

Gráfica adaptada de "La Ciencia del Caos" de Isaac Schiffer pág. 30, proviene de la iteración de una ecuación del tipo  $X=K(1-X)X$ , corresponde a un caso particular de la duplicación periódica llamado "intermitencia del tipo I"

Actualmente se llevan a cabo investigaciones en diversas instituciones públicas y privadas para descubrir que sistemas y bajo qué condiciones pueden comportarse caóticamente. También es de gran interés saber en cuáles regiones se presenta este caos y en qué medida.

¿Como seleccionar sistemas candidatos para encontrar fenómenos relacionados con el caos?

La siguiente guía es de carácter completamente cualitativo, y

por lo tanto, no pretende ser sustituto de procedimientos cuantitativos basados en mediciones cuidadosas, pero busca las características generales de un sistema que puede desarrollar un régimen caótico.

El sistema en cuestión:

¿Forma parte o es un sistema complejo?

¿Es fuerte la interrelación entre sus partes?

¿Es sensible a pequeños cambios?

¿Es no lineal?

¿Es no periódico?

¿Presenta duplicación periódica?

¿Está alejado del equilibrio térmico o químico?

¿Puede mostrar inestabilidad o aleatoriedad?

¿Puede predecirse su comportamiento a largo plazo?

#### LA RELACION DE LA TEORIA DEL CAOS CON EL CONTROL AMBIENTAL

El medio ambiente es a la vez un sistema complejo, un sistema dinámico, y un sistema no lineal; por lo tanto, no es extraño que presente numerosas regiones caóticas o regiones cercanas a un régimen caótico.

Muchos científicos consideran al caos uno de los procesos fundamentales para el funcionamiento de los sistemas adaptativos, como el entorno ecológico.

Se sabe que un sistema en régimen caótico puede derivar en un nuevo orden, pero también se puede dar el caso contrario, el orden

puede generar caos.

Las principales áreas del Control Ambiental pueden beneficiarse de la reciente Ciencia del Caos, ya que ésta aporta una mayor comprensión de los fenómenos que lo influyen.

En el siguiente capítulo se presentan dos casos en los que se muestra la posible evidencia de fenómenos caóticos que afectan algunos casos de control ambiental.

## CAPÍTULO III

## DESESTABILIZACIÓN EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

El agua es indispensable para la vida y para la industria. Sus diferentes usos originan que el agua sea contaminada en mayor o menor grado, provocando trastornos al ambiente, cuyas consecuencias son difíciles de remediar.

El ciclo hidrológico natural está cerca de ser sobrepasado por la creciente demanda humana global (15), y éste problema, junto con otros relacionados con el medio ambiente, pueden desencadenar conflictos violentos de carácter nacional o internacional (16), por lo que es prioritario aplicar una serie de medidas para:

-Reducir (en lo posible) la introducción de contaminantes al agua (prevención), o cuando el agua ya está contaminada aplicar las tecnologías disponibles para disminuir o eliminar, dentro lo factible o normado, los contaminantes para reintegrar el agua a su ciclo hidrológico natural o para ser reutilizada.

-Aprovechar lo mejor posible la limitada cantidad de agua accesible a través de los medios tecnológicos actuales o por los recursos económicos disponibles (nuestro planeta cuenta con aproximadamente  $1.3629 \times 10^9$  km<sup>3</sup> de agua de los cuales el 2.5% es dulce y de esta el 1% se considera potencialmente útil para consumo humano) (17).

-Hacer mejores estimaciones de la máxima capacidad que tiene el planeta para soportar las demandas de la población humana (15,18,19), para así conocer con mayor precisión los límites de

crecimiento de población y de servicios y así integrar un esfuerzo internacional en el cual se respeten los derechos humanos y los intereses de naciones tanto ricas como pobres.

Para la caracterización de las aguas residuales se considera la presencia de diferentes impurezas de tipo físico, químico y biológico. Dentro de los parámetros que revisten mayor importancia están la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), (20) otros parámetros son la cantidad de sólidos suspendidos totales, de grasas, de aceites, etc.

Tanto DQO y DBO son medidas de control de la calidad del agua, la DQO se define como "...la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia presente en el agua por medio de un oxidante fuerte en medio ácido, que conforme a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, antes de la descarga a un cuerpo receptor, debe de ajustarse a los máximos permisibles..." (21).

La DBO es la "Cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar por medios biológicos (microorganismos) la materia orgánica biodegradable [que puede ser descompuesta por la acción de microorganismos hasta dar con compuestos sencillos] de una muestra de agua residual hasta los productos finales" (22).

La DBO es un indicador del grado de tratamiento biológico que necesita aplicarse a el agua residual (20).

Actualmente existe una amplia gama de opciones para tratar el agua residual proveniente de los usos municipales o industriales,

la tecnología a elegir dependerá del tipo de impurezas que contenga el agua, del gasto, del grado de remoción de impurezas (este factor está normado en nuestro país por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Medio Ambiente de 1996, así como la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 1996 y las NOM y CPD correspondientes), y de factores económicos e incluso políticos.

Dentro de las tecnologías convencionales de tratamiento de agua residual, se encuentran los sistemas de estabilización lagunar.

Dadas las características propias de nuestro país (24), estos sistemas lagunares son una opción muy atractiva para el tratamiento de aguas residuales municipales:

- Son buena alternativa para eliminar patógenos.
- No requieren la adición de cloro.
- No necesitan partes mecánicas.
- Bajo costo energético.

Estos sistemas aprovechan los procesos biológicos que se dan de manera natural entre ciertos organismos dentro de la laguna, podemos decir que es una relación mutuamente benéfica, por una parte los seres humanos proveen alimento a estos organismos, y ellos a cambio nos devuelven el agua en muy buenas condiciones.

Generalmente estos sistemas poseen una o más lagunas anaerobias, y una o más lagunas facultativas:

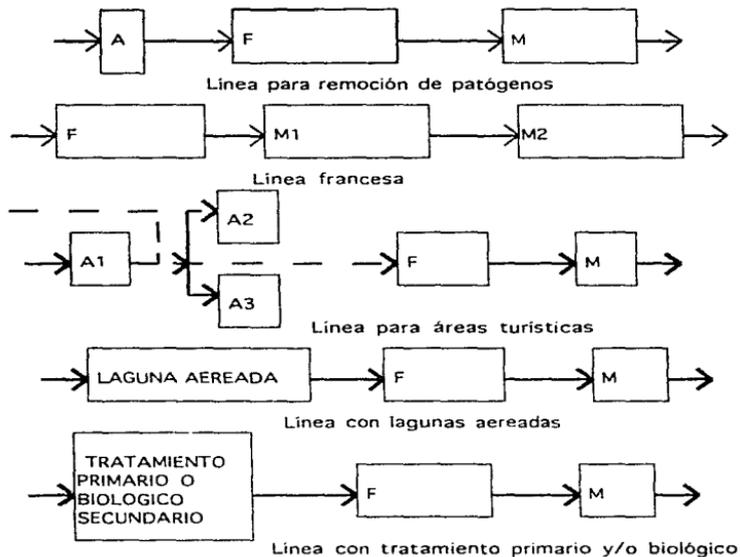


Figura 11

Adaptada de José Misset, "Manual de Agua Potable y Alcantarillado", pág.15. A indica Anaerobia, F Facultativa y M Maduración.

La figura siguiente muestra los procesos generales que se dan en ambos tipos de lagunas.

## LAGUNA ANAEROBIA

Hidrólisis y  
Fermentación ácida.  
(Anaerobias o  
Facultativas  
estrictas)

Homoaceto-  
génesis  
  
OHPA

Metanogénesis

Desventajas:

Requieren  
condiciones de pH

Requieren  
potenciales de  
óxido-reducción  
inferiores a -330V.  
pH y temperatura.  
Color.

## LAGUNA FACULTATIVA

Simbiosis entre  
algas y bacterias

Desventajas:

Dependen de la  
luz.  
Ciclos al día.  
Estratificación

Figura 12

Adaptada de José Nisset, "Manual de Agua Potable y Alcantarillado", pp.16-29.

Estas características imponen las restricciones de su efectividad y definen sus principales desventajas (por no

mencionar los grandes requerimientos de espacio).

Entre las desventajas más comunes (23,24) encontramos:

- 1) Susceptibilidad a cargas de choque y toxinas.
- 2) Susceptibilidad a cambios climáticos.
- 3) Emisiones volátiles.
- 4) Desarrollo de vegetación enraizada o de plantas flotantes.
- 5) Proliferación de insectos y roedores.
- 6) Oxígeno disuelto bajo.
- 7) Tendencia a disminuir el pH.
- 8) Disminución de eficiencia en remoción de patógenos.

De la anterior lista se observa que la cantidad y composición del influente y los cambios climáticos están fuera del control operativo. El influente y en particular la temperie son procesos caóticos, y pueden originar las condiciones para que se desencadenen el resto de los problemas enlistados.

¿Cómo puede ayudarnos el enfoque de la Teoría del Caos al estudio de estos sistemas lagunares?

El proceso de diseño de sistemas lagunares, aunque satisfactorio, sigue siendo empírico, es decir, basado en observaciones, prácticas de buen diseño y experiencias anteriores, esto se refleja claramente en el uso de ecuaciones de diseño igualmente empíricas.

A pesar de que se conocen los principios fisicoquímicos y biológicos en los que se basa el funcionamiento de estos sistemas,

aún no es posible deducir, a partir de éstos, las ecuaciones de diseño.

Por ejemplo, en el caso de los modelos de sistemas lagunares con flujo pistón, estudiados por McGarry y Pescod en 1970 y revisadas por Middlebrooks en 1987 "Ninguna de las ecuaciones no lineales, produjo una relación capaz de predecir el funcionamiento del sistema" (25).

También Yáñez señala "que la gran diversidad de criterios que existen en la actualidad se debe a divergencias en: valores constantes de reacción o mortalidad y el uso de submodelos hidráulicos, en mezcla completa, flujo pistón y flujo disperso" (26).

En un sistema lagunar son importantes los factores hidráulicos (como la profundidad, tiempo de residencia, forma física de la laguna, tipo de flujo), así como los de índole biológico (como la oxidación biológica, la fotosíntesis, las poblaciones de organismos) y los climáticos (como la temperatura, luminosidad, lluvia) y otros (cargas de choque, contaminantes peligrosos) etc.

La biología, y en particular la ecología, son campos de gran interés para los científicos que estudian los procesos caóticos.

Los modelos que describen los ciclos predador-presa, o el crecimiento de poblaciones, se basan en procesos iterativos que pueden derivar en caos (27).

Actualmente los sistemas biológicos son estudiados como parte de los sistemas adaptativos, en los cuales los equilibrios se dan en la frontera entre el caos y el orden. Se trata de sistemas

altamente complejos.

Los investigadores dedicados al diseño de sistemas lagunares, al tomar en cuenta la Teoría del Caos, podrían considerar que la predicción a largo plazo del comportamiento biológico del sistema lagunar puede ser, en principio, imposible. Ya sea por la influencia del clima, por las complejas relaciones entre los diversos organismos que forman parte del sistema lagunar, por la complejidad en los flujos hidráulicos, o por la imposibilidad de tomar mediciones absolutamente precisas y llevarlas a las ecuaciones.

Pero los sistemas lagunares funcionan con aceptable eficiencia. Esto se debe a que obedecen a patrones reconocibles empíricamente.

Probablemente una manera de mejorar los procesos de diseño lagunares sería buscando los atractores extraños que actúan sobre estos sistemas, así en lugar de dirigir considerable esfuerzo en la obtención de coeficientes empíricos para muchas ecuaciones que trabajan para ciertos rangos de temperatura o carga, se podría hacer un mapa en el "espacio de fases" y ubicar la mejor posición del sistema lagunar conforme al atractor extraño correspondiente.

Al reconocer e identificar los pequeños cambios (o la duplicación periódica) que pueden amplificarse y disminuir la eficiencia del sistema lagunar, se podrían mejorar los métodos de mantenimiento.

CAPÍTULO IV  
EL EFECTO MARIPOSA Y LOS CFC

Se dice que el aleteo de una mariposa en el Amazonas puede provocar una tormenta en Nueva York. También una cantidad relativamente pequeña de clorofluorocarbonos (CFC) (28) en la atmósfera puede amenazar a la civilización tal como la conocemos, e incluso a la vida misma en el planeta.

Es una característica de los sistemas caóticos su gran sensibilidad a pequeños cambios. Al modificarse ligeramente alguna de sus variables, pueden presentarse cambios desproporcionados en el resto del sistema. Esto es consecuencia de su comportamiento no lineal.

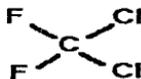
Típicamente el tiempo meteorológico es un sistema no lineal; a pesar de que las ecuaciones que lo describen son completamente deterministas e incluso sencillas, todavía no es posible predecir su comportamiento preciso con una anticipación de varias semanas o incluso de pocos días.

Y lo más probable es que sea imposible predecirlo a largo plazo, toda vez que es imposible medir con precisión infinita todas las variables involucradas; una variación en, por ejemplo, la quinta posición decimal de la temperatura puede ser la diferencia entre un día soleado y uno lluvioso, por eso el "efecto mariposa" es una de las parábolas favoritas de los científicos dedicados al estudio del caos, ilustra que es concebible que los minúsculos cambios introducidos en el aire por el aleteo de una

mariposa, se multipliquen exponencialmente a lo largo del sistema y eventualmente puedan originar una tormenta en un lugar y tiempo remotos.

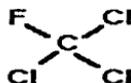
Los CFC eran considerados los compuestos perfectos, además de sus excelentes propiedades fisicoquímicas, se pensaba que eran completamente inofensivos para los humanos y el resto de los seres vivos, por lo que su extenso uso (principalmente como propelentes de aerosoles y refrigerantes) comenzó a cobrar importancia desde 1938 cuando la E.I. du Pont de Nemours & Company (Du Pont) los lanzó al mercado con el nombre comercial de "freón" (29).

Los principales CFC son:



CFC-12

Diclorodifluorometano



CFC-11

Tricloromonofluorometano

Figura 13

Sin embargo, es gracias a los estudios iniciados por James Lovelock (que deseaba aprovecharlos como trazadores de los movimientos atmosféricos), y posteriormente por Mario Molina y F.

Sherwood Rowland (30), que se descubrió el importante efecto que producían los CFC en la estratosfera (el doctor Molina dijo: "A mí me llamaban la atención esas malas maneras, esa falta de educación de enviar gases sin saber a donde irían a parar" (31).

1	$h\nu + O_2 \rightarrow O + O$	Única fuente natural importante de $O_3$ en la estratosfera.
2	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	(Rápida) Intercambio entre $O_3$ y $O$ . (Oxígeno "non").
3	$h\nu + O_3 \rightarrow O + O_2$	(Rápida) Junto con 3, regula la abundancia relativa de $O_3$ y $O$ .
4	$O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$	Hundimiento del $O_3$ (en forma natural).
5	$CFCl_3 + h\nu \rightarrow CFCl_2 + Cl$	Se da a altitudes de 20 a 40 Km.
6	$CF_2Cl_2 + h\nu \rightarrow CF_2Cl + Cl$	Se da a altitudes de 20 a 40 Km.
7	$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	Destrucción del $O_3$ por reacción en cadena catalizada.
8	$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$	Es la continuación de la anterior.
9	$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	También es importante pero la cadena NO- $NO_2$ es 6 veces más lenta que Cl-ClO.
10	$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2$	Es la continuación de la anterior.

Tabla 1

La demostración de la existencia de las reacciones 5 a 8 en la estratosfera y sus implicaciones para la vida sobre el planeta les valió en 1995 el premio Nobel de química a los Doctores Molina y Sherwood. Las reacciones fueron tomadas de referencias 30 y 37.

Las sorprendente conclusión a la que llegaron los doctores Molina y Rowland era que la capa superior de ozono estaba en peligro de desaparecer rápidamente, toda vez que un solo átomo de cloro puede destruir aproximadamente a 100,000 moléculas de ozono y permanecer en la estratosfera entre 15 y 20 años.

Era tan importante este descubrimiento (quizá uno de los más trascendentales del siglo XX), que Molina y Rowland fueron muy cuidadosos en la presentación del mismo.

Cabe señalar la relación de Molina y Rowland con la NASA y otros organismos dedicados al estudio de las atmósferas planetarias, que contribuyeron a comprender el funcionamiento de la atmósfera de nuestro propio planeta. En particular la comprobación de su teoría se apoyó en los modelos por computadora de redes ramificadas de dinámicas químicas de los halógenos presentes en la atmósfera de Venus, desarrollados por el equipo de Michael Mc.Elroy de Harvard (32).

Desde el punto de vista de la Teoría del Caos, debemos considerar la emisión de CFC no sólo como un cambio en la composición química de la estratosfera, sino como la pequeña modificación a un sistema mucho más amplio y complejo, que también abarca por lo menos, a la biosfera, la economía y las relaciones humanas.

En una primera aproximación es posible considerar el problema de los CFC como un proceso caótico por las siguientes razones:

1) La cantidad de CFC vertida por las diferentes actividades humanas es pequeña en relación con la masa total de la atmósfera (aproximadamente una parte por billón en toda la atmósfera) (28).

2) El efecto que causa esta pequeña cantidad de CFC es, sin embargo, muy grande, puesto que la gradual reducción de la capa superior de ozono provoca un aumento en los casos de cáncer de piel en la población humana (15) debido a la mayor exposición a los rayos UV-B que originan quemaduras y debilitamiento del sistema inmunológico, además de daños a la córnea que pueden derivar en ceguera.

3) Estos daños también son extensivos a otras especies vivas, incluso a las que no están directamente relacionadas con el consumo humano. Entre los organismos que más daños pueden sufrir por el debilitamiento de la capa de ozono se encuentran los microorganismos (en especial el plancton), y plantas verdes silvestres y de cultivos. Las repercusiones para la red alimenticia pueden ser impredecibles.

4) El reemplazo de los CFC ha sido muy lento, debido a la complejidad y codependencia de la economía mundial, esto ha sido empeorado por las reacciones de tipo político e incluso psicológico (lo que comúnmente se llaman "intereses").

5) Todavía es imposible predecir con exactitud las consecuencias que tendrá la presencia de CFC, para la vida en el planeta, y para la civilización.

En efecto, en el importante libro, "Más Allá de los Límites del Crecimiento" de Donell y Dennis Meadows se indica que:

"Cada ecosistema sentiría el efecto de una capa de ozono disminuida en formas que son imposibles de predecir, especialmente si otros cambios en el clima, se desarrollan al mismo tiempo"(33).

La misma atmósfera reacciona de manera compleja ante la inserción de los diferentes contaminantes (34,35). De manera que el problema es mucho más complejo, y nos puede llevar a encontrar más candidatos a fenómenos caóticos involucrados.

Por una parte los CFC pueden ser la segunda fuente artificial de gases con efecto de invernadero (después de las actividades relacionadas con el uso de energía y producción) (36), por lo que

también tienen una influencia importante en el calentamiento global del planeta. Además, la abundancia del O<sub>3</sub>, en especial a altitudes mayores de 25km., no ha sido correctamente predicha por los modelos usados (37) y que consideran a los CFC como la principal causa de su reducción, por lo menos existen otras cuarenta especies químicas que podrían estar involucradas y que están siendo estudiadas.

11	$\text{Br} + \text{O}_3 \rightarrow \text{BrO} + \text{O}_2$	Cataliza a 4, pero no es tan importante como 7 y 8.
12	$\text{BrO} + \text{O} \rightarrow \text{Br} + \text{O}_2$	Continuación de 11.
13	$\text{BrO} + \text{NO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{BrNO}_2 + \text{M}$	Ejemplo de la complejidad, este tipo de reacción remueve los radicales destructores de O <sub>3</sub> .
14	$\text{ClO} + \text{ClO} + \text{M} \rightarrow \text{Cl}_2\text{O}_2 + \text{M}$	Representa el 80% de la pérdida de O <sub>3</sub> en la estratosfera antártica.
15	$h\nu + \text{Cl}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Cl} + \text{ClOO}$	Continuación de 14, su importancia varía de año a año.
16	$\text{ClOO} + \text{M} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2 + \text{M}$	Continuación de 15, refleja cambios en Cl y Br.
17	$2[\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2]$	Continuación de 16, también varía por su dependencia de NO <sub>2</sub> .
18	$\text{Br} + \text{O}_3 \rightarrow \text{BrO} + \text{O}_2$	Continuación de 17.
19	$\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$	Continuación de 18.
20	$\text{ClO} + \text{BrO} \rightarrow \text{Cl} + \text{Br} + \text{O}_2$	Continuación de 19.

Tabla 2

Se muestra una parte de las muchas reacciones involucradas en el proceso de destrucción de la capa de ozono, o que también originan abatimiento de los radicales que lo destruyen (reacción 13) actualmente se trata de distinguir el origen natural del artificial de la pérdida del ozono estratosférico. Reacciones tomadas de referencia 37.

Estas fallas en los modelos han causado varias reacciones entre la comunidad científica, y en el público en general.

Entre estas reacciones se cuentan los debates que han tenido lugar en revistas como *Science* (38), o *21st Century Science and Technology* que ha llegado a acusar a *Nature* de fraude y de ocultar que en realidad no existe auténtica evidencia científica de que los CFC sean la causa de la disminución del ozono estratosférico (39).

Algunos sectores dentro de empresas como Du Pont o la ASHRAE (American Society for Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers) han aprovechado estos argumentos para llegar incluso a considerar una suspensión del "Protocolo de Montreal" aceptado inicialmente por 36 países, el cual estipula la reducción gradual de los CFC, (México fue la primera nación en firmarlo).

A otro nivel, revistas como *Time* y *Forbes*, también han puesto en duda la validez de las medidas adoptadas para reducir la emisión de los gases de efecto invernadero, llegando a calificar a las políticas para controlar los CFC y otros gases como un caso de "sobrereacción" (36).

La evolución de la atmósfera ha sido extraordinariamente compleja y ha presentado a lo largo de millones de años, importantes cambios en su composición y cantidad (40). La actividad humana añade aún más complejidad a la atmósfera, a pesar de que la influencia humana sea muy pequeña y no llegue a ocasionar un cambio en los constituyentes principales de la

atmósfera ( $N_2, O_2$ , y gases nobles que son el 99.9% del total) y por lo tanto estar confinada a alteraciones en los niveles de los componentes menores, o en la introducción de compuestos nuevos, como es en el caso de los CFC.

Virtualmente todos los científicos están seguros de que el ser humano puede influir en los cambios globales del clima, pero aún resulta difícil distinguir entre los cambios de origen humano de los naturales (41,42).

Ahora se sabe que los niveles de ozono y en especial los que muestran una disminución, no sólo dependen de la emisión de CFC, sino de la complejidad de la química estratosférica, variables meteorológicas, la actividad volcánica (43), variaciones en la radiación solar en el ultra violeta (44), cambios en los ciclos magnéticos solares (45) y hasta de fluctuaciones en flujo de rayos cósmicos (37).

Muchos de estos fenómenos no son comprendidos del todo, y también podrían mostrar comportamiento caótico.

Tomar en cuenta la Teoría del Caos podría contribuir a:

- Mejorar la visión general del problema. Al tomar en cuenta los factores naturales y artificiales, tanto evidentes como sutiles.
- Fortalecer la hipótesis de que los cambios humanos pueden amplificarse hasta alcanzar proporciones globales, y poder distinguirlos de los cambios introducidos por la propia naturaleza.
- Entender los complejos cambios en la concentración de ozono, pues si su fluctuación obedece a comportamientos no lineales es

posible que entren en un régimen caótico o cercano al caos.

Lo anterior puede conducir a entender que son imposibles predicciones puntuales (como decir cuanto  $O_3$  habrá dentro de una semana o dentro de cien años o incluso cuál es su velocidad de decremento de  $O_3$  para un instante dado), pero que si es posible elaborar modelos en los cuales se vea la tendencia de disminución de la capa de ozono, en los que se observaran patrones en los que la concentración de  $O_3$  aumentara y disminuyera.

Si estos patrones son similares a los observados en la estratosfera, se podría contar con otra demostración científica de la influencia humana tanto en la reducción de la capa de ozono como del calentamiento global y así contar con mejor disposición por parte de los gobiernos, las industrias y el público en general para enfrentar el problema causado por los CFC.

CAPÍTULO V  
CONCLUSIONES

En un Universo en el que la mayoría de los fenómenos no son completamente lineales, es lógico esperar comportamientos caóticos.

El caos no es necesariamente sinónimo de confusión y desconcierto. La naturaleza misma emplea el caos de manera constructiva, sin la riqueza de la evolución o la variación del clima no habría existido el ser humano.

A lo largo de este trabajo, vimos como la actividad humana puede ser interferida, y a su vez, interferir con los procesos naturales.

-Uno de los objetivos de los sistemas lagunares es reincorporar el agua tratada a su ciclo hidrológico lo menos contaminada posible, pero el sistema lagunar es afectado por las condiciones meteorológicas y depende de los complejos procesos biológicos que ocurren en su interior. Esto es un ejemplo de la intervención de fenómenos naturales en un sistema de control ambiental.

-El equilibrio natural de la estratosfera es alterado por la introducción de relativamente pequeñas cantidades de sustancias artificiales (los CFC) y ocasionar complejas alteraciones a nivel planetario. Lo anterior ilustra la acción de un fenómeno artificial capaz de influir en la naturaleza y que plantea problemas que exigen estrategias de control ambiental de escala internacional.

También los comportamientos económicos, sociales y políticos pueden ser de carácter caótico, e influir en la toma de decisiones para el control ambiental.

El hecho de que sea imposible predecir el comportamiento a largo plazo de los sistemas caóticos, no debe desmoralizar a los ingenieros, puesto que sabemos que los atractores extraños permiten reconocer las pautas de comportamiento de estos sistemas en el espacio de fases, abriendo un campo de nuevos paradigmas encaminados a encontrar soluciones adecuadas a problemas que antes resultaban intratables.

Otra herramienta muy poderosa para la comprensión de los fenómenos caóticos es la geometría fractal, la cual, a diferencia de la Euclidiana, hace referencia a objetos que existen en dimensiones fraccionarias (3).

Reconocer la existencia de fenómenos caóticos o cercanos al caos, en el ambiente, puede ayudar a adquirir nuevos niveles de responsabilidad entre el público en general, y en particular entre los ingenieros químicos, al hacerlos más conscientes de la gran sensibilidad que pueden presentar muchos sistemas a pequeñas alteraciones.

Es indudable que falta investigación en el campo de la Teoría del Caos, especialmente en su influencia en la Ingeniería Química y el Control Ambiental.

Como dijo Julio Ottino, profesor de ingeniería química en la Northwestern University, [los ingenieros químicos] "están incorporando la Teoría del Caos en su trabajo sin que realmente lo

sepan" (2).

Un buen lugar para iniciar los estudios formales de la Teoría del caos es la Universidad, y la carrera de Ingeniero Químico seguramente se enriquecería con ello.

También el Diplomado Básico en Control Ambiental, que imparte la Facultad de Química, al hacer gran énfasis del carácter complejo y multidisciplinario de los problemas ambientales, podría considerar la posibilidad de presentar una breve introducción de la Teoría del Caos.

## GLOSARIO

**AMBIENTE**

Todo aquello que rodea a un organismo y que influye en su vida.

**ATRACTOR**

Es el punto o región hacia el cual convergen, o alrededor del cual evolucionan, las trayectorias graficadas en el espacio de fases.

**ATRACTOR EXTRAÑO**

Es aquel punto que atrae trayectorias de carácter caótico.

**AUTOORGANIZACIÓN CRÍTICA**

Fenómeno que se presenta en sistemas que se mantienen aparentemente en equilibrio durante cierto tiempo, y que ante una pequeña modificación, cambian su posición de equilibrio de manera intempestiva y hasta catastrófica.

**BIOMASA**

Son todos los organismos presentes en una población o en una unidad de área o volumen.

**BIOSFERA**

Es la parte del planeta donde se da el fenómeno de la vida, (parte superficial de la corteza, parte inferior de la atmósfera, mares, etc.) representa a la totalidad de los seres vivos y su ambiente.

**CAOS**

Comportamiento estocástico (al azar) que ocurre en un sistema determinista. Es un proceso en el que no se observa periodicidad o

regularidad y es por lo tanto impredecible.

#### **CICLO HIDROLÓGICO**

Proceso natural por medio del cual el agua se moviliza en la atmósfera, subsuelos, criosfera o cuerpos de agua. Tiene cierta capacidad para purificar el agua contaminada.

#### **CONTAMINACIÓN**

Es un cambio cuantitativo o cualitativo de la composición natural de un medio, causada por la introducción de agentes físicos, químicos o biológicos y que puede tener su origen en actividades humanas o naturales.

#### **CONTROL AMBIENTAL**

Procedimientos técnicos o administrativos dirigidos a prevenir, eliminar o disminuir las alteraciones al medio ambiente causadas de manera intencional o accidental por el ser humano.

#### **DBO**

Demanda Bioquímica de Oxígeno. Medida indirecta de control de la calidad de una muestra de agua residual contaminada por materia orgánica. Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar por medios biológicos la materia orgánica hasta compuestos sencillos ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ).

#### **DETERMINISMO**

Corriente científica que supone la posibilidad de predecir cualquier estado futuro de un sistema a partir del conocimiento de su estado actual.

#### **DQO**

Demanda Química de Oxígeno. Medida indirecta de control de la calidad de una muestra de agua residual contaminada por materia orgánica. Es el equivalente de oxígeno requerida para oxidar completamente la totalidad de la materia orgánica hasta compuestos sencillos ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ), empleando oxidantes fuertes en medio ácido y alta temperatura.

#### **DUPLICACIÓN PERIÓDICA**

Puntos críticos en los cuales un sistema comienza a duplicar el valor de sus variables y que, en muchos casos, antecede la aparición del comportamiento caótico.

#### **EFEECTO INVERNADERO**

Proceso de origen natural o artificial por el cual ciertos gases en la atmósfera (como el  $CO_2$  o los CFC) son transparentes a la radiación solar y opacos parcialmente a la radiación terrestre.

#### **ESPACIO DE FASES**

Mapa en el cual se grafican los cambios que sufren las variables de un sistema dinámico.

#### **FERMENTACIÓN ÁCIDA**

Proceso que ocurre dentro de una laguna anaerobia, realizado por organismos formadores de ácidos al destruir sustancia orgánicas.

#### **HIDRÓLISIS**

Rompimiento de una molécula debido a la adición de un molécula de agua.

**HOLÍSTICO**

Aquel estudio de las partes con relación al todo, o del todo sin descuidar sus partes.

**HOMOACETOGÉNESIS**

Transformación de los productos de la Fermentación ácida a acetatos,  $H_2$  y  $CO_2$ , son responsables de esto las bacterias OHPA.

**INTERRELACION FUERTE**

Aquella en la que la influencia de las partes de un sistema es importante y por lo tanto puede influir en el resto del sistema.

**LAGUNA ANAEROBIA**

Sistema de tratamiento de agua residual en el cual una laguna artificial realiza un proceso en donde participan bacterias que no necesitan oxígeno y que transforman la materia orgánica en  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  y  $H_2$ .

**LAGUNA FACULTATIVA**

Laguna en donde existe una zona donde actúan organismos aerobios (que necesitan oxígeno) y que degradan la materia orgánica hasta materia inorgánica y orgánica más simple. La cantidad de oxígeno varía con su profundidad y con la hora del día, por lo que existe una zona donde se producen fenómenos anaerobios.

**LAGUNA DE MADURACIÓN**

Es la parte final de un sistema lagunar, debido a su poca profundidad no cuenta con zona anaerobia.

**METANOGENESIS**

Producción de metano por ciertas bacterias anaerobias.

**NO LINEARIDAD**

Proceso que puede describir usando ecuaciones no-lineales, en el cual los cambios de una variable no afectan proporcionalmente a las otras variables, y por lo tanto son capaces de reaccionar con cambios muy grandes e impredecibles.

**OHPA**

Bacterias Acetogénicas Productoras Obligadas de H<sub>2</sub>. (Por sus siglas en inglés).

**PATÓGENOS**

Organismos pluricelulares o unicelulares, causantes de enfermedades generalmente transmisibles.

**REDUCCIONISMO**

Corriente científica basada en la suposición de que los sistemas complejos son la suma de sus partes constitutivas las cuales pueden ser aisladas para su estudio, despreciando el resto.

**SISTEMA ADAPTATIVO**

Es un sistema capaz de autoorganizarse en respuesta a estímulos externos o por sí mismo. Los estímulos pueden presentarse aleatoriamente.

**SISTEMAS COMPLEJOS**

Son aquellos que, en principio, son imposibles de analizar a la perfección debido al constante cambio que sufren sus partes.

**SISTEMA DINÁMICO**

Es aquel que cambia en el tiempo, conforme a una serie de

reglas que describen su comportamiento.

**TEMPERIE**

Es el tiempo metereológico (es decir las condiciones de temperatura, humedad, presión, para un momento dado).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Stewart, Ian  
¿JUEGA DIOS A LOS DADOS?  
Grijalbo Mandatori, S.A.  
Barcelona (1991), págs. 22-23
2. Zanetti, Richard  
"The Evolution of Chaos"  
Chemical Engineering. 98/8/5 (1991)
3. Samdani, Gulam  
"The Simple Rules of Complexity"  
Chemical Engineering. 98/7/30-35 (1991)
4. Yam, Philip  
"Chaotic Chaos"  
Scientific American, 270/3/16 (1994)
5. Crutchfield, James P., Farmer, J.D., Packard, N.H. y Shaw, R.  
"Chaos"  
Scientific American, 255/6/46-57
6. Cleick, James  
CAOS  
Seix Barral  
Barcelona (1988)
7. Stewart en (1) Cap.13
8. Briggs, J. y Peat, F.D.  
ESPEJO Y REFLEJO: DEL CAOS AL ORDEN  
CONACYT-Gedisa

- México D.F. (1991), pág.28
9. Schifter, Isaac  
LA CIENCIA DEL CAOS  
Fondo de Cultura Económica  
México D.F. (1996)
  10. Davies, Paul y Gribbing John  
LOS MITOS DE LA MATERIA  
McGraw-Hill  
Madrid (1992)
  11. ibidi., pág. 31
  12. Pagels, Heinz R.  
LOS SUEÑOS DE LA RAZÓN  
CONACYT-Gedisa  
México D.F. (1991)
  13. Hofstadter, Douglas R.  
"Temas Metamágicos"  
Investigación y Ciencia, No.64, Enero (1982), 103-113
  14. Bak, Per y Chen, Kan  
"Self-Organized Criticaly"  
Scientific American, 264/1/46-53
  15. Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows y Jorgen, Randers  
MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO  
El País Aguilar  
Madrid (1993)
  16. Homer-Dixon, Thomas F., Boutwell, Jeffrey H. y Rathjens,  
George W.

- "Environmental Change and Violent Conflict"  
Scientific American. 268/2/16-23 (1993)
17. Flores, Julio et al.  
"LA CONTAMINACIÓN Y SUS EFECTOS EN LA SALUD Y EN EL AMBIENTE"  
Centro de Ecología y Desarrollo  
México D.F. (1995)
18. Cohen, Joel E.  
"Population Growth and Earth's Human Carrying Capacity"  
Science. 269/341-346 (1995)
19. Bongaarts, John  
"Can the Growing Human Population Feed Itself?"  
Scientific American. 270/3/36-42 (1994)
20. DIPLOMADO BÁSICO EN CONTROL AMBIENTAL  
Módulo III "Agua"  
Facultad de Química U.N.A.M. (1996)
21. Ley General de Derechos en Materia de Agua  
Comisión Nacional del Agua  
Artículo 277 (1994)
22. Alber, Lilia et al.  
"DICCIONARIO DE LA CONTAMINACIÓN"  
Centro de Ecología y Desarrollo  
México D.F. (1995)
23. Belhateche, Dannelle H.  
"Choose Appropriate Wastewater Treatment Technologies"  
Chemical Engineering Progress. 91/8/32-51 (1995)
24. Collí Misset, José et al.

MANUAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO. LIBRO II. PROYECTO  
3a. SECCION: POTABILIZACIÓN Y TRATAMIENTO. TEMA: TRATAMIENTO.  
SUBTEMA: LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN  
Comisión Nacional del Agua (1993)

25. ibdi., pág.37

26. ibdi., pág.36

27. Ruthen, Russell

"Adapting to Complexity"

Scientific American. 268/1/130-138 (1993)

28. Graedel, Thomas E. y Crutzen, Paul J.

"The Changing Atmosphere"

Scientific American. 261/3/58-68 (1989)

29. Fisher, Marshall

LA CAPA DE OZONO

McGraw-Hill

Madrid (1993)

30. Molina J., Mario y Rowland, F. S.

"Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes"

Nature. 249/810-812 (1974)

31. Cremoux, Raúl

COMODIDADES PELIGROSAS

U.N.A.M. y Lotería Nacional para la Asistencia Pública

México (1996), pág. 49

32. Sagan, Carl

UN PUNTO AZUL PÁLIDO

Planeta

- Barcelona (1995) págs. 221-223
33. Meadows en (14), pág. 185
34. Puigcerver, Manuel  
"Atmósfera y Contaminación Atmosférica"  
Investigación y Ciencia 37/104-120 oct. (1979)
35. Newell, Reginald E.  
"The Global Circulation of Atmospheric Pollutants"  
Scientific American. 224/1/32-42 (1971)
36. White, Robert M.  
"The Great Climate Debate"  
Scientific American. 236/1/36-43 Jul. (1990)
37. McElroy, Michael B. y Salawitch, Ross J.  
"Changing Composition of the Global Stratosphere"  
Science. 243/763-243 Feb. (1989)
38. Schneider, Stephen H.  
"The Greenhouse Effect: Science and Policy"  
Science. 243/771-781 Feb. (1989)
39. "Is the CFC Ban on the Way Out?"  
21st Century Science & Technology. 9/2/68-69 Summer (1996)
40. Pollack, James B., Kelly, B.J. y Chaikin, A.  
EL NUEVO SISTEMA SOLAR  
Capítulo 8: "Atmósferas Planetarias Terrestres"  
CONACYT y CHROMATOS  
México D.F. (1994)
41. McElroy en (33), pág.769
42. Schneider, Stephen H.

"The Changing Climate"

Scientific American. 268/1/70-79 (1989)

43. Horgan, John

"Volcanic Disruption"

Scientific American. 266/3/16-17 Mar.(1992)

44. Powell, Corey S.

"Talk About the Weather"

Scientific American. 271/5/ 10-14 Nov.(1994)

45. Baliunas, Sallie y Soon, Willie

"The Sun-Climate Connection"

Sky & Telescope. 92/9/38-41 Dec.(1996)