



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Determinación de la Producción de Entropía
Global de la Tierra debido a la Transpiración
de las Plantas.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
FÍSICO

PRESENTA:
MARIANA PATRICIA JÁCOME PAZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. KARO MICHAELIAN PAW



2009



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.

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del Alumno

Jácome

Paz

Mariana Patricia

54 21 31 31

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

403004009

2. Datos del Tutor

Dr

Karo

Michaelian

Paw

3. Datos del sinodal 1

Dr

Gerardo

Carmona

Ruíz

4. Datos del sinodal 2

Dr

Gerardo Jorge

Vázquez

Fonseca

5. Datos del sinodal 3

Dr

Iván

Santamaría

Holek

6. Datos del sinodal 4

Fís

Fernando

Ángeles

Uribe

7. Datos del trabajo escrito

Determinación de la Producción de Entropía Global debido a la Transpiración de la Plantas

96 p

2009

A mis padres.

A Ana, Julio, Santiago y Eric.

A lo que llevo dentro.

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Karo Michaelian Paw. El comite tutorial conformado por el Dr. Gerardo Carmona Ruiz, Dr. Gerardo Jorge Vázquez Fonseca, Dr. Iván Santamaría HOLEK y Fís. Fernando Ángeles Uribe.

A la bióloga Patricia Olgún encargada de la Unidad de Ambientes Controlados. A los encargados del laboratorio de Calor, Ondas y Fluidos, el profesor Jorge Pérez López y los laboratoristas Jorge Ceballos Urquieta y Pablo Valencia.

A mis profesores por ayudarme a ver en el camino, a la Doctora María del Carmen Jorge y Jorge, a Marcos Ley-koo, a Faustino Sánchez Garduño, a María de los Ángeles Ortiz y Jesús Flores Mijangos.

A Ana Cecilia Jácome Paz por las palabras, la confianza en mí, el apoyo, el regaño por su ser tan maravilloso que me enseñó el mundo desde que llegué.

A Julio Jácome Lara, mi padre, por las palabras, el apoyo, el amor y la paciencia.

A mi madre, por el amor, la confianza en mí y la enseñanza que me ha dado mientras teje.

A mis hermanos, Julio y Santiago por su amor, su alegría y su apoyo.

A Eric Benjamín Téllez Ugalde por estar. Por la fuerza, la paciencia, el apoyo, las palabras, la enseñanza y el amor.

A mis abuelas: Lucelva Lara Burguete y Engracia Margarita Morelos Aguilera por su amor y comprensión.

A mi tía Paty por su amor, su apoyo y su confianza. A mi tío Jorge por el apoyo y al amistad. A mi tía Julieta Jácome por su apoyo.

A Daniel Pastrana por cuidar del Pato, por el apoyo, la risa, la diversión, la paciencia y el trabajo.

A Mariano Albor por la dedicación, el apoyo y el amor.

A Tonatiuh Sánchez y Cuchara por el apoyo, la amistad, la risa y el amor.

A Javier Cortés Rosas por la amistad, por la fuerza.

A Jozra Garrido por la luz que ha sido en mi vida. A Ilyanova Velasco y Cristián Garrido por volverse parte de mi familia.

A Irene por la plática, las ideas, la alegría, la amistad, el baile y la fuerza.

A Eduardo Castellanos "Beackmanz a Noemí Hernández y familia por el apoyo, la fuerza, la amistad, las risas, el trabajo y el impulso.

A Julián Chacón por su amistad , su apoyo, su trabajo y su alegría. A María del Río por la amistad, las palabras y la alegría.

A Quiela Curiel por los cuidados, la diversión, la confianza, el consejo y la amistad.

A Juan Carlos Cajas por los consejos, la amistad, la confianza y el ejemplo que ha sido en mi vida.

A Adán López y a Alberto Escobedo por su amistad incondicional y su apoyo. A Celia Lecumberri, a Luis Pineda Arvizu "Luiz su familia, por el apoyo y el cariño; a Mónica Minjarrez, a Lizardo Valencia, Oscar Córdoba", Toño Coello, Daniel Lámbarri "Dookyez su familia por el apoyo, Emiliano Gallegos, Anahí Caldú, Fabián Gutiérrez "Fabo", Adriana, Alvaro, Serena, Nacho, Felipe Bracho, Zayra, Dante y Esmeralda.

A Sergio Jimenez, Fabián Gutiérrez, Eugenio Duarte y Lucía Garnica de la UDG.

Índice general

I	Introducción	VII
II	Marco Teórico	1
1.	Sistemas Termodinámicos	3
1.1.	Teoría Termodinámica para Sistemas Aislados y Cerrados	3
1.1.1.	Primera ley	3
1.1.2.	Segunda ley	3
1.1.3.	Reflexiones sobre la Entropía	4
1.2.	Teoría Termodinámica para Sistemas Abiertos	5
1.2.1.	Primera Ley	5
1.2.2.	Segunda Ley	6
1.3.	Teoría Termodinámica de Procesos Irreversibles	6
1.3.1.	Teoría de Prigogine	6
1.3.2.	Teoría de Onsanger	7
1.4.	Producción mínima de entropía	8
2.	Termodinámica Irreversible	11
2.1.	Estabilidad Física	11
2.2.	Transiciones de Fase	12
2.2.1.	Potencial de Gibbs en Cambios de Fase	13
2.3.	Evaporación del agua	15
2.3.1.	Potencial Químico como función de la Temperatura y Presión	16
3.	Tierra, Vida y Entropía	19
3.1.	Definiciones de Vida	19
3.2.	La Tierra como sistema termodinámico abierto	20
3.2.1.	La Biota en el Planeta	21
3.2.2.	Albedo 0.39 y Cuerpo Negro	21
3.2.3.	Beneficios del estado Vida sobre la Tierra	26
3.2.4.	La Producción de Entropía de la Tierra debida a la biota	26
3.3.	El ecosistema como sistema termodinámico abierto	28
3.3.1.	Modelo de Lotka-Volterra	28
3.3.2.	Estudio Termodinámico del Ecosistema	29
3.4.	La planta como sistema termodinámico abierto	30
3.4.1.	Begonia y Metabolismo	30
3.4.2.	Transpiración	32
3.4.3.	Cuantificación de la Transpiración	35
3.4.4.	Producción de Entropía de la Transpiración	36
III	Desarrollo Experimental	39
4.	Condiciones de Frontera y Aparatos de Medición	41
4.1.	Humedad Relativa	41

4.2. Intensidad de luz	41
4.3. Flujo de agua	42
4.4. Temperatura	42
4.5. Otros factores	43
5. Procedimiento Experimental	45
5.1. Medida de la Evaporación	45
5.2. Medida de la Temperatura	46
5.3. Medida del área	46
5.4. Humedad Relativa	46
IV Resultados	47
6. Registros en las cámaras	49
6.1. Luminosidad	49
6.2. Temperatura y Humedad Relativa	49
6.3. Área de las Hojas	52
V Análisis	55
7. Medidas Promedios	57
7.1. Temperatura	57
7.1.1. Área de las plantas	57
7.1.2. Variación de la Masa	57
8. Cálculo del coeficiente de producción de entropía como función de la Temperatura	61
8.1. Problema del Potencial Químico como una función $\mu(T, p)$	61
8.1.1. Presión de Saturación	61
8.1.2. Presión Parcial	62
8.1.3. Potencial Químico	62
8.2. Cálculo de la Transpiración $\frac{dn}{dt}$	63
8.3. Cálculo de la Producción de Entropía Γ	63
8.3.1. Cálculo sin corrección al Potencial	63
8.3.2. Cálculo con corrección al Potencial Químico	64
8.4. Producción de Entropía en la Tierra	65
8.4.1. Cálculo con corrección al Potencial Químico	65
8.5. Variación de Temperatura y Albedo en el cálculo	65
VI Conclusiones	69
VII Apéndices	73
A. Orden en los sistemas vivos	75
B. Mundo de Margaritas (Daisy World)	77
C. Humedad Relativa y Temperatura	79

Índice de figuras

3.1. Area Verde total de la Tierra	22
4.1. Sensor de Humedad Relativa y Temperatura	41
4.2. Arreglo de las plantas dentro de las cámaras	42
5.1. Arreglo para evitar la pérdida de agua por evaporación del agua de la tierra y la maceta	45
5.2. Método para obtener la variación de masa de cada planta	46
6.1. Humedad Relativa y Temperatura Cámara 4 Octubre 2008	50
6.2. Humedad Relativa y Temperatura Cámara 3 Octubre 2008	50
6.3. Humedad Relativa y Temperatura Cámara 4 Noviembre 2008	51
6.4. Humedad Relativa y Temperatura Cámara 3 Noviembre 2008	52
6.5. Vista utilizada para aproximar el área total de las plantas	53
6.6. Vista utilizada en particular para la Planta 2	53
8.1. Gráfico de Ajuste de la Presión de Saturación	62
8.2. Ajuste del Coeficiente de Producción de Entropía en Función de la Temperatura	64
8.3. Ajuste del Coeficiente de Producción de Entropía con corrección en Función de la Temperatura	65
8.4. Temperatura Cámara 4 Octubre 2008	79
8.5. Humedad Relativa Cámara 4 Octubre 2008	79
8.6. Temperatura Cámara 3 Octubre 2008	80
8.7. Humedad Relativa Cámara 3 Octubre 2008	80
8.8. Temperatura Cámara 4 Noviembre 2008	81
8.9. Humedad Relativa Cámara 4 Noviembre 2008	81
8.10. Temperatura Cámara 3 Noviembre 2008	82
8.11. Humedad Relativa Cámara 3 Noviembre 2008	82

Índice de cuadros

2.1. Potencial extremo según las variables conocidas del sistema	13
2.2. Potencial químico del agua en condiciones estándares	16
2.3. Tabla de presión de vapor absoluta del agua en función de la temperatura	17
3.1. Área Verde Total de la Tierra	24
3.2. Producción de Entropía de los Planetas	27
3.3. Producción de Entropía de los Planetas calculado por Aoki	28
3.4. Ejemplos de densidad estomática	32
4.1. Disposición de las plantas en cada etapa	42
6.1. Intensidad luminosa registrada en el follaje de las plantas	49
6.2. Temperatura y Humedad Relativa Promedio	52
6.3. Medidas promedio del área de cada planta	53
7.1. Medidas promedio de la temperatura ambiental, la temperatura de la hoja y la humedad relativa	57
7.2. Medida promedio del área de cada planta	57
7.3. Variación de la masa, Planta 1, 303 K	58
7.4. Variación de la masa, Planta 2 , 298 K	58
7.5. Variación de la masa, Planta 3, 303 K	59
7.6. Variación de la masa, Planta 4, 298 K	59
7.7. Variación de la masa , Planta 1,298 K	59
7.8. Variación de la masa, Planta 2, 303 K	60
7.9. Variación de la masa, Planta 3, 298 K	60
7.10. Variación de la masa, Planta 4, 303 K	60
8.1. Ajuste de la presión de saturación en función de la temperatura	61
8.2. Presión parcial en función de la temperatura	62
8.3. Corrección al Potencial Químico	63
8.4. Flujo de masa promedio para cada planta.	63
8.5. Coeficiente de Producción de entropía sin corrección al Potencial Químico	64
8.6. Coeficiente de Producción de entropía con correcciones al potencial	64
8.7. Comparación de la Producción de entropía	65
8.8. Cálculo de la Producción de entropía de las Áreas Verdes de la Tierra	65
8.9. Cálculo del Coeficiente de Producción de Entropía variando el Albedo y la Temperatura	66
8.10. Porcentaje debido a la transpiración de la Producción de entropía de la Tierra en función de la Temperatura	66
8.11. Cálculo de la Cantidad de Agua Evaporada por Año	66

Parte I

Introducción

Descripción del Trabajo

En 1944, Schrödinger publicó un libro titulado *¿Qué es la vida?*, donde se planteó por primera vez la posibilidad de tratar a los ecosistemas y a los entes biológicos como sistemas termodinámicos en una descripción meramente cualitativa. Posteriormente, en 1967 Ilya Prigogine publicó un libro donde asentó la teoría para aplicar principios de termodinámica irreversible a este tipo de sistemas (abiertos).

Basado en la teoría termodinámica irreversible cuyo desarrollo se atribuye a Ilya Prigogine, el proyecto *Respuesta de ecosistemas a Perturbaciones dentro del marco de la Termodinámica Irreversible* del Departamento de Física Experimental del Instituto de Física, UNAM, pretende estudiar el comportamiento cualitativo y cuantitativo de los ecosistemas bajo perturbaciones.

En el artículo "*Thermodynamic Stability of Ecosystems*"¹ se desarrolló un marco para aplicar la Termodinámica Irreversible al estudio de ecosistemas. De este desarrollo, se obtiene como principal variable para modelar al ecosistema a la producción de entropía resultante de los procesos internos de cada especie, su interacción con el ambiente y los procesos de interacción entre las especies que lo habitan. El marco establece que el desarrollo y la evolución de un ecosistema está íntimamente relacionada con su producción de entropía; este marco será el utilizado en este trabajo.

Objetivo

Como parte del proyecto *Respuesta de ecosistemas a Perturbaciones dentro del marco de la Termodinámica Irreversible*, este trabajo tiene dos objetivos principales. El primero radica en mostrar la factibilidad experimental de medir los parámetros del marco utilizado. El segundo objetivo de este trabajo es denotar la propiedad autónoma de la vida, no inherente al sistema global Tierra, sino como un estado de la materia que se regula de forma autónoma y mantiene una propiedad característica respecto al aumento de entropía.

Dicho lo anterior, se pretende realizar la medición de producción de entropía de un sistema vivo con el fin de demostrar el aumento reducido de producción de entropía.

Se persigue entonces la determinación y descripción de la contribución a la producción de entropía de la Tierra debido a la transpiración de las plantas. Tal determinación incluye varias etapas:

- Revisión de la literatura existente sobre la producción de entropía de la Tierra.
- Determinación experimental del coeficiente de producción de entropía de una planta.
- Comparar la producción de entropía bajo perturbaciones de temperatura para ese mismo sistema vivo. Dar una propuesta de coeficiente de producción de entropía para esa especie como función de la variable temperatura. Se justificará con los resultados experimentales y con los datos encontrados en la búsqueda bibliográfica.
- Calcular la producción de entropía sobre la superficie terrestre debido a la transpiración de las áreas verdes.
- Obtener conclusiones sobre la importancia de la vida en la Tierra desde el punto de vista termodinámico y sobre la influencia de la variable temperatura (calentamiento global) en la producción de entropía global.

Hipótesis

- Se tiene la hipótesis de que el fenómeno o proceso más representativo ó con un aporte más significativo a la producción de entropía interna global de la biosfera es el de la transpiración de las áreas verdes de la Tierra (Tributsch et al 2005).

¹Publicado en la revista Journal of Theoretical Biology. Michaelian, J.Theo.Biol 237,2005. 323

- Bajo perturbaciones de temperatura se espera que el sistema vivo bajo estudio muestre una producción de entropía diferente.
- Se espera que la producción de entropía interna de la Tierra debida a la transpiración, represente un porcentaje alto de la producción de entropía global de la Tierra; obteniendo con esto la importancia de la transpiración en la estabilidad de la biosfera.

Metodología

El trabajo realizado se divide en dos partes:

- El método experimental

Se propuso un experimento para determinar el coeficiente de producción de entropía de una planta bajo perturbaciones de temperatura. Utilizando la Unidad de Ambientes Controlados del Área del Conocimiento de Biología, Facultad de Ciencias, UNAM. Se tuvieron cuatro individuos de la misma especie vegetal (*Begonia Semperflorens*) con condiciones de frontera constantes, es decir; humedad relativa, temperatura, intensidad luminosa, flujo de agua (100 ml cada 24 horas) y espectro luminoso constantes. En las cámaras se tuvo un registro de humedad relativa y temperatura en el ambiente cada hora, medidas de la temperatura de la hoja y de la variación en masa del sistema (planta mas tierra) debido al flujo de agua y a la evaporación de las hojas, medida del área verde total promedio en el plazo que duró el experimento. Finalmente se determinó el mismo coeficiente bajo perturbaciones de temperatura, por unidad de área.

- El método analítico

Se analizaron los datos obtenidos experimentalmente en el marco de la teoría y se extrapoló la producción de entropía sobre el área verde total de la Tierra.

Conclusión

Se concluye que la tasa de producción de entropía sí es afectada con la perturbación de temperatura. En la región estudiada de temperaturas se tiene que a menor temperatura se tiene mayor producción de entropía y a mayor temperatura una producción menor. Se puede proponer un modelo lineal al menos en esa región de temperaturas. Es significativo el aporte de la producción de entropía a la producción de entropía global, sin embargo, se necesita refinar el cálculo para obtener la densidad de hojas o densidad estomática por unidad de volumen de biomasa para obtener una mejor aproximación.

Por otra parte, se puede concluir sobre el efecto de un aumento de entropía global en la producción de entropía global de la Tierra. El calentamiento global puede ser un factor tal que la tasa de producción de entropía disminuya.

Parte II

Marco Teórico

Capítulo 1

Sistemas Termodinámicos

En el marco de la termodinámica se definen tres tipos de sistemas: aislados, cerrados y abiertos. Los sistemas aislados son aquellos que no tienen intercambio de materia ni de energía con el ambiente externo que los rodea; es decir, aquellos sistemas que no están conectados causalmente ni correlacionados con nada externo a ellos mismos. El universo como un todo es quizá el único sistema aislado existente, sin embargo, en la práctica muchos sistemas no del todo aislados pueden aproximarse como sistemas aislados.

Los sistemas cerrados son aquellos que tienen intercambio de energía con el ambiente, pero no de materia. Un sistema cerrado puede considerarse como un sistema aislado bajo las restricciones suficientes y necesarias para evitar el intercambio de materia.

Los sistemas abiertos son aquellos que tienen intercambio de energía y materia con el ambiente externo.

La teoría clásica de la termodinámica reversible fue desarrollada en términos de fenómenos reversibles y procesos cuasiestáticos, por tanto se aplica a sistemas aislados o en baño térmico.

La teoría de termodinámica irreversible se utiliza para los sistemas abiertos y cerrados cuando hay flujo de materia ó energía debido a fuerzas externas. La teoría adecuada es lineal cuando los flujos son linealmente proporcionales a las fuerzas, y no lineal cuando no lo son.

La teoría termodinámica irreversible se divide a su vez en la teoría lineal y la teoría no lineal. El marco teórico presentado en este trabajo se basa en la teoría lineal.

1.1. Teoría Termodinámica para Sistemas Aislados y Cerrados

1.1.1. Primera ley

Para sistemas aislados o cerrados se cumple la ley de conservación de la masa

En un sistema cerrado se tiene que la conservación de masa para la mezcla de γ componentes tiene que considerar las posibles reacciones químicas simples que se puedan dar. En un sistema cerrado cualquier variación de la masa debe provenir solamente de las reacciones químicas entre los componentes. El cambio en la masa del componente γ se escribe como:

$$dm_\gamma = \sum_\gamma v_\gamma M_\gamma d\epsilon \quad (1.1)$$

donde M_γ es la masa molar del componente γ y v_γ es el coeficiente estequiométrico de la reacción química, ϵ es el grado de avance de la reacción.

En un sistema cerrado la conservación de energía está dada por:

$$dE = dQ - pdV \quad (1.2)$$

Es decir, la variación de energía dentro del sistema es proporcional a la energía calorífica que gana o pierde el sistema y al trabajo que realiza o se realiza sobre el sistema.

1.1.2. Segunda ley

Existen múltiples procesos que se pueden mencionar en los que se conserva la energía del sistema, sin embargo no todos suceden en la naturaleza; por tanto debe existir otro principio que restringe la posibilidad o imposibilidad

de los fenómenos. Este principio es la segunda ley de la termodinámica puesto que en ésta se da la dirección en el tiempo en la cual ocurren los procesos en un sistema aislado; esta dirección es aquella en que la entropía del universo aumente. En otras palabras, la segunda ley nos dice que un sistema aislado evoluciona espontáneamente a un estado de equilibrio que corresponde al estado de entropía máxima.

En un sistema cerrado la entropía está definida como:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dE + pdV}{T} \quad (1.3)$$

La entropía es una variable extensiva, y por tanto, aditiva. Si se tienen varios componentes en el sistema se suman los cambios en la entropía para cada una de las partes. La entropía total de un proceso en un sistema cerrado es tal que $\frac{dS}{dt} = 0$

1.1.3. Reflexiones sobre la Entropía

La segunda ley introduce una nueva variable de estado que se asocia a los intercambios de energía del sistema, o dicho de modo más preciso, al intercambio de energía calorífica del sistema con su exterior. A diferencia de la energía, la entropía no cumple con una ley de conservación, y por tanto es interesante analizar su evolución en los procesos del sistema.

Lo que dice la segunda ley es que para los procesos espontáneos que ocurren en un sistema aislado existe una variable de estado que no puede hacer otra cosa más que crecer en el tiempo o permanecer constante. Además, si un sistema aislado se encuentra en un estado tal que su entropía tiene un valor máximo, cualquier cambio de estado debe implicar necesariamente una disminución de la entropía, y por tanto, dicho cambio no puede producirse naturalmente. Por tanto la condición de equilibrio es equivalente a tener un máximo en la entropía.

Los enunciados anteriores se aplican únicamente a sistemas aislados; es decir, la entropía de un sistema no aislado puede disminuir en un proceso real, pero siempre deberá ocurrir que la entropía de otros sistemas con los cuales interactúa el primero, aumente por lo menos en igual proporción.

La entropía por tanto es una función de los parámetros extensivos con la particularidad de ser maximizada en los estados de equilibrio. Dado un sistema, la entropía cumple lo siguiente:

1. Es un parámetro extensivo del sistema. Esto es, dados dos subsistemas con entropía S_1 y S_2 , la entropía del sistema formado por los dos subsistemas está dada como:

$$S = S_1 + S_2.$$

2. Es una función homogénea de primer orden. Esto quiere decir que dado un parámetro λ se obtiene lo siguiente:

$$S(\lambda U, \lambda V, \lambda N_1, \lambda N_2, \dots, \lambda N_r) = \lambda S(U, V, N_1, N_2, \dots, N_r) \quad (1.4)$$

3. Es una función creciente, por tanto debe cumplir:

$$\frac{\partial S}{\partial U} > 0, \frac{\partial S}{\partial N} > 0, \frac{\partial S}{\partial V} > 0 \quad (1.5)$$

Desde un punto de vista estadístico, la entropía relaciona el número de microestados que representan un mismo macroestado; es decir, mientras más entropía haya, más posibles estados moleculares tiene el sistema bajo ciertas condiciones de frontera. Con esto, se está haciendo notar que tender al estado de máxima entropía es tender a un número mayor de posibles estados moleculares. Debido a esto se dice que la entropía es una medida del desorden molecular.

Cuando un sistema mantiene un número de microestados posibles constante es estable, pues el déficit de su energía será igual a la cantidad de energía obtenida desde el ambiente.

La entropía está relacionada con el número de microestados posibles para un mismo estado macroscópico y se define como:

$$S = k \log \omega \quad (1.6)$$

Donde ω (número de microestados para sistemas clásicos) es el volumen asociado en el espacio fase a un estado macroscópico en particular. La entropía es la medida de la dispersión de la energía por cambios en los movimientos y disposiciones moleculares de los microestados.

Se suele denotar a la segunda ley de termodinámica como una ley de desorganización progresiva o de olvido de las condiciones iniciales. Es imposible reconstruir el estado inicial a partir del estado final de equilibrio, puesto que

éste es un macroestado representado por un número mayor de microestados que el inicial, es por esta razón que se le conoce como una medida del desorden.

Si se hace el estudio de un sistema en la representación entrópica, es decir, si se obtiene la función de estado de un sistema como: $S = S(U, V, N_1, N_2, \dots, N_r)$ y se denota como $U = X_0$, $V = X_1$, $N_r = X_r$ se definen los parámetros intensivos en términos de la diferencial dS :

$$dS = \sum_{k=1}^r \frac{\partial S}{\partial X_k} dX_k \quad (1.7)$$

Donde $F_k = \frac{\partial S}{\partial X_k}$, F_k son llamados parámetros intensivos entrópicos.

Explícitamente se tiene que: $F_0 = \frac{1}{T}$, $F_1 = -\frac{P}{T}$, $F_2 = -\frac{\mu_1}{T}$, $F_3 = -\frac{\mu_2}{T}$, etc.

Estos parámetros intensivos son aquellos que definen el equilibrio termodinámico de un sistema, puesto que la condición para el equilibrio entre dos sistemas O_1 y O_2 es la igualdad de temperaturas $T_1 = T_2$, $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$, $\frac{\mu_1}{T_1} = \frac{\mu_2}{T_2}$, etc.

Por ejemplo, si se consideran los dos subsistemas y la variable X_0 . Se calcula:

$$dS = \frac{\partial S_1}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial S_2}{\partial U_2} dU_2 = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) dU \quad (1.8)$$

Se tiene por el principio de conservación $dU_1 = -dU_2$ y si se está en el equilibrio $dS = 0$. De ahí que la condición de equilibrio sea $T_1 = T_2$.

Para el estado de equilibrio se tiene entonces que $dS = 0$ y $d^2S < 0$, puesto que se garantiza que se tiene un valor máximo para la entropía y un estado de equilibrio estable. Así, dados dos subsistemas en equilibrio y aislados, $dS=0$ y se obtiene que $F_{1k} = F_{2k}$ para todo parámetro intensivo entrópico F_k (en la sección que sigue se hablará de los estados fuera de equilibrio) y por ende aquellos en que estos parámetros no se igualan.

1.2. Teoría Termodinámica para Sistemas Abiertos

1.2.1. Primera Ley

Conservación de masa

En un sistema abierto que

$$\begin{aligned} dm_\gamma &= d_e m_\gamma + d_i m_\gamma \\ dm_\gamma &= d_e m_\gamma + M_\gamma \sum_\gamma v_\gamma M_\gamma d\epsilon \end{aligned} \quad (1.9)$$

Tomando en cuenta que $\sum_\gamma v_\gamma M_\gamma d\epsilon = 0$ en ausencia de reacciones químicas, se obtiene que el cambio total en la masa está dado por:

$$dm = d_e m \quad (1.10)$$

Es decir, el cambio total en la masa de un sistema abierto es igual a la masa intercambiada con el exterior.

Conservación de energía

Para hablar de conservación de energía en los sistemas abiertos hay que considerar los diferentes flujos que puede haber en las fronteras del sistema. El cambio en la energía del sistema se puede expresar como:

$$dE = d\Phi - pdV \quad (1.11)$$

El término dQ utilizado para sistemas cerrados se sustituye como un flujo de energía $d\Phi$ donde se considera el calor y la energía asociada con la masa transferida al exterior.

Para sistemas de varios componentes, este flujo se puede escribir como un flujo interno, debido a los intercambios de energía entre los componentes, más un flujo externo. Los flujos internos se cancelan entre ellos, como en un sistema cerrado, y se obtiene solamente

$$dQ = \sum_\alpha d_e \Phi_\alpha \quad (1.12)$$

1.2.2. Segunda Ley

La segunda ley de la termodinámica da el sentido de los procesos que ocurren en un sistema aislado; sin embargo, para estudiar a los sistemas abiertos se requiere una extensión o generalización de ésta. Para el estudio de un sistema se tienen que delimitar claramente las fronteras de éste; si el sistema es abierto se debe delimitar lo que se considera el sistema y lo que se considera el ambiente o exterior.

Considerando la parte que proviene solo del sistema y retomando la propiedad extensiva de la entropía se puede observar que la entropía para un sistema abierto está dada en dos partes:

$$dS = d_e S + d_i S \quad (1.13)$$

Donde $d_e S$ tiene que ver con el flujo externo de entropía y $d_i S$ está relacionado con los cambios internos en la producción de entropía debido a los procesos irreversibles que ocurren en el sistema. En un proceso reversible se tiene que $d_i S = 0$ y para un proceso irreversible se tiene que $d_i S > 0$. Si se tiene equilibrio local en el sistema se tiene que:

$$\begin{aligned} dS/dt &= 0 \\ dS_i &= dS_e \end{aligned} \quad (1.14)$$

El flujo de entropía positiva que sale del sistema aumenta la entropía total del universo

$$\frac{dS_T}{dt} > 0 \quad (1.15)$$

donde dS_T es la entropía total del ambiente sumada a la del sistema.

$$S_T = S_{sys} + S_{env} \quad (1.16)$$

Con S_{sys} como la entropía del sistema y S_{env} la entropía del ambiente.

1.3. Teoría Termodinámica de Procesos Irreversibles

1.3.1. Teoría de Prigogine

Como ya se vió, el segundo principio de la termodinámica dá la dirección de los procesos en términos de la entropía. En un sistema abierto ocurren procesos que en un sistema cerrado y aislado no pueden ocurrir, puesto que el sistema está en interacción con el exterior; es decir, un sistema está sujeto a ciertas constricciones que limitan su respuesta y su evolución ante un estímulo externo.

Dado esto, los procesos o fenómenos, se pueden separar en reversibles e irreversibles, los reversibles son invariantes ante la sustitución $t \rightarrow -t$, con t el tiempo.

Los procesos que se llaman espontáneos, ocurren por sí solos cuando existen las condiciones apropiadas. Estos fenómenos son unidireccionales o irreversibles, es decir, si se dejan ocurrir de forma natural, sólo ocurren en una sola dirección, no son reversibles. Esto quiere decir que para llegar a las condiciones iniciales hay que operar el sistema y que éste no actúa en forma autónoma para regresar a las condiciones originales.

En general para el estudio de procesos irreversibles, se consideran sistemas alrededor de su región lineal, aunque las perturbaciones pueden provocar respuestas no lineales. Es decir, la termodinámica clásica irreversible se divide en dos grande ramas: la parte asociada con fenómenos lineales y la otra con fenómenos no lineales. En la región lineal se estudian leyes fenomenológicas lineales, el sistema permanece cercano al equilibrio y evoluciona hacia una producción de entropía mínima. En el caso de la región no lineal el sistema se encuentra muy lejos de la región de equilibrio y en lugar de tener principios extremales para los estados de equilibrio, se tiene un principio evolutivo asociado con la tasa de producción de entropía¹.

En la región lineal se cumple el teorema de mínima producción de entropía², mientras que fuera de la región lineal se tiene que el cambio en la producción de entropía siempre es negativo.

¹Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Ilya Prigogine. Charles c. Thomas Publisher. Tercera edición. 1967

²El régimen estacionario de un sistema abierto cerca del equilibrio se caracteriza por una producción de entropía mínima. El teorema está expuesto en Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Ilya Prigogine. Charles c. Thomas Publisher. Tercera edición. 1967

1.3.2. Teoría de Onsanger

En la naturaleza la mayoría de los procesos son irreversibles y la mayoría de los sistemas son abiertos. En la teoría clásica irreversible existe la hipótesis de equilibrio local. Esta hipótesis postula que las relaciones locales o de subsistemas entre las propiedades térmicas y mecánicas de un sistema físico son idénticas a las de un sistema uniforme y en equilibrio.

Bajo ésta premisa, se puede encontrar una fuerza impulsora o, dicho de otro modo, una "diferencia de concentración" de cierta propiedad del sistema y su exterior (diferencia en los parámetros intensivos entrópicos como se vió en 1.1.3)

Diferencia tal, que es nula en el estado de equilibrio, es decir, cuando el proceso espontáneo se detiene. Estas diferencias pueden ser de tipo energético o material. Son diferencias entre los parámetros intensivos en la representación de entropía del sistema. En términos generales, se puede decir que la naturaleza tiende a generar un estado de concentración homogéneo de todas las propiedades para cualquier punto del universo a través de los fenómenos naturales dada una perturbación. Ejemplos de estas fuerzas o afinidades son: un gradiente de temperatura, un gradiente de presión, un gradiente de concentración, una afinidad química, una diferencia de potencial gravitatorio, eléctrico, etc.

Estas fuerzas originan o desencadenan algún proceso o respuesta del sistema que son la respuesta de la variable extensiva del sistema, o sea, el cambio en el tiempo de las variables extensiva. Se conocen como flujos, ejemplos de éstos son: una corriente eléctrica, un flujo de masa, un flujo de calor, etc.

Dado esto, los fenómenos irreversibles pueden expresarse con relaciones fenomenológicas que establecen que un flujo puede ser producto de todas las fuerzas:

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (1.17)$$

Donde J_i son los flujos, X_i las fuerzas y los coeficientes L_{ik} se denominan coeficientes fenomenológicos de Onsanger. Se supone un sistema en el cual al ocurrir un proceso irreversible los valores de los flujos sólo dependen del valor de las afinidades en ese instante. Si la fuerza o afinidad es nula, no hay respuesta del sistema y el flujo es nulo, entonces se hace una expansión en serie de Taylor quitando sólo los términos constantes:

$$J_k = \sum_j \left(\frac{\partial J_k}{\partial X_j} \right)_0 X_j + \frac{1}{2!} \sum_{i,j} \left(\frac{\partial^2 J_k}{\partial X_i \partial X_j} \right)_0 X_i X_j \quad (1.18)$$

Si las fuerzas son muy pequeñas, es decir, si se considera que el sistema no evolucionará a un nuevo régimen dada esta perturbación (se mantiene en la región lineal), se pueden desprestigiar los efectos a segundo orden; esto quiere decir que el sistema tiene sólo una ligera desviación de los valores del equilibrio, por tanto, se puede usar la teoría de la linealización. Se define

$$L_{jk} = \left(\frac{\partial J_k}{\partial F_j} \right)_0 \quad (1.19)$$

y se obtiene finalmente

$$J_k = \sum_j L_{jk} X_j \quad (1.20)$$

El teorema de Onsager es lo que se conoce como relaciones de reciprocidad entre los coeficientes de la ecuación anterior. Estos coeficientes también son llamados cinéticos y de manera general son entradas de una matriz no necesariamente simétrica; esto significa que si el flujo asociado al proceso irreversible k está influido por la fuerza del proceso j , entonces también el flujo del proceso j está influido por la fuerza k . El teorema de Onsanger por tanto, establece que siempre que se realice una elección apropiada para los flujos J_i y las fuerzas X_i , la matriz de los coeficientes L_{ik} es simétrica; es decir $L_{ik} = L_{ki}$. (Esto se conoce como las relaciones recíprocas de Onsanger). Se supone que el estado de un sistema en particular se define con variables $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Los valores de equilibrio del sistema se llamarán $A_{00}, A_{01}, \dots, A_{0n}$. Se definen entonces las desviaciones de los valores del estado de equilibrio como variables de estado del sistema:

$$\alpha_i = A_i - A_{0i} \quad (1.21)$$

($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$)

En el estado de equilibrio estas variables tienen valores nulos y la entropía está en su máximo valor. En términos de estas variables de estado se tiene la siguiente definición para la entropía:

$$\Delta S = S - S_0 = -\frac{1}{2} \sum_k g_{ik} \alpha_i \alpha_k \quad (1.22)$$

Si se expresa a la entropía en términos de los flujos y las fuerzas, se obtiene en términos del teorema fundamental de Onsager en que los flujos se definen como las derivadas temporales de las variables de estado definidas en la ecuación 1.3.2

$$\frac{\alpha_i}{dt} = J_i \quad (1.23)$$

Las fuerzas se definen como combinaciones lineales de las variables de estado, de tal modo que:

$$X_i = \frac{\partial \Delta S}{\partial \alpha_i} = -\sum g_{ik} \alpha_k \quad (1.24)$$

$i=1,2,3,\dots,n$

Por tanto el flujo de entropía queda definido en términos de las fuerzas y flujos como:

$$\frac{dS}{dt} = -\sum g_{ik} \alpha_i \frac{\alpha_k}{dt} = \sum J_i X_i \quad (1.25)$$

Existe otra forma de llegar a este resultado, ciertamente puede considerarse como una forma más natural. Se sabe que la cantidad dS puede ser expresada de la siguiente forma:

$$dS = \sum_k \frac{\delta S}{\delta X_k} dX_k \quad (1.26)$$

Si se calcula la derivada temporal de esto se obtiene:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_k \frac{\delta S}{\delta X_k} \frac{dX_k}{dt} \quad (1.27)$$

Y sabiendo que los flujos son las derivadas temporales de cada variable X_k y que las afinidades o fuerzas son la respuesta del sistema conocidos como parámetros intensivos (sección 1.1.3), resultados de derivar la entropía respecto a cada uno de los parámetros extensivos (U, V, N_r).

Es decir, la producción de entropía es la sumatoria de todos los flujos por la afinidad correspondiente.

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{k=1}^n X_k J_k \quad (1.28)$$

Así, dado un proceso irreversible en un sistema abierto basta con identificar los flujos y sus afinidades para determinar la producción de entropía del mismo.

1.4. Producción mínima de entropía

En las proximidades del equilibrio termodinámico se satisfacen las condiciones mencionadas anteriormente, sin embargo, si se consideran fluctuaciones que no sean lineales o que alejen al sistema del equilibrio, el sistema puede evolucionar a un nuevo régimen estructural o funcional. (Apéndice A)

Los sistemas que permanecen en un régimen de producción de entropía muy particular pueden estar en lo que se conoce como un estado estacionario fuera del equilibrio.

Un estado de equilibrio se define como aquel en que los valores de las variables no dependen del tiempo y la producción de entropía interna $d_i S = 0$; en cambio un estado estacionario es aquel en que el valor de las variables extensivas no depende del tiempo.

Otra característica de este estado es que la producción de entropía tiene un valor mínimo.

Si se considera que el sistema permanece cercano al equilibrio, digamos un valor S_0 extremo (máximo) de la entropía, los valores de las variables no se alejan tanto de los valores del equilibrio. Se puede desarrollar la teoría del estado fuera de equilibrio con base en la teoría de perturbaciones, sin embargo el estado que se describa no debe estar tan alejado del equilibrio, es decir, se debe poder asociar un valor a las variables extensivas en el tiempo. Si se aproxima alrededor del estado de equilibrio se obtiene que:

$$S = S_0 + \delta S + 1/2\delta S^2 \quad (1.29)$$

Se sabe que S_0 es un máximo para el estado de equilibrio, por tanto

$$\begin{aligned} \delta S &= 0 \\ \delta^2 S &< 0 \end{aligned} \quad (1.30)$$

Además, para que el equilibrio sea estable se requiere que la entropía de exceso $\delta^2 S$ incremente con el tiempo, es decir, $\frac{d(\delta^2 S)}{dt} > 0$ para fluctuaciones constantes o que no se amplifican y por tanto no son suficientes para que el sistema adquiera otro estado de estacionario alejado del equilibrio inicial. Esta ecuación expresa que la producción de entropía es un mínimo; para sistemas aislados, en estado estacionario y con condiciones de frontera constantes, este hecho se cumple siempre.

Capítulo 2

Termodinámica Irreversible

2.1. Estabilidad Física

La condición principal para que un sistema tenga estabilidad desde un punto de vista físico, está dada por la segunda ley de la termodinámica al pedir un valor extremo para la entropía $dS = 0$ y $d^2S < 0$. Esta condición se puede expresar en términos de los criterios de estabilidad.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v = \frac{T}{C_v} > 0 \quad (2.1)$$

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \frac{1}{vK_T} \quad (2.2)$$

A grandes rasgos estos dos principios dicen que una expansión isotérmica de un sistema estable tiene que reducir su presión y que el aporte de calor a un sistema estable e isocórico tiene que aumentar su temperatura.

La ecuación fundamental de cualquier sistema simple homogéneo tiene que ser forzosamente coherente con los criterios de estabilidad. Para que un sistema formado por varios subsistemas esté en equilibrio, debe cumplirse que cada subsistema cumpla los criterios de estabilidad, es decir dada una distribución de energía, volumen y número de moles debe existir entre ellos una relación de equilibrio según las paredes o restricciones que haya entre los subsistemas.

El Principio de Estabilidad de Le Chatelier

El criterio de estabilidad dice que los procesos espontáneos inducidos por una desviación del equilibrio del sistema se efectúan en la dirección que tienda a reestablecer el equilibrio del sistema.

El Principio de Le Chatelier- Braun

Se consideran dos principios extensivos de forma general X_1 y X_2 . Se tiene que en la representación energética:

$$P_1 = \frac{\partial U}{\partial X_1} \quad (2.3)$$

$$P_2 = \frac{\partial U}{\partial X_2} \quad (2.4)$$

Por ejemplo, si X es la entropía, P es la diferencia de temperatura entre la fuente y el sistema; si X es el volumen P es la diferencia de presión.

Por el principio de mínima energía para el equilibrio, una variación espontánea de X_1 tiende a reducir el valor de U ; si se considera fija X_2 se tiene que $dU = P_1 dX_1$ tiene que ser negativo; como P_1 se puede considerar positivo sin pérdida de generalidad, dX_1 tiene que ser negativo y con ello se obtiene el criterio de estabilidad:

$$\frac{\partial P_1}{\partial X_1} > 0 \quad (2.5)$$

puesto que el principio de Le Chatelier exige que la variación de X_1 tienda a reducir el valor de P_1 , es decir tienda disminuir la diferencia de este valor entre la fuente y el sistema.

Si se deja que X_1 y X_2 evolucionen espontáneamente, o P_1 y P_2 se perturban, se tenía que

$$dP_2 = \left(\frac{\partial P_2}{\partial P_1} \right)_{X_2} dP_1 \quad (2.6)$$

Pero X_2 cambia espontáneamente con el fin de reducir la energía, por tanto el signo de X_2 es el opuesto a dP_2 .

La variación espontánea de X_2 induce una variación en P_1 que se representa como:

$$d_2P_1 = \left(\frac{\partial P_1}{\partial P_2} \right) dX_2 \quad (2.7)$$

se sigue que

$$d_2P_1 = - \left[\frac{\left(\frac{\partial P_1}{\partial P_2} \right)_{X_1} \left(\frac{\partial P_2}{\partial X_1} \right)_{X_2}}{\left(\frac{\partial P_1}{\partial X_1} \right)_{X_2}} \right] \quad (2.8)$$

De esto se llega a que

$$d_2P_1 < 0 \quad (2.9)$$

Así, el cambio espontáneo de X_2 es tal que disminuye la perturbación primaria P_1

Cabe hacer notar que el principio de Le Chatelier-Braun expresado en la representación entrópica aunado a un postulado dinámico adicional son la base fundamental en la teoría de los procesos irreversibles.

2.2. Transiciones de Fase

Para ciertos valores de los variables extensivas se rompen los criterios de estabilidad y el sistema se separa en dos o más fases.

Si un sistema se compone de una o más fases, cada una puede considerarse como un subsistema por separado. Las variables termodinámicas que describen al sistema entero, pueden deducirse entonces de la interacción entre fases; si las fases sólo interaccionan mediante un intercambio energético (calor, trabajo), nada nuevo pueden aportar estas interacciones al estudio del sistema, sin embargo, si se consideran reacciones químicas o flujos de masa asociadas a la interacción de las fases, entonces se agregan grados de libertad al sistema. Las condiciones de equilibrio cambian entonces para el sistema entero dadas las nuevas interacciones.

Si se supone interacción con el ambiente por parte de un sistema de una sola componente, se tiene la presencia de un flujo de energía calorífica; dado esto, la entropía varía como:

$$dQ \leq T_0 dS \quad (2.10)$$

Donde T_0 es la temperatura que guarda el ambiente o los alrededores del sistema. Si se tiene además que el trabajo realizado por el ambiente sobre el sistema está dado en términos de la presión p_0 como:

$$dW = -p_0 dV \quad (2.11)$$

Si se considera la ley de conservación de energía en el sistema y se introduce una función A, se tiene que:

$$dU \leq T_0 dS - p_0 dV \quad (2.12)$$

$$dA = dU - T_0 dS + p_0 dV \leq 0$$

$$A = U - T_0 S + p_0 V \quad (2.13)$$

A se conoce como energía libre o utilizable del sistema y se refiere a la cantidad máxima de trabajo que puede extraerse de un sistema en un ambiente determinado. Si se tiene que $dA \leq 0$, esto quiere decir que la energía libre utilizable de un sistema no puede aumentar dado un cambio interno de éste, por tanto, una condición de equilibrio tras múltiples interacciones entre las partes que conformen al sistema sería $dA=0$; es decir un extremo, y de hecho, un mínimo para la energía libre; esto es, se alcanza el valor mínimo del trabajo que puede ser extraído del sistema.

2.2.1. Potencial de Gibbs en Cambios de Fase

En términos de la energía libre y los otros potenciales termodinámicos, el equilibrio entre fases corresponde a principios extremos de los potenciales. Dentro de los valores extremos más comunes están los siguientes:

Variables Conocidas	Potencial	Condición de Equilibrio
T,p	G	mínimo
T,V	F	mínimo
U,V	S	máximo
S,V	U	mínimo
S,p	H	mínimo

Cuadro 2.1: Potencial extremo según las variables conocidas del sistema

Para procesos que ocurren en un sistema cerrado de un solo componente a presión y temperatura constante, por ejemplo para un líquido en coexistencia con su vapor a la misma temperatura y presión, es útil trabajar con el potencial de Gibbs, pues se tiene que:

$$\begin{aligned}dG &= -SdT + VdP + \mu dN \\ G &= U - TS + PV\end{aligned}\quad (2.14)$$

Se sabe de $dT=dP=0$, e introduciendo la relación de Euler para la energía libre U se obtiene:

$$G = \sum_{k=1}^r \mu_k N_k \quad (2.15)$$

donde r es el número de componentes del sistema, en particular puede ser uno. Por lo que el cambio en número de moléculas y el potencial químico μ es lo que importa para determinar la energía libre. En sistemas de un solo componente el potencial de gibbs molar g es igual a μ , puesto que $g = \frac{G}{N} = \mu$

Equilibrio entre fases: La Ecuación de Clausius-Clapeyron

Una sustancia simple tiene dos grados de libertad; sin embargo si se tienen dos fases coexistiendo en equilibrio, sólo permanece un grado de libertad. Esto es, la presión y la temperatura de un líquido en equilibrio pueden escogerse libremente, pero si está en equilibrio con su vapor, la presión resulta ser una función biunívoca de la temperatura.

Se considera un sistema formado por dos fases de la misma sustancia. Estas fases pueden ser sólido-líquido, líquido-vapor. Para hacerlo de forma general se llamarán fase 1 y fase 2.

Se examina el sistema a una presión P y temperatura T constantes; las dos fases tiene un número de moléculas N_1 y N_2 . Por la ley de conservación de masa para sistemas aislados y cerrados se tiene que $N_1 + N_2 = N$ con N constante.

Si T y P son constantes se puede reducir el análisis de la situación a la energía libre de Gibbs. Para los principios extremos de los potenciales se tiene que G debe ser minimizado en el equilibrio, esto es, los valores de N_1 y N_2 deben adquirir valores tales que G adquiera un valor extremo mínimo. Como se tienen variables intensivas para el potencial de Gibbs la energía total será la suma de las energías de cada uno de los subsistemas $G = G_1 + G_2$ de donde se sabe que

$$G = \mu_1 N_1 + \mu_2 N_2 \quad (2.16)$$

Si están en equilibrio las fases, el potencial G debe permanecer invariante ante cambios diferenciales de N_1 y N_2 , por tanto:

$$\begin{aligned}dG &= 0 \\ dG &= \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2\end{aligned}\quad (2.17)$$

Se tiene que $(\mu_1 - \mu_2)dN_1 = 0$ y con ello la condición de equilibrio termodinámico que exige que los valores de los potenciales químicos (potencial de gibbs molar) se igualen.

Dada entonces la relación entre los potenciales se puede saber el flujo de moléculas de una fase a otra con temperatura y presión dadas.

Para el caso en que $g_1(T, p) = g_2(T, p)$ o lo que es lo mismo para sistemas de una sola componente $\mu_1(T, p) = \mu_2(T, p)$. Si se considera entonces la curva límite entre dos fases de una sustancia.

En cualquier parte de esta curva se deben tener valores iguales para el potencial de Gibbs; en particular si se toman dos puntos $a=(T, p)$ y $b=(T+dT, p+dp)$ esto debe cumplirse:

$$\begin{aligned} g_1^a &= g_2^a \\ g_1^b &= g_2^b \end{aligned} \quad (2.18)$$

Por lo tanto al pasar de a hasta b se puede escribir

$$\begin{aligned} dg_1 &= \left(\frac{\partial g_1}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial g_1}{\partial T} \right)_p dT \\ dg_2 &= \left(\frac{\partial g_2}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial g_2}{\partial T} \right)_p dT \end{aligned} \quad (2.19)$$

Para esta curva se tiene la condición de coexistencia aun para temperaturas y presiones diferentes, esto es: $\mu_1(T + dT, p + dp) = \mu_2(T + dT, p + dp)$ se obtiene con esto que $d\mu_1 = d\mu_2$.

Si se ve en términos del potencial de gibbs molar se tiene que:

$$dg_1 = dg_2 \quad (2.20)$$

donde dg_1 representa la variación de la energía libre de gibbs por molécula para la fase i si esta fase es llevada a la temperatura $T+dT$ y a la presión $p+dp$.

Por otra parte, la energía libre por molécula está dada como:

$$g_i = \frac{G_i}{N_i} = \frac{E_i - TS_i + pV_i}{N_i} \quad (2.21)$$

O bien, en términos de las variables molares

$$g_i = \varepsilon_i - Ts_i + pv_i \quad (2.22)$$

donde las variables molares sólo se definen al dividir entre N a las variables extensivas E, S y V. Se sigue que

$$dg_i = d\varepsilon_i - Tds_i - s_i dT + pdv_i + v_i dp \quad (2.23)$$

Y utilizando la relación $Tds_i = d\varepsilon_i + pdv_i$ se obtiene para la energía libre molar

$$dg_i = -s_i dT + v_i dp \quad (2.24)$$

Si se consideran las dos fases y se aplica el resultado de la ecuación (2.20), se obtiene

$$-s_1 dT + v_1 dp = -s_2 dT + v_2 dp \quad (2.25)$$

o bien:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta s}{\Delta v} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \quad (2.26)$$

conocida como ecuación de Clausius-Clapeyron.

Esta ecuación puede reescribirse en términos de la entropía del proceso o del calor latente de la transformación

$$\Delta S = \frac{L_{12}}{T} \quad (2.27)$$

donde L_{12} es el calor latente, como:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_{12}}{T\Delta V} \quad (2.28)$$

Haciendo ciertas aproximaciones, como que el calor latente L depende linealmente de la temperatura, e integrando se tiene que

$$R \ln p = -\frac{L_0}{T} + L_1 \ln T + C \quad (2.29)$$

donde C es una constante de integración.

La función o potencial de Gibbs de una sola fase se puede representar como una superficie $g(p,T)$; por lo tanto para cada fase se puede dibujar esta superficie y por ende, las líneas donde se intersecten serán las líneas en las cuales coexisten en equilibrio las fases.

Si se considera una sustancia en sus tres fases, se tienen tres superficies que se intersectan en un solo punto que queda determinado por las condiciones de equilibrio para las tres fases (puesto que se pierde el otro grado de libertad y el punto p,T queda determinado unívocamente)

Las transiciones de fase se clasifican de acuerdo a dónde presenten una discontinuidad dentro del cambio de la función de Gibbs; el orden de la transición se define como el orden de la derivada más baja de la función de Gibbs que muestre una discontinuidad en la transición.

Se tiene que $(\frac{\partial g}{\partial p})_T = v$ y $(\frac{\partial g}{\partial T})_p = -s$

Se deduce de las líneas de equilibrio entre fases que a temperatura constante el vapor debe ser siempre el de valor de presión más bajo; y mientras mayor valor de g se tenga a presión constante la fase de temperatura mayor es la que tiene una entropía mayor.

Esto es, durante las transiciones de fase se tienen cambios debido al cambio de presión y de temperatura, cuya continuidad puede perderse. Si la transformación de fases líquido-vapor se sigue de tal modo que la temperatura aumente, resulta que el calor latente y la variación de volumen se hacen cada vez menores hasta que se anulan, tendiendo a desaparecer. Este punto se conoce como punto crítico. Por encima de este punto se puede pasar continuamente del líquido al vapor.

El tipo de transición que se ha analizado de un solo componente en dos fases es de primer orden, es decir tiene discontinuidades en la primera derivada.

2.3. Evaporación del agua

El agua tiene una gran capacidad térmica, es decir, puede recibir mucha energía calorífica antes de aumentar en mucho su temperatura, debido a esto, está presente en gran parte de los sistemas biológicos, puesto que ayuda en la regulación de la temperatura de la biota y de la Tierra. La evaporación del agua a presión de 1 atmósfera ocurre a la temperatura de 100°C o de 373 K en escala absoluta.

Presión de Vapor

Los dos componentes que fluctúan en el proceso de evaporación del agua son la presión de vapor en el subsistema que tiene al líquido y la presión de vapor en el aire. La presión de vapor o presión de saturación es el valor de la presión, para una temperatura dada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio.

Se tiene para el proceso

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_{12}}{T\Delta v} \quad (2.30)$$

La ecuación de Clausius-Clapeyron puede usarse para determinar la presión de vapor de un líquido con su estado gaseoso a temperatura T. Se define L_{12} como el calor latente por mol, 1 será la fase líquida y 2 la gaseosa.

$$\Delta V = V_1 - v_2 = V_2 \quad (2.31)$$

Puesto que $V_1 \ll V_2$ ya que la fase líquida es más densa que la fase gaseosa. Si se considera al vapor como un gas ideal

$$pV_2 = RT \quad (2.32)$$

Y reescribiendo la ecuación inicial se tiene que:

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dT} = \frac{L}{RT^2} \quad (2.33)$$

Si se considera L independiente de la temperatura se tiene que

$$\begin{aligned} \ln(p) &= -\frac{L}{RT} + \text{constante} \\ p &= p_0 e^{-\frac{L}{RT}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Se nota que $L > RT$, por lo tanto la presión de vapor es una función que crece muy rápido con la temperatura.

2.3.1. Potencial Químico como función de la Temperatura y Presión

El potencial químico, como se expuso anteriormente, impone una condición para el equilibrio entre fases. El potencial químico del agua a $25^\circ\text{C}=298\text{ K}$ y $1\text{ Atm}=10^5\text{ Pa}$, está dado en la siguiente tabla:

Agua	Kgibbs= $\frac{J}{mol}$
Líquido	-228.59
Vapor	-237.18
Sólido	-236.59

Cuadro 2.2: Potencial químico del agua en condiciones estándares

Si la temperatura no varía más de 10°C el potencial químico se puede considerar una constante. Se llamará μ_l al potencial de la fase líquida del agua y μ_v al potencial químico de la fase de vapor. Para cada una de las fases el potencial tiene una aproximación en términos de la temperatura y de la presión.

Los experimentos de laboratorio se realizan a menudo bajo condiciones de presión y temperatura constantes. En estas condiciones, el potencial químico es la derivada parcial de la energía libre de Gibbs respecto a la cantidad de materia:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_j \neq i} \quad (2.35)$$

El fenómeno de evaporación del agua se puede estudiar en condiciones diferentes de temperatura, por tanto, se puede proponer una función $\mu(T, P)$ tal que refine los cálculos que se arrojen de analizar dicho proceso.

El potencial químico para la fase líquida del agua se puede obtener de:

$$\mu_l = -T \frac{\partial S}{\partial N} = -Ts \quad (2.36)$$

Donde s es la entropía molar de saturación.

En cambio para la fase gaseosa se tiene lo siguiente; para el potencial químico de un componente de una mezcla de gases, depende de T , p y los demás elementos de la mezcla. Se utilizan los conceptos de actividad y fugacidad.

Se expresa como sigue

$$\mu_{vi} = \mu_{vi}^0(T) + RT \ln(f_i) \quad (2.37)$$

El primer término μ_{vi}^0 depende sólo de la temperatura, mientras que la fugacidad f_i puede depender también de las otras variables.

Para una mezcla de líquidos se tiene que:

$$\mu_{vi} = g_i(T, p) + RT \ln(a_i) \quad (2.38)$$

donde g_i es una función de la temperatura y la presión, mientras que a_i , la actividad, puede ser función de T , p y la composición de la mezcla.

Aunque no se puede deducir gran cosa de la ecuación, se puede saber que el potencial químico es proporcional a la actividad, y con esto, de hecho se justifica toda una teoría del equilibrio entre fases y componentes que se desarrolla en términos de la actividad y no del potencial químico.

En el sistema racional de actividades, que es una forma de abordar la teoría de la actividad, $g(T, p)$ se identifica con el potencial del líquido puro $\mu_{vi}^0(T, p)$ tal que:

$$g_i(T, p) = \mu_{vi}^0(T, p) \quad (2.39)$$

Se tiene entonces que

$$\mu_{vi} = \mu_{vi}^0 + RT \ln a_i \quad (2.40)$$

Cuando $x_i \rightarrow 1$, el sistema se acerca más a i puro y μ_{vi} debe aproximarse a μ_i^0 , de modo que $\mu_i - \mu_{vi}^0 = 0$ cuando $x_i \rightarrow 1$.

Se tiene $\ln(a_i) = 0 \rightarrow a_i = 1$ cuando $x_i \rightarrow 1$.

De esto se deduce que la actividad del líquido puro es la unidad. Si se comparan los resultados encontrados se tiene que:

$$\mu_v^{id} = \mu_{vi}^0 + RT \ln x_i \quad (2.41)$$

y restando las dos ecuaciones se tiene que:

$$\mu_{vi} - \mu_{vi}^{id} = RT \ln \frac{a_i}{x_i} \quad (2.42)$$

Se define el coeficiente racional de actividad de i como $\gamma_i = \frac{a_i}{x_i}$

Sustituyendo este coeficiente se obtiene:

$$\mu_{vi} = \mu_{vi}^{id} + RT \ln \gamma_i \quad (2.43)$$

Se obtiene que el coeficiente racional de actividad es igual a la unidad cuando x_i es 1.

Actividades Racionales

La actividad racional de los componentes volátiles de una mezcla puede calcularse midiendo la presión parcial del constituyente en la fase vapor en equilibrio con el líquido. Puesto que para el equilibrio, los potenciales químicos de ambas fases son iguales. Se supone que el gas es ideal y que tiene una presión parcial p_i

$$\mu_i^0 + RT \ln a_i = \mu_i^0(g) + RT \ln p_i^0 \quad (2.44)$$

Donde p_i^0 es la presión de vapor del líquido puro. Se obtiene de las ecuaciones anteriores que

$$a_i = \frac{p_i}{p_i^0} \quad (2.45)$$

que es, para una solución no ideal, la ecuación análoga a la ley de Raoult¹. Así, la medición de la presión parcial p_i sobre la solución y el conocimiento de p_i^0 determina el valor de la actividad a_i

Cálculo de Presión Parcial $P_i(RH)$

La presión de vapor es una función de la temperatura.

Temperatura(°C)	Presión de Vapor(torr)	Densidad del vapor(g/lt)
0	4.6	0.0048
20	17.5	0.0173
40	55.3	0.0511
60	149	0.1305
80	355	0.294
100	760	0.598

Cuadro 2.3: Tabla de presión de vapor absoluta del agua en función de la temperatura

A 100°C la presión de vapor es de 1 atmósfera. La densidad de vapor de agua en condiciones estándares es de 0.80 g/litro, con este valor se obtienen los datos de la tercer columna.

Como se ve en la tabla 2.3, la presión de vapor varía mucho con la temperatura, es decir, en los días fríos, la presión de vapor es muy baja, y por tanto la cantidad de agua en el ambiente es poca. Para un día caluroso en cambio, se tienen valores altos, la presión de vapor llega a ser igual a 5 % de 1 atm. La presión de vapor de agua se usa para definir y medir la humedad.

Para obtener una expresión mucho más precisa para la presión parcial, se tiene lo conocido como humedad relativa, ésta trata de la relación entre la presión parcial del vapor de agua que existe en la atmósfera y la máxima presión parcial posible a esa misma atmósfera. Si a cierta temperatura el aire contiene la cantidad máxima posible de vapor de agua, se dice que está saturado. En este caso, la humedad relativa es de 100 %.

En general se tiene:

$$HR = \frac{P_i}{P_s} X 100\% \quad (2.46)$$

Donde HR es la humedad relativa, P_i es la presión parcial del vapor de agua y P_s es la presión que corresponde a la saturación².

¹La Ley de Raoult establece que la relación entre la presión de vapor de cada componente en una solución ideal depende de la presión de vapor de cada componente individual y de la fracción molar de cada componente en la solución

²la presión donde a una cierta temperatura permanecen en equilibrio la fase líquida y vapor del agua

La humedad relativa puede medirse de varias maneras, que dependen de la relación entre las condiciones reales y las que corresponden a la curva de presiones de vapor.

Conocidas las humedades relativas, se puede obtener entonces la presión parcial como:

$$P_i = \frac{HR}{100} X P_s \quad (2.47)$$

Se podrá hacer un ajuste de esto y obtener la presión de saturación para distintas temperaturas.

Capítulo 3

Tierra, Vida y Entropía

"La enfermedad era la forma depravada de la vida. ¿Y la vida? ¿No era quizá también una enfermedad infecciosa de la materia; lo mismo que lo que podía llamarse la génesis original de la materia no era tal vez más que la enfermedad, que el reflejo y la proliferación de lo inmaterial? El primer paso hacia el mal, la voluptuosidad y la muerte había partido, sin duda alguna de allí donde, provocada por el cosquilleo de una infiltración desconocida, esa primera condensación del espíritu, esa vegetación patológica y superabundante se había producida de su tejido, medio por placer, medio por defensa, constituyendo el primer grado de lo substancial, la transición de lo inmaterial a lo material. Era el pecado original. La segunda generación espontánea, el paso de lo inorgánico a lo orgánico, ya no era más que una peligrosa adquisición de conciencia del cuerpo, lo mismo que la enfermedad del organismo era una exageración embriagada y una acentuación depravada de su naturaleza física. La vida no era ya más que una progresión por el camino aventurero del espíritu que se había vuelto impúdico, un reflejo del calor de la materia despierta a la sensibilidad y que se había mostrado sensible a ese llamamiento"¹

3.1. Definiciones de Vida

Históricamente el fenómeno vida ha sido la causa de una gran creación de teorías y explicaciones que intentar justificar su existencia. Desde el punto de vista físico, su estudio se remite a 1886 con Boltzmann

...The general struggle for existence of living beings is therefore not a fight . . . for energy, which is plentiful in the form of heat, unfortunately untransformably, in every body. Rather, it is a struggle for entropy . . . that becomes available through the flow of energy from the hot Sun to the cold Earth. To make the fullest use of this energy, the plants spread out the immeasurable areas of their leaves and harness the Sun's energy by a process as yet unexplored, before it sinks down to the temperature level of our Earth, to drive chemical syntheses of which one has no inkling as yet in our laboratories...

Al intentar estudiar la vida con termodinámica para sistemas cerrados y en equilibrio, el sistema vivo contradecía la segunda ley de la termodinámica. Esto es, porque al ser un sistema cerrado en equilibrio y mantener estructuras organizadas al mismo tiempo, un sistema vivo violaría el plantemiento de la segunda ley de la termodinámica, porque estaría disminuyendo constantemente la entropía (y no tendría un máximo en el equilibrio).

Como no se había desarrollado la teoría de termodinámica irreversible, no había un modo de aproximar un sistema vivo. Se debía de considerar que el sistema era abierto puesto que tiene un constante intercambio material y energético con su ambiente, sin embargo no había teoría para tal caso.

No fué sino hasta mediados del siglo XX que se concibió como un sistema en estado fuera del equilibrio, pero con condiciones de frontera constantes y por tanto guardando un estado estacionario, es decir, se debe considerar al sistema como el objeto vivo más su ambiente (esto se traduce en considerar al objeto vivo como un sistema termodinámico abierto).

En 1944 Schrödinger publicó el libro de *What is life?* donde plantea las siguientes preguntas: *What is the characteristic feature of life? When is a piece of matter said to be alive?* Para responder a esta pregunta plantea la posibilidad de que la vida sea sólo la cualidad que retiene o dilata el estado de equilibrio para los procesos químicos de un organismo.

¹La Montaña Mágica, Thomas Man

Es decir, si se deja a un sistema evolucionar espontáneamente dadas ciertas constricciones físicas o estructurales, el sistema tenderá a su estado de máxima entropía o de equilibrio, pero en el caso de la vida, este estado sería la muerte.

El principal enigma de la vida es la clave para dilatar el estado de equilibrio; desde tiempos de antaño se ha atribuido esto a una fuerza sobrenatural que actúa en el organismo y de aquí pueden derivar un sin fin de teorías teológicas, filosóficas, etc.

Sin embargo, el punto de vista de la ciencia moderna es otro. Uno de los medios por los cuales se obtiene esta dilatación es por comer, beber, respirar, etc. Todos estos procesos se agrupan en el término metabolismo, palabra griega que quiere decir cambio o intercambio. Schrödinger plantea las siguientes preguntas: *Exchange of what?* (¿Intercambio de qué?). Y se contesta, que si el intercambio de material fuera la cosa esencial sería absurdo, puesto que cualquier átomo es tan bueno como otro de su especie; ¿qué es entonces lo que hay en nuestra comida que nos guarda de la muerte? La respuesta que da a esto radica en la entropía. La vida sólo puede mantenerse lejos de su estado de máxima entropía si continuamente toma de su ambiente entropía negativa; es decir, un organismo se alimenta de entropía negativa o para ponerlo en otros términos, un organismo se libera de toda la entropía que no le sirve para mantenerse vivo.²

Con los planteamientos de su libro, Schrödinger propone una reconciliación entre las ideas de auto-organización de la biología y las leyes de la termodinámica, por medio de considerarla un sistema abierto y con constantes flujos en su interior y con los alrededores.

Asentado ya el marco termodinámico se tiene que la cualidad de la vida no difiere de organismos unicelulares a organismos macrocelulares, es decir, no se está menos o más vivo, en proporción al tamaño, por tanto, se dice que la vida más que un cuerpo material, es un estado termodinámico de la materia. En términos de procesos, la vida no es un proceso espontáneo, pues para que haya ocurrido se necesitó agregar energía. Así pues, la vida es un estado termodinámico con posibilidad no nula de ocurrir dadas las condiciones energéticas en todo el Universo a partir de la gran explosión.

Cabe hacer notar que la vida no es un estado de equilibrio, aún cuando suela hablarse de su origen como una tendencia general del planeta y demás astros por tender al equilibrio. Es decir, se habla de que la vida surgió temporalmente, cuando las condiciones en la Tierra se estabilizaron, por tanto, tendían al equilibrio; por ello a veces lo toman como un estado de equilibrio. Dado que la vida y la tierra misma son sistemas termodinámicos abiertos, y no en estado de equilibrio, no es correcto hacer esta aseveración respecto a las condiciones del origen de la vida, y en todo caso, la vida podría considerarse más bien un factor que ayude a la homeostasis³, pero no al equilibrio de la Tierra.

En base a lo expuesto en la sección 1.1.3 se tiene otra definición interesante de vida: *"Propiedad de un sistema de unidades materiales que en un ambiente apropiado origina por unidad de tiempo un aumento reducido de la entropía; propiedad que reduce el aumento general de la entropía"*.⁴ Por tanto la vida es un estado de la materia cuya propiedad es la dilación en la difusión o dispersión espontánea de la energía interna de las biomoléculas hacia más microestados potenciales. La energía de los sistemas vivos se mantiene alternando entre un número reducido de microestados. El estado de energía conocido como vida es la cantidad, posición y momentum en un tiempo dado durante el cual acontece la convergencia de un conjunto de microestados que restringen, de manera autónoma, la generación de más microestados hacia los cuales pueda ser dispersada la energía.

3.2. La Tierra como sistema termodinámico abierto

En el marco histórico del estudio del fenómeno de la auto-organización en la tierra, existe la llamada Teoría de Gaia. Esta teoría fue publicada por el químico James Lovelock en 1979, siendo apoyada y extendida por la bióloga Lynn Margulis. En palabras de Lovelock, *"Gaia es una entidad compleja que implica a la biosfera, atmósfera, océanos y tierra; constituyendo en su totalidad un sistema cibernético o retroalimentado que busca un entorno físico y químico óptimo para la vida en el planeta"*⁵

Según la hipótesis de Gaia la atmósfera y la parte superficial del planeta Tierra se comportan como un sistema organizado donde la vida, que le da una cualidad única, se encarga de autorregular las condiciones esenciales tales como la temperatura, composición química y salinidad en el caso de los océanos. Gaia se comportaría como un sistema auto-regulador (que tiende al equilibrio y a través del fenómeno vida mantiene las condiciones adecuadas

²... succeeds in freeing itself from all the entropy it cannot help producing while alive...

³Es la característica de un sistema abierto o cerrado, por ejemplo, un organismo vivo, mediante la cual se regula el ambiente interno para mantener una condición estable y constante

⁴Laskowski p. 149

⁵El nombre fue una sugerencia del escritor William Golding hacia Lovelock. Le propuso que la denominase "Gaia", pues es el nombre de la diosa griega de la Tierra (Gaia, Gea o Gaya).

para sí misma). Esta teoría se basa en la idea de que la biomasa autorregula las condiciones del planeta para hacer su entorno físico más hospitalario para las especies que conforman la "vida". La hipótesis Gaia define esta hospitalidad como una completa homeostasis.

Las causas de la auto-organización de la tierra se encuentran actualmente en discusión. Se discute sobre el papel de los procesos bióticos en esta organización (Kirchner 2003; Volk 20003). Los seguidores de la teoría de Gaia más ortodoxos apoyan la idea de que no son los procesos bióticos los responsables de esta organización, y más bien es una especie de "conocimiento de sí misma, consciencia" de la tierra la que lo hace posible.

Los seguidores de la teoría de Gaia con mayor apoyo y difusión creen que la cualidad de auto-organización de la Tierra se debe principalmente a la biota terrestre. Y de hecho apoyan el hecho de que ese proceso incrementa la producción de entropía.⁶

3.2.1. La Biota en el Planeta

Biomias y Albedo

En función de las características básicas del clima, temperatura, humedad, altitud, latitud, etc. se puede dividir a la tierra en zonas con elementos semejantes. Asimismo, dentro de cada una de estas zonas se desarrollan una vegetación y fauna parecidas. Estos factores nos dan la definición de bioma. Un bioma es una determinada parte del planeta que agrupa a más de un ecosistema y que comparte un clima, vegetación y fauna relacionados. Un bioma puede agrupar más de un ecosistema. Los biomias se pueden dividir en tres tipos: biomias terrestres, biomias dulceacuícolas y biomias marinos. La mayor diversidad se tiene en los terrestres. Entre los biomias terrestres tenemos: la tundra, los bosques de coníferas, los bosques deciduos, los pastizales, los desiertos y las selvas de lluvia. La zona de transición entre biomias o las fronteras, en este caso, se denomina ecotonía. Esta zona aísla las características particulares de cada bioma, por lo tanto se puede considerar como una condición de frontera bien delimitada. Cabe hacer notar que no son fijas o constantes, pero se pueden considerar así puesto que inducen estados estacionarios en los diferentes biomias.

La autoorganización de la Tierra como consecuencia de los biomias terrestre del planeta, puede ser medida en términos del flujo de entropía asociado al intercambio de energía con el sol. Es decir, la fuente de la auto-organización es la "degradación" de la radiación solar.

La Tierra absorbe la energía, la utiliza en los procesos de la biosfera y la regresa al Universo o exterior. La forma en que es regresada esta energía es como radiación electromagnética cuya longitud de onda es (órdenes de magnitud) mayor que la radiación incidente en fotones. La pérdida de energía libre está entonces reflejada en un cambio de longitud de onda entre la radiación incidente y la radiación que es devuelta al universo. El efecto de la biota terrestre puede ser cuantificado entonces midiendo el flujo de entropía neto asociado con la radiación solar sobre la superficie terrestre (Kleidon 2000; Kleidon 20002; Kleidon 2006; Kleidon & Lorenz 2004; Lenton & Wilkison 2003)

Se tiene la hipótesis de que el fenómeno más representativo o con un aporte más significativo a la producción de entropía interna es la transpiración de las áreas verdes de la Tierra (Tributsch et al 2005) y la evaporación en el mar, por tanto debería poderse balancear o representar un gran porcentaje de la producción de entropía asociada con la radiación solar incidente sobre la Tierra.

Desde un punto de vista termodinámico, la tierra se considera un sistema termodinámico abierto, pues tiene intercambio de energía y materia con su ambiente; sin embargo si consideramos la producción de entropía solamente, la tierra se puede considerar un sistema cerrado pues el aporte a la producción de entropía por intercambio de materia es insignificante comparado con el aporte por intercambio de energía.

Considerando condiciones de frontera constantes para cada ecosistema y una temperatura conocida, se puede suponer la existencia de un estado estacionario y se puede calcular el flujo de entropía de la tierra como un sistema termodinámico cerrado cuyo proceso principal para el intercambio de energía es la transpiración de la biosfera y evaporación de los mares y su proceso de intercambio de materia es casi nulo. Además se consideran condiciones de frontera constantes y la existencia de un estado estacionario.

3.2.2. Albedo 0.39 y Cuerpo Negro

Albedo es el poder reflectante de un planeta u otro cuerpo luminoso. Un reflector perfecto tendría albedo de un 100%. El Albedo es la relación, expresada en porcentaje, entre la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide sobre la misma en un rango de frecuencia especificado. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates.

⁶Se denomina hipótesis de AntiGaia aquella que dice que la actividad de la biota disminuye la producción total de entropía

El albedo medio de la Tierra es de 0.39 ó 39 %. En comparación con otros astros del sistema solar, se tiene que: la luna tiene un albedo de 7, mercurio de 6, Venus de 70, la tierra de 37 a 39, Marte de 15, Júpiter de 41, Saturno de 42, Urano de 45, Neptuno de 55, Fobos de 6, Deimos de 6, el cometa Halley de 4, etc.

Dado el bioma del planeta varía el albedo, y de hecho, también depende de la temporada y de la atmósfera. Una superficie mojada tiene menor valor de albedo que una seca, puesto que el agua absorbe parte de la radiación incidente; sin embargo se considera un albedo promedio de la Tierra de 0.39. En términos simples los efectos de la biota sobre la Tierra se reflejan en el albedo, puesto que no es lo mismo tener un área con alta vegetación que un desierto. El desierto tendrá un valor mayor de albedo, puesto que refleja más radiación y un área verde tendrá un menor valor de albedo puesto que absorbe más; en términos de la teoría de cuerpo negro esto es porque una superficie cubierta con vegetación es más oscura que un área desierta.

Area Verde total de la Tierra

En el artículo de "*Earthshine Observation of Vegetation and Implication for Life Detection on other planets*" de Luc Arnold, dado que la biosfera cubre gran parte de la superficie terrestre, se plantea la hipótesis de considerar a la vegetación como un marcador global que indique la existencia de vida en otros planetas o astros, esto se hace en base al espectro característico de la vegetación.

La vegetación verde refleja la radiación solar en el infrarrojo cercano, con una longitud de onda en promedio de 700 nm; este factor es llamado VRE (Vegetation Red Edge).

Actualmente la NASA tiene la misión EOS (Earth Observing System) que se cubre con el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del satélite TERRA-1 y del satélite Aqua. El sensor fue creado para capturar imágenes de la atmósfera, mar y tierra y transmite datos en 36 bandas que van desde el espectro visible hasta el infrarrojo, con una resolución espacial de 250, 500 y 1000 metros. TERRA-1 se lanzó en diciembre de 1999 y el Aqua en el 2002. La imagen a considerar muestra una densidad de la cubierta verde o de plantas que cubren la superficie terrestre.

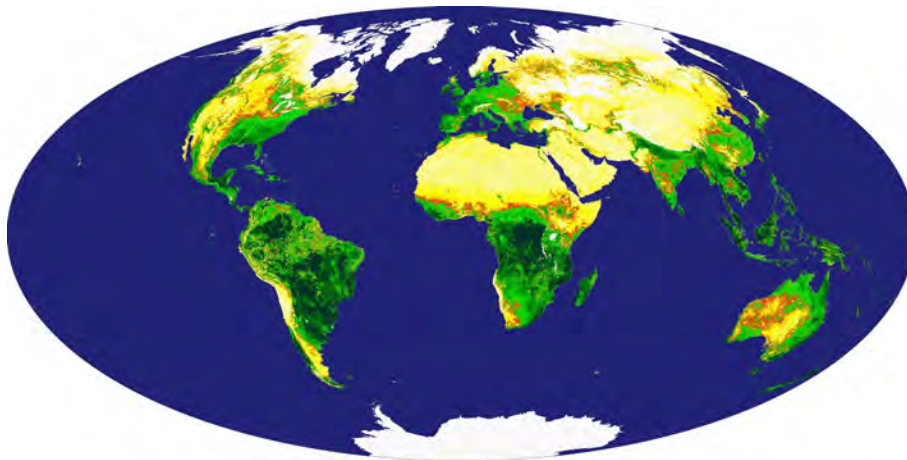


Figura 3.1: Area Verde total de la Tierra

Los datos considerados fueron tomados de imágenes con una resolución espacial de 500 metros. El cambio de la vegetación en el tiempo es capturado por medio del satélite y se pueden reconstruir así las diferentes zonas de vegetación o los diferentes usos de suelo. Los datos se graban por medio del espectro que reflejan y con esto se obtienen las diferencias de composición de los suelos.

Se obtiene que:

- Zonas urbanas y en construcción, 0.5 %. Tierras cubiertas por construcciones, caminos, carreteras y obras humanas.
- Zonas permanentes de manglar, 0.9 %. Son zonas donde abunda el agua mezclada con una vegetación boscosa o densa, como un manglar.
- Bosques caducifolios de coníferas 1.2 %. Más del 60% de estas tierras está cubierto por bosque, con árboles cuya altura excede los 5 metros. En temporadas de frío los árboles de estas zonas pierden las hojas por

completo.

- Bosques caducifolios de hojas anchas, 1.5 %. Más del 60 % de estas tierras está cubierto por bosque; la altura de los árboles excede los 5 metros. en la época de secas o frío los árboles tiran las hojas.
- Arbustos, 1.5 %. Los arbustos son la vegetación dominante en esta zonas, cubren más de un 40 %. No exceden los 5 metros de altura, los arbustos pueden ser perenes o caducifolios. En estas zonas menos de un 10 % es cubierto por árboles de mayor altura.
- Bosque perene, 2.8 %. Más del 60 % de la zona es cubierto por bosque, los árboles exceden los 5 metros de altura.
- Bosque Mixto 4.1 %. Más de un 60 % de estas zonas es cubierto por bosque; la altura de los árboles excede los 5 metros. Son bosques con árboles caducifolios y perenes, donde ningún tipo abracamenos de un 25 % o más de un 75 %.
- Tierras de cultivo 6.6, %. Estas zonas son aquellas que están cubiertas por más de un 80 % de tierras de cultivo. Incluyen áreas de agricultura mecanizada y granjas.
- Sabana, 7.5 %. Abarca zonas con herbáceas y zonas con árboles que van desde un 10 % hasta 40 % del total. Los árboles pueden exceder los 5 metros de altura; pueden ser caducifolios o perennes.
- Pastizales, 7.8 %. Son zonas con pastizales en su mayor parte y menos de un 10 % de árboles cubre la otra parte.
- Sabana Boscosa, 8.4 %. En estas tierras predominan las herbáceas y zonas de bosque que cubren desde un 40 % a un 60 %. Los árboles exceden los 5 metros de altura, pueden ser perenes o caducifolios.
- Bosques perenes de hojas anchas, 8.9 % Más del 60 % de la tierra es cubierta por bosque; los árboles exceden los 5 metros de altura.
- Tierras de cultivo y mosaico de áreas naturales, 9.7 %. tierras con un mosaico de zonas de cultivo, pastizales, bosques y arbustos. Ninguna de estas áreas excede un 60 % en estas zonas,
- Hielo y Nieve, 10.6 %. La tierra tiene permanentemente nieve o hielo. Estas tierras nunca tienen mas de un 10 % de su total cubierto por vegetación.
- Tierras estériles o de escasa vegetación. 12.3 %. Suelos expuestos, arena y rocas son típicos de estas áreas. Estas áreas nunca tienen más de un 10 % cubierto con vegetación en el lapso de un año. Incluye los desiertos más grandes del mundo como el Gobi, el Sahara.
- Arbustos, 15.7 %. Los arbustos dominan entre un 10 % y 40 % de las zonas; su altura nunca excede los 2 metros. Esto es típico en regiones semiáridas o muy frías.

Su interpretación, como ya se vió, se basa en el índice de verdor, conocido como "Leaf Area Index"; éstas son producidas al tomar la medida de la radiación reflejada en el infrarrojo cercano. El área verde oscura está cubierta en un 80 % por vegetación, el verde claro muestra las zonas donde se cubre de un 10 % a un 50 % y las zonas cafes u oscuras muestran la superficie donde definitivamente no hay vegetación. Este índice de vegetación (Leaf Area Index) sirve actualmente para entender la dinámica de las áreas verdes en la tierra y para simular en modelos computacionales como la biosfera terrestre afecta o influye los ciclos naturales del agua, el carbono y la energía que intercambia la Tierra con el exterior.

Las zonas que se consideraran en este trabajo son los bosques perenes (2.8 %), las areas de cultivo y mosaico (9.7 %), arbustos (15.7) %, los bosques de hoja ancha (8.9 %), bosques caducifolios con (1.2 %) y (1.5 %) y bosques mixtos (4.1 %). Se considera así, un 43.9 % del total del área superficial de la Tierra para hacer el cálculo.

Se tiene que:

Continente	Área Continente(Km ²)	Área total Verde(Km ²)
Norte y Centro América	24 096 580	
Sur América	17 800 000	
Africa	30 272 922	
Europa	10 180 000	
Oceanía	9 008 458	
Continente	Área Continente(Km ²)	Área total Verde(Km ²)
Asia	44 936 000	
Antártida	11 624 972	
Total	147 918 932	64 936 411.15

Cuadro 3.1: Área Verde Total de la Tierra

Radiación de cuerpo Negro

Se llama radiación térmica a la radiación emitida como consecuencia de su temperatura. Todos los cuerpos emiten y absorben radiación de su alrededor.

En términos generales, el espectro de radiación térmica emitida por un cuerpo caliente depende de la composición del mismo, sin embargo, experimentalmente se ha encontrado que hay una clase de objetos que emiten espectros térmicos de características universales, estos son los llamados cuerpos negros.⁷ La distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro se especifica por la cantidad $R_t(\nu)$, llamada radiancia espectral, definida tal que $R_T(\nu)d\nu$ es igual a la energía emitida en forma de radiación con frecuencias en el intervalo $\nu, \nu + d\nu$ de un área unitaria de la superficie a temperatura absoluta T y por unidad de tiempo.

La integral de la radiancia espectral sobre todas las frecuencias ν , es la energía total emitida de un cuerpo negro a temperatura T, por unidad de tiempo y por unidad de área. Se le llama la radiancia R_T , es decir:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu)d\nu \quad (3.1)$$

La radiancia aumenta rápidamente a medida que la temperatura aumenta. Este resultado se conoce como la ley de Stefan- Boltzman, y fue enunciada por primera vez en 1879 en forma de una ecuación empírica:

$$R_T = \sigma T^4 \quad (3.2)$$

con $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} K_4$ Donde σ es llamada constante de Stefan-Boltzman.

De manera que se puede escribir la ecuación anterior para un cuerpo no necesariamente negro en forma:

$$R_T = \epsilon(\lambda)\sigma T^4 \quad (3.3)$$

donde $\epsilon(\lambda)$ es la emisividad del medio. En el caso de un cuerpo negro $\epsilon = 1$; en el caso de cualquier cuerpo real (cuerpo gris- gray body), este valor es menor que 1. La radiancia tiene unidades de flujo de energía, es decir energía por unidad de tiempo por unidad de área.

Cuando un cuerpo negro está a una temperatura mayor a los 100 °C comienza a emitir en el espectro visible, pero para temperaturas ordinarias entre 0°C y 100 °C se mantiene en la región del infrarrojo.

Se puede describir el proceso de radiación térmica en términos de una densidad de energía $\rho_T(\nu)$, que se define como la energía contenida en una unidad de volumen de la cavidad a temperatura T, en el intervalo de frecuencia entre ν y $\nu + d\nu$. Es evidente que la densidad de energía y la radiancia deben ser proporcionales

$$I(\nu) = \frac{2\pi\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{\sigma T}} - 1}$$

donde $I(\nu)d\nu$ es la cantidad de energía por unidad de área, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido emitida en el rango de frecuencias entre ν y $\nu + d\nu$, h es la constante de planck, c es la velocidad de la luz y σ es la constante de Boltzmann.

Se llama Poder emisor de un cuerpo $E(\nu, T)$ a la cantidad de energía radiante emitida por la unidad de superficie y tiempo entre las frecuencias ν y $\nu + \delta\nu$.

⁷el término Blackbody fué introducido por físico alemán Gustav Kirchhoff en el año de 1859 en un trabajo presentado a la Academia de Ciencias de Berlín

$$E(\nu, T) = \pi I(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{\sigma T}} - 1} \quad (3.4)$$

La Tierra se puede considerar como un cuerpo negro, o al menos un área de ésta que equivaldría al área cubierta por vegetación. El área total de la Tierra es de aproximadamente 510 millones de km^2 , de los cuales 149 millones son de tierra firme y 361 millones de agua. Se llega a registrar una temperatura mínima de 182 K y máxima de 333 K.

Temperatura de la Tierra

La temperatura promedio de la Tierra se puede calcular con la teoría de cuerpo negro

- Se tiene que la energía recibida por el sol promediada sobre el día, año y superficie es de 342 W/m^2 . Con base en la ecuación 3.2 se tiene que, $\sigma = 5,7x10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$, con lo que $\sigma T^4 = 235.98 \frac{W}{m^2}$, y resolviendo para obtener T, se tiene que $T^4 = \frac{235.98}{5,7x10^{-8}} K^4$, con lo que $T^4 = 4,14^9$ y $T=253.65 \text{ K}$.
- Se considera que tanto el sol como la Tierra son cuerpos negros esféricos y que la Tierra permanece en equilibrio térmico; por tanto, otra forma de calcular esta temperatura es considerando la energía emitida por el sol $P_{Semt} = \sigma T_s^4 (4\pi R_s^2)$ donde T_s es la temperatura del sol y R_s el radio del sol. Como el sol emite en todas direcciones, la Tierra sólo puede absorber una fracción de esta energía, con lo que se tiene

$$P_{Eabs} = P_{Semt}(1 - \alpha) \left(\frac{\pi R_E^2}{4\pi D^2} \right) \quad (3.5)$$

donde R_E es el radio de la Tierra, D es la distancia en unidades astronómicas entre el sol y la Tierra y α es el albedo de la Tierra.

La Tierra solo emite como una esfera tal que $P_{Temt} = \sigma T_E^4 4\pi R_E^2$ donde P_{Tabs} es la radiación asorbida por la Tierra, P_{Semt} es la emitida por el sol, T_E es la temperatura de la Tierra. Si se considera a la Tierra como un cuerpo negro, se sabe que la energía emitida es igual a la energía absorbida, por tanto $P_{Temt} = P_{Tabs}$ y por tanto:

$$T_E = T_S \sqrt{\frac{\sqrt{1 - \alpha} R_S}{2D}} \quad (3.6)$$

se considera que $T_S = 5778K$, $R_S = 6,96x10^8m$, $D = 1,496x10^{11}m$ y $\alpha = 0,39$ y se obtiene que:

$$T_E = 0,0426xT_S = 246,28K \quad (3.7)$$

Hay que considerar que la Tierra en realidad guarda una temperatura mayor que la predicha por un cuerpo negro puesto que no guarda la relación de un cuerpo negro, es decir, tiene emisividad distinta de uno. Se pueden considerar varios aspectos para entender porque se espera una temperatura diferente.

- La emisividad de un cuerpo varía con la temperatura y la longitud de onda de la radiación incidente. Sin embargo, ϵ se considera igual a una constante, a esto se le conoce como la hipótesis del cuerpo gris. La desviación del cuerpo negro ideal está dado por esta constante, así que debe considerar factores geométricos y químicos.
- Dado que un cuerpo en equilibrio térmico emite lo que absorbe; si no es un cuerpo negro debe absorber en principio sólo una fracción de la radiación que llega a su superficie.
- La emisividad de la atmósfera depende de la concentración de gases, la nubosidad, etc. Existe el conocido *Greenhouse effect* o efecto invernadero, que es aquel que sufre la radiación incidente en la atmósfera. Se refiere al cambio en el estado de equilibrio térmico o estado estacionario por la presencia de partículas en la atmósfera de un planeta que absorben y emiten radiación infrarroja. Se puede visualizar suponiendo que llega cierta cantidad de radiación a la superficie terrestre, parte se refleja y parte se absorbe; de la parte reflejada se tiene que una porción es absorbida, otra dispersada por las partículas de la atmósfera y otra es reflejada hacia la superficie terrestre una vez más; esto hace que la superficie terrestre absorba más radiación infrarroja y por tanto guarde una mayor temperatura. La temperatura predicha por la teoría del cuerpo negro es inferior que la temperatura real de la Tierra y la diferencia es de 18° .

Debido a que hay una diferencia considerable entre la temperatura calculada con teoría de cuerpo negro (246 K y 253 K) y la real, se tomará la el valor de 286 K, magnitud promedio en los últimos años.

3.2.3. Beneficios del estado Vida sobre la Tierra

Se puede ver que la Tierra intercepta una fracción de la radiación solar, sin embargo se considera a la Tierra en estado estacionario y por tanto debe haber un balance energético entre lo que está entrando y lo que sale.

Al hablar de un estado estacionario, se sobreentiende que se debe balancear la producción de entropía interna con el flujo de entropía externa, para cumplir la condición de que $\frac{dS}{dt} = 0$ para estados estacionarios de la Tierra.

La manera en que se compensa o balancea es con una serie de fenómenos de absorción, dispersión, reflexión de la radiación, etc. en los que pueden verse o no, involucrados sistemas vivos; es decir, la producción de entropía debido a los fenómenos vivos es sólo una fracción de la producción de entropía total de la Tierra.

En la hipótesis de Gaia se considera que la vida tiene gran influencia en el ambiente externo, por tanto puede modificar el ambiente a varias escalas.

En un intento por cuantificar esta influencia, en el artículo del Dr. Axel Kleidon, *Testing the Effect of Life on Earth's Functioning: How Gaian is the Earth System?* se introduce un factor denominado GPP (global gross primary productivity) que mide el beneficio de las condiciones ambientales sobre la vida o biota global del planeta Tierra. Las condiciones óptimas corresponden a un valor máximo en GPP; este beneficio no está definido para alguna especie en particular, más bien para el estado vida en general, entonces tiene que ver sobre todo con factores de diversidad, extensión de los biomas, flujos de agua, de carbono, entropía, etc.

Se da una hipótesis cero basada en las diferentes formas que puede influir la vida sobre este mismo factor GPP.

- Antigaia.
Los efectos bióticos empeoran las condiciones ambientales y no ayudan a la proliferación de la vida. Por tanto el factor GPP cumple que $GPP_a > GPP_b$ donde GPP_a se refiere al factor de las áreas con ausencia de vida, o sea, abióticas y GPP_b se refiere a las áreas con vida.
- No Gaia.
Puede haber efectos de la biota sobre el ambiente, pero no son tales que hagan que incremente o decrezca el factor GPP; es decir $GPP_a = GPP_b$
- Gaia.
Los efectos de la biota incrementan los beneficios del ambiente sobre la vida, sin embargo, no la optimizan. Esto quiere decir $GPP_b > GPP_a$ y $GPP_b < GPP_o$ donde GPP_o es el factor máximo u óptimo para la biota.
- Optimizando Gaia. Los efectos de la vida sobre el ambiente son tales que optimizan su proliferación misma. Esto es equivalente a decir que $GPP_b > GPP_a$ y que $GPP_b = GPP_o$

Para ese estudio no se considera la vida marina, solo se considera la biota terrestre y los flujos de radiación y agua que existen a causa de ésta. El modelo que se ocupa es un "Mundo Desierto", que consiste en una simulación para remover los efectos actuales de la vegetación sobre la tierra. Se obtiene que un mundo desierto es más seco y hay menos ciclos en el área continental, con esto se disminuye el área que abarca la biota y se tiene una limitación de agua. Esto quiere decir que los efectos de la biota sobre el clima y los aspectos biogeofísicos del ambiente son tales que reducen el estrés hídrico y aumentan la extensión espacial que ocupa la vegetación.

Además, se simulan también los efectos de un "Mundo Verde" sobre el ambiente, y se obtiene una optimización de la proliferación de la vida sobre la superficie de ese mundo y un factor GPP máximo. En esta simulación se obtiene un incremento en GPP debido a la vida, sin embargo no se obtiene el valor máximo posible de GPP porque imponer condiciones de mundo verde en las áreas áridas y semiáridas del planeta reduce el período de crecimiento debido a que se aumenta la eficiencia de la evotranspiración (evaporación del agua del suelo y las plantas); es decir el factor GPP puede aumentar cambiando algunos valores de la simulación al combinar áreas verdes con áreas que tienen parámetros no tan extremos.

Se concluye que la vegetación aumenta o impulsa el reciclamiento del agua sobre la Tierra y que no tiene un efecto óptimo sobre el ambiente para la vida misma sobre la Tierra. Por tanto este estudio apoya la hipótesis Gaia.

3.2.4. La Producción de Entropía de la Tierra debida a la biota

- Existe una hipótesis (Kleidon 2004) sobre la producción de entropía máxima debido a la biota, en ciertas líneas de investigación se conoce como MEP (maximum entropy production). Kleidon justifica su hipótesis de máxima producción de entropía debido a la biota (biotic-MEP) considerando que la biota agrega grados de libertad al sistema Tierra; es decir, modifica las vías de los procesos naturales que tienen lugar en el planeta, por ejemplo, el flujo de radiación solar.

Se calcula como sigue:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dQ_{in}}{T_T} - \frac{Q_{out}}{T_S} \quad (3.8)$$

donde $\frac{dQ_{out}}{dt}$ es el flujo que sale y $\frac{dQ_{in}}{dt}$ es el flujo que entra; T_S es la temperatura del sol y T_T es la temperatura de la Tierra (255 K).

Donde hay que hacer notar que el flujo neto que entra tiene que ver con $Q_{in} = \frac{S}{4}(1 - \alpha)$ donde α se considera al albedo (0.39) y S es la constante solar que debido a la rotación terrestre se reduce al factor de un cuarto (342 W/m^2)

Se tiene que

$$P_{in} = 342(\text{W/m}^2)(1 - 0,39) = 208,46\text{W/m}^2 \quad (3.9)$$

Si se considera que la Tierra mantiene un estado estacionario (equilibrio), se tiene que

$$\frac{dQ_{in}}{dt} = \frac{dQ_{out}}{dt} \quad (3.10)$$

Por lo tanto se concluye que

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \left(\frac{208,46}{255} - \frac{208,46}{5778} \right) \left(\frac{J}{\text{m}^2 \text{Ks}} \right) \\ &= 0,81751 - 0,0360 \\ &= 0,78144 \frac{J}{\text{m}^2 \text{Ks}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

- Si se realiza el mismo cálculo pero considerando la temperatura real de la tierra, T=286 K se obtiene que:

$$\begin{aligned} S &= \left(\frac{208,46}{286} - \frac{208,46}{5778} \right) \left(\frac{J}{\text{m}^2 \text{Ks}} \right) \\ &= 0,81751 - 0,0360 \\ &= 0,78144 \left(\frac{J}{\text{m}^2 \text{Ks}} \right) \\ &= 7,8144 \times 10^{-5} \left(\frac{J}{\text{cm}^2 \text{Ks}} \right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

- Ichiro Aoki realiza este mismo cálculo, y también se plantea en el artículo de Tyler Volk 2006, pero en ambos, se hace la aproximación tal que:

$$S = \frac{Q_{out}}{T_T} \quad (3.13)$$

puesto que la temperatura de la Tierra es mucho menor que la del sol, y este término resulta despreciable. Siguiendo el mismo razonamiento se puede calcular la producción de entropía de los demás planetas.

Se considera lo siguiente:

$$\frac{dS_p}{dt} = \frac{dQ_{inp}}{T_p} - \frac{Q_{outp}}{T_S} \quad (3.14)$$

donde el subíndice p se refiere a algún planeta en particular.

Planeta	Radiación ($\frac{W}{m^2}$)	Albedo	Temperatura	$\frac{dS}{dt}, (\frac{J}{Ksm^2})$	$(\frac{J}{sKcm^2})$
Mercurio	10359	0.058	440	5.1222	5.12221×10^{-1}
Venus	2611.5	0.77	226	0.6384	6.3844×10^{-5}
Marte	603.5	0.2	120.7	0.5457	5.4577×10^{-5}
Júpiter	50.85	0.42	106	0.0682	6.8282×10^{-6}
Saturno	15.05	0.76	63	0.0141	1.4177×10^{-6}
Urano	3.715	0.93	33	0.0019	1.9588×10^{-7}
Neptuno	1.505	0.84	32	0.0018	1.8708×10^{-7}

Cuadro 3.2: Producción de Entropía de los Planetas

Se considera la temperatura promedio de cada planeta y la radiación incidente promedio. La temperatura del sol se toma como 5778K.

Este cálculo se puede comparar con el hecho por Aoki, 1983, donde obtuvo:

Planeta	Radiación ($\frac{J}{cm^2s}$)	Albedo	Temperatura	($\frac{J}{sKcm^2}$)
Mercurio	0.903	0.058	440	$5,95x10^{-2}$
Venus	0.259	0.77	226	$8,42x10^{-5}$
Tierra	0.135	0.30	254	$1,19x10^{-4}$
Marte	$0,583x10^{-1}$	0.20	213	$7,03x10^{-5}$
Júpiter	$0,500x10^{-2}$	0.42	106	$8,92x10^{-6}$
Saturno	$0,149x10^{-2}$	0.76	63	$1,87x10^{-6}$
Urano	$0,367x10^{-3}$	0.93	33	$2,61x10^{-7}$
Neptuno	$0,150x10^{-3}$	0.84	32	$2,48x10^{-7}$

Cuadro 3.3: Producción de Entropía de los Planetas calculado por Aoki

El orden de magnitud de los cálculos coincide en la mayoría de los casos.

3.3. El ecosistema como sistema termodinámico abierto

*It is interesting to contemplate an entangled bank, clothed with many plants of many kinds, with birds singing on the bushes, with various insects flitting about, and with worms crawling through the damp earth, and to reflect that these elaborately constructed forms, so different from each other, and dependent on each other in so complex a manner, have all been produced by laws acting around us ... There is grandeur in this view of life ... from so simple a beginning endless forms most beautiful and most wonderful have been, and are being, evolved.*⁸

El término ecosistema fué utilizado por primera vez por Roy Clapham in 1930. Pero fue Arthur Tansley, un ecologista, quien lo definió completamente en 1935. Definió a un ecosistema como un solo sistema formado por el ambiente y los individuos que lo habiten por complejos que éstos sean.⁹

En ecología, anterior a este concepto se tenía el de "superorganismo", que implicaba que al tener una comunidad de individuos se formaba un organismo en un nivel más alto de complejidad que cada uno de los individuos por separado; sin embargo, en este concepto no se consideraban los factores ambientales, y los factores dinámicos que surgen de las interacciones, por tanto, se tenía una barrera para la evolución de la ecología. Eugene Odum, un ecológo reconocido acuñó la definición de ecosistema como sigue: *Una unidad que incluye todos los organismos que habitan un área determinada en donde guardan ciertas interacciones con el ambiente, tal que el flujo de energía que deriva de éstas, delimita las estructuras tróficas, la biodiversidad biótica y los ciclos materiales, esto significa el intercambio de materiales entre las partes vivas y las no vivas. Tal sistema es un ecosistema.*¹⁰

3.3.1. Modelo de Lotka-Volterra

Actualmente se tiene un sistema en la teoría de sistemas de ecuaciones diferenciales para abordar las interacciones entre dos especies de un ecosistema. Es el denominado modelo de Lotka-volterra¹¹ o presa-depredador. El modelo predice que la probabilidad de que una comunidad construída al azar sea estable decrece con el tamaño del ecosistema. Así, un ecosistema tiende a desaparecer si hay muchas especies que interactuen en éste.

El modelo se desarrolló inicialmente para dos poblaciones, aunque los resultados pueden generalizarse en el marco de sistemas dinámicos. Se supone la existencia de dos poblaciones en un ecosistema. La población de depredadores se denota como Y y la de presas como X. Las hipótesis son las siguientes:

- Se supone que los depredadores sólo se alimentan de la población de presas y de nada más.

⁸El Origen de las Especies, Charles Darwin

⁹"The whole system, ... including not only the organism-complex, but also the whole complex of physical factors forming what we call the environment"

¹⁰Any unit that includes all of the organisms, the community", in a given area interacting with the physical environment so that a flow of energy leads to clearly defined trophic structure, biotic diversity, and material cycles, this means, exchange of materials between living and nonliving parts; within the system is an ecosystem."

¹¹El modelo se llama así debido a que los dos personajes llegaron a resultados similares. Nunca se pusieron de acuerdo respecto al origen del modelo

- En ausencia de depredadores la población de la presa crece proporcionalmente al número de individuos; es decir, $\frac{dX}{dt} = aX$ con $a > 0$. En este caso la población X como función del tiempo estaría dada por: $X(t) = X_0 e^{at}$
- Cuando está presente la población de depredadores, la población de presas disminuye proporcionalmente al número de encuentros entre presa y depredador. Se asume que en cualquier encuentro que se tenga el depredador se alimenta de un individuo. El término más apropiado para definir esta interacción es bXY
- En ausencia de presas la población de depredadores decae proporcionalmente a su población, esto es: $Y' = -cY$ por lo que se tiene que la población es $Y = Y_0 e^{-ct}$
- En presencia de presas la población de depredadores aumenta proporcionalmente al número de encuentros. El término asociado a este crecimiento está dado como: dXY

El sistema de ecuaciones que define este modelo es por tanto:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= ax - bxy = x(a - by) \\ \frac{dy}{dt} &= -cy + dxy = y(-c + dx)\end{aligned}\quad (3.15)$$

Puesto en términos matriciales

$$\left(\frac{dX}{dt}\right) = \left| \begin{pmatrix} a - by & -bx \\ dy & -c + dx \end{pmatrix} \right| (X) \quad (3.16)$$

Este modelo se puede linealizar alrededor de un punto de equilibrio, sin importar que no sea el origen, pues basta con una traslación de nuestro sistema para definir como el origen al punto de equilibrio. Tiene dos puntos de equilibrio $(0, 0)$, $(\frac{c}{d}, \frac{a}{b})$

$$(x') = \left| \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & -c \end{pmatrix} \right| (X^*) \quad (3.17)$$

donde X^* denota algún punto de equilibrio. La matriz que deriva de este sistema se denomina matriz de la comunidad.

Para el primer punto de equilibrio se tienen como eigenvalores a y $-c$. Y se obtiene un nodo.

Para el segundo punto de equilibrio se tienen como eigenvalores valores imaginarios $+ -i\sqrt{ac}$, por ende podemos concluir que este punto es de equilibrio estable. De hecho da como resultado un ciclo límite, esto quiere decir que se tiene una dinámica de coexistencia entre las dos especies.

3.3.2. Estudio Termodinámico del Ecosistema

Un ecosistema, como ya se vió, se puede considerar como un sistema abierto, pues tiene un flujo constante de materia y energía. Mantiene un estado estacionario, pues sus condiciones de frontera pueden considerarse constantes en el tiempo (En general para un ecosistema son condiciones periódicas pero constantes respecto al tiempo característico de los organismos).

Prigogine demostró que se podían aplicar principios de termodinámica irreversible a este tipo de sistemas. En términos de esta teoría termodinámica se supone a un ecosistema como un sistema termodinámico abierto (Michaelian 2005), en estado fuera de equilibrio, pero evidentemente, en estado estacionario. Se considera a cada organismo vivo como una fuente de producción de entropía con condiciones de frontera constantes, y por tanto, en estado estacionario. Se suponen condiciones de frontera constantes y se tienen los siguientes resultados para la entropía:

1. La producción de entropía debe ser definida positiva.

$$\frac{d_i S}{dt} > 0 \quad (3.18)$$

2. El cambio de la producción de entropía debido a cambios en las fuerzas generalizadas (poblaciones) debe ser definida negativa.

$$\begin{aligned}\frac{d_x P}{dt} &< 0 \\ P &= \frac{d_i S}{dt}\end{aligned}\quad (3.19)$$

Este resultado es importante dentro de este modelo, se conoce como el criterio general evolutivo. Dice que el cambio de la producción de entropía debido a cambios en las fuerzas generalizadas X (poblaciones), debe ser negativo definido para sistemas con condiciones de frontera constantes.

3. En un estado estacionario se tiene que:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} = 0 \quad (3.20)$$

Las ecuaciones (3.18, 3.19 y 3.20) son suficientes para determinar la dinámica poblacional de un ecosistema una vez conocidas las producciones y flujos de entropía dados por las ecuaciones (3.21 y 3.22)

El flujo de entropía a través del ecosistema puede ser escrito como:

$$\frac{d_e S}{dt} = \sum_{\gamma} p_{\gamma} \Gamma_{\gamma}^e \quad (3.21)$$

donde

$$\Gamma_{\gamma}^e = \frac{1}{T} \frac{de_{\gamma} + dq_{\gamma}}{dt} - \frac{1}{T} \sum_{\alpha\gamma} \mu_{\alpha\gamma} \frac{dn_{\alpha\gamma}}{dt} \quad (3.22)$$

Esta última ecuación es conocida como la ecuación de Gibbs, donde se toma n como el número total de especies del ecosistema, p_{γ} son las poblaciones de las especies γ y Γ_{γ}^e representan los flujos de entropía desde el ambiente exterior hacia cada una de las especies. Las otras variables son definidas de la misma forma que se trato en la sección de termodinámica en equilibrio.

Expandiendo la interacción entre individuos de las especies en un desarrollo de n cuerpos, tenemos que para la producción de entropía del ecosistema

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_{\gamma} p_{\gamma} [\Gamma_{\gamma}^i + \sum_{\gamma'} p_{\gamma'} \Gamma_{\gamma\gamma'} + \sum_{\gamma''} p'_{\gamma} p_{\gamma'} \Gamma_{\gamma'\gamma''\gamma} + O(4)] > 0 \quad (3.23)$$

Donde la inigualdad es por la segunda ley de la termodinámica. El coeficiente Γ_{γ} es la producción de entropía debida a procesos irreversibles promediados sobre todos los individuos de especie γ ; $\Gamma_{\gamma\gamma'}$ representa la producción de entropía debido a procesos irreversibles que ocurran entre dos cuerpos; etc. y $O(4)$ representa la producción debido a los procesos de interacción entre 4 cuerpos o más.

3.4. La planta como sistema termodinámico abierto

*Cualquier organismo, sea un animal, una planta o un microbio, vive únicamente, mientras pasen a través de él, en torrente continuo, nuevas y nuevas partículas de sustancia, con la energía a ella ligada. Procedentes del medio ambiente pasan al organismo diversos cuerpos químicos. Una vez dentro, son sometidos a profundas modificaciones y transformaciones, a consecuencia de las cuales se convierten en sustancia del propio organismo, se tornan iguales a los cuerpos químicos que con anterioridad integraban al ser vivo. La sustancia del organismo vivo nunca permanece inmóvil, sino que se desintegra y vuelve a formarse constantemente a consecuencia de las numerosas reacciones de desintegración y síntesis, que se producen en estrecho entrelazamiento*¹²

3.4.1. Begonia y Metabolismo

Existen tres tipos de metabolismo asociados a la fotosíntesis en las plantas, C_3 es el más común y las plantas con este tipo de metabolismo transpiran mucho, otro tipo es el C_4 donde las plantas evitan la fotorespiración (O_2 en lugar de CO_2) y por último, el CAM, donde los estomas abren solo de noche. Otros rasgos importantes son que las plantas CAM son las que se adaptan a condiciones de temperatura y sequedad extremas, como por ejemplo un desierto. Las plantas C_3 son la gran mayoría. El tipo que describen todos los textos de fisiología como modelo general. Son casi todas las plantas arbóreas. Y por último, las plantas C_4 son en su mayoría hierbas tropicales. Se llaman así porque en las de tipo C_3 el primer compuesto orgánico fabricado en la fotosíntesis tiene 3 átomos de carbono y en el tipo C_4 tiene 4.

Si se toma una especie en particular, por ejemplo la Begonia. Ésta tiene metabolismo tipo C_3 . Resiste cambios de temperatura de hasta $15^{\circ}C$, pero se conserva mejor en un rango entre los 20 y $25^{\circ}C$.

¹²El Origen de la Vida. A.Oparin,p.71

En el sistema planta hay un flujo continuo de materia y de energía, por tanto, se considera como un sistema termodinámico abierto que intercambia materia y energía con su ambiente, y por ende, un sistema fuera del equilibrio. Dado el modelo de la sección 3.3.2 si se considera sólo el primer término del cálculo de la producción de entropía, se está considerando al sistema como un solo individuo, que puede ser en particular una planta o un animal y lo procesos irreversibles que suceden en el individuo sirven para determinar este coeficiente.

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_{\gamma} p_{\gamma} \Gamma_{\gamma}^i \quad (3.24)$$

Donde Γ_{γ}^i es la producción de entropía debido a la planta, Γ^i representa cada uno de los procesos que contribuyen a la producción interna, por ejemplo, la transpiración, la fotosíntesis, etc. y Γ^e representa el flujo externo de entropía

Para entender el cálculo de estos coeficiente en la planta se necesitan determinar los flujos y delimitar al sistema. Se considera como único proceso irreversible que contribuye a la producción de entropía interna a la transpiración, y los otros procesos como la radiación, la conducción y convección del calor se consideran asociados al flujo de entropía externa. En un sistema que permanece en estado estacionario $\Gamma^i = -\Gamma^e$

Se verán entonces los flujos asociados al sistema de la planta más el ambiente.

Procesos asociados al flujo externo de entropía relacionados con la planta:

1. Flujo de masa.

Este es debido al gradiente de concentración de sustancias y tiene lugar en las raíces. Otra forma de intercambio de masa es el agua, ya sea de lluvia o de riego. Si este flujo se vuelve constante puede considerarse como una condición de frontera constante.

2. Flujo de energía debido a varios factores.

Si la temperatura de la hoja varía, la hoja pierde o almacena calor. La cantidad de calor almacenado depende de propiedades particulares de cada hoja, sin embargo, si se considera una hoja en equilibrio con su ambiente, es decir, a temperatura constante, se pueden simplificar los cálculos. En este caso, del orden del 1 % al 2 % de la luz que recibe, se convierte en energía química por la fotosíntesis. La energía producida en otros procesos metabólicos se puede ignorar puesto que es muy poca y se consideran por tanto solo tres procesos (bajo condiciones de frontera constantes) por medios de los cuales se influye la temperatura de la hoja:

1. Conducción - convección. Si la temperatura de la hoja es distinta de la del aire, el calor se intercambia por conducción, es decir, las moléculas de la capa límite de la hoja intercambian energía con las moléculas del aire alrededor de la hoja. Luego por convección, el aire recién calentado o enfriado se expande (contrae), y se hace menos denso, con lo que se eleva o desciende.

El calor se conduce por convección, de la hoja a la atmósfera, en respuesta a una diferencia de temperatura entre ambas. Si la radiación incidente hace que se eleve la temperatura de la hoja, el calor pasa de la hoja a la atmósfera.

Cuanto mayor sea el gradiente de temperatura, mayor será el flujo de calor. A una diferencia de temperatura determinada la tasa de transferencia de calor por convección (convectiva) es inversamente proporcional a la resistencia a la convección. La transferencia de calor por convección es más rápida cuando la capa límite es delgada y más lento cuando dicha capa es gruesa.

2. Radiación. Para considerar la radiación neta de una hoja se consideran tres factores: las longitudes de onda que se absorben, el espectro total de radiación que se recibe y la cantidad de energía radiada por la hoja. El espectro de radiación que recibe depende de sus condiciones ambientales, en su mayor parte, las plantas reciben luz solar. Donde la mayor parte de la radiación ultravioleta la absorbe la atmósfera y algunas zonas en el infrarrojo las moléculas de CO_2 y H_2O . Recibe la zona del espectro que comprende la luz visible y zonas del infrarrojo. El espectro de absorción de la hoja está conformado en su mayor parte por longitudes de onda azul y roja. Gran parte del verde se refleja. Absorben muy poco de la parte del espectro que corresponde al infrarrojo cercano, sin embargo, toda la parte que corresponde al infrarrojo lejano, o radiación térmica, sí es absorbida por la planta.¹³

Como ya se dijo, la transpiración es el proceso irreversible a considerar como origen de la producción de entropía interna; además, se sabe que bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura constantes la transpiración es el único medio de intercambio de energía, con un 98 % del total del intercambio energético.

¹³ya se había mencionado que el artículo "Earth Observation of Vegetation and Implication for Life detection on other planets" se habla del espectro de emisión de las plantas como un biomarcador en los planetas para el fenómeno de la vida, cuya radiación oscila alrededor del infrarrojo cercano

3.4.2. Transpiración

La transpiración está considerada como un mecanismo del proceso de transporte del xilema; se define como el agua interna que se pierde por el proceso de evaporación en una planta; generalmente, se pierde por estomas, cutícula o lenticelo. Por lo general la transpiración cuticular sólo es importante en plantas con cutícula muy delgada y aún en esos casos supone menos de un diez por ciento de la transpiración total, por tanto se puede suponer que la evaporación de la planta tiene lugar en los estomas (hojas).

Un ejemplo de densidad estomática viene dada por¹⁴

Planta	Envés	Haz
Alfalfa	138	170
Cóleo	141	0
Geranio	59	19
Tomate	130	12
Girasol	150	85
Naranja	450	0
Maíz	68	52
Trigo	14	33

Cuadro 3.4: Ejemplos de densidad estomática

Una superficie foliar que posea estomas, debido al efecto marginal, puede evaporar mucha más agua de la que cabría esperar. El efecto marginal consiste en que las moléculas de agua, en ausencia de viento, pueden difundirse en todas direcciones sin estorbarse mutuamente (Sutcliffe 1968). Este hecho hace que la transpiración pueda ser sólo una medida de los estomas, y sólo de los estomas en el envés.

La transpiración estomática es regulable a través de los movimientos de apertura y cierre de los estomas. Si las células oclusivas¹⁵ están turgentes¹⁶, los estomas se abren; en cambio, si pierden turgencia los estomas se cierran.

Utilidad de la transpiración

- Desde un punto de vista biológico, no se sabe a ciencia cierta, cual es el cometido de la transpiración. Se mencionan posibles causas: transporte de minerales, intercambio de energía, proceso de enfriamiento de la hoja, etc. Algunas teorías biológicas suponen que es un proceso meramente refrigerante, pues después de existir el cambio de fase de las moléculas de agua en la hoja, la temperatura de la hoja disminuye, es decir, en el equilibrio de las moléculas restantes se tiene una menor temperatura.
- Otra teoría de la transpiración de las plantas fue formulada en 1994 (Prazak et al, 1994): las plantas se protegen así mismas de un sobrecalentamiento interno por arriba de la temperatura óptima para la fotosíntesis por medio de la transpiración.
- Se mencionó que la transpiración ayuda en el transporte. Se ha demostrado que en la planta ocurren procesos de transporte de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo, y que los que ocurren de abajo hacia arriba tienen lugar en el xilema¹⁷ (Stout y Hoagland 1939)

Para que exista este fenómeno de transporte debe existir un gradiente de concentración que genere una fuerza, denominada en la literatura de fisiología vegetal como presión radicular. La presión radicular ha sido medida utilizando un manómetro; se ha obtenido que por lo general es menor a una atmósfera pero suficiente para que la columna del xilema suba 10 m. Sin embargo se ha visto que la mayor causa de que ocurra el fenómeno de transporte no es debido a una presión desde abajo (la presión radicular), si no a una presión desde arriba o remolino como lo llaman en la literatura. Este remolino es la transpiración. Así, la utilidad de la transpiración

¹⁴El haz es la parte superior de la hoja. Suele tener un color verde brillante y el envés es la parte opuesta al haz, la interior. Su color es normalmente más oscuro y presenta muchas veces pelillos.

¹⁵Las células oclusivas son células de la epidermis con forma de media luna que forman el estoma y regulan el tamaño de su apertura, llamada ostíolo. En conjunto, las células oclusivas conforman el aparato estomático

¹⁶Abultadas, hinchadas.

¹⁷El xilema es un tejido leñoso capaz de conducir líquidos en las plantas; junto con el otro tejido vascular, el floema, forma una red continua que se extiende a lo largo de todo el organismo de la planta. El xilema se encarga de trasladar la savia desde la raíz hacia la parte proximal de la planta. Se transporta sobre todo agua con sales minerales y pueden también transportarse azúcares y algunos aminoácidos.

también está ligada a la necesidad de un gradiente de presiones en la planta para el transporte de los nutrientes de abajo hacia arriba. De esta manera las células del parénquima de la hoja que han perdido agua debido a los estomas cubren su déficit de agua gracias a las ramificaciones del xilema.

Análisis de la Transpiración

■ Elementos biológicos

Los estomas ¹⁸, son pequeños órganos de las hojas, en donde se lleva a cabo la transpiración. Pese a que la superficie de los estomas abiertos es sólo un 1 % del área de la hoja, en general, la hoja transpira la mitad del agua que podría evaporarse de un área equivalente de papel filtro húmedo. Los estomas se abren debido a que las células oclusivas absorben agua y se hinchan. La capacidad de los estomas de abrirse o cerrarse, se basa en las deformaciones que pueden experimentar las células oclusivas de acuerdo con su contenido hídrico. Cada estoma tiene dos células estomáticas oclusivas. Los movimientos estomáticos están provocados por los cambios de turgencia de estas células. Cuando las células oclusivas están turgentes, se arquean, y el orificio se abre. Cuando pierden agua, se vuelven flácidas y el poro se cierra.

El agua se evapora en el interior de la hoja, desde las paredes celulares hacia los espacios intercelulares, los cuales se continúan en el espacio exterior cuando se abren los estomas. Se dice por esto que la transpiración es un proceso de difusión.

Las células oclusivas presentan la peculiaridad de que las microfibrillas de celulosa de la pared están dispuestas radialmente, en forma divergente a partir de la zona que bordea al ostiolo ¹⁹. Además en esta zona la pared suele estar bastante más engrosada que en el resto, y por tanto es más rígida y difícilmente deformable. En situaciones de alto contenido hídrico, la presión de turgencia del protoplasto tiene efectos diferentes sobre unas y otras áreas de la pared: las exteriores se curvan en mayor medida que las interiores (aquellas que bordean al ostiolo); por lo que estas paredes interiores se separan y el ostiolo aumenta su diámetro. En situaciones de bajo contenido hídrico, la flacidez de las células oclusivas las lleva a su forma original y el estoma se cierra.

La causa de los cambios en el contenido hídrico de las células oclusivas puede entenderse por varios factores; para que se produzca la entrada o salida de agua en las células oclusivas debe generarse una diferencia de potencial hídrico.

- La turgencia, se mantiene o se pierde mediante la salida o entrada de agua y los movimientos estomáticos resultan de los cambios en la presión de turgencia de las células oclusivas. La acumulación de solutos provoca un movimiento de agua hacia el interior de las células oclusivas. Alternativamente, la disminución de la concentración de solutos en las células oclusivas produce el movimiento del agua hacia el exterior.
- Con las técnicas que permiten medir la concentración de iones en las células oclusivas, se sabe que el soluto que más influye en el movimiento osmótico del agua, es el ión potasio (K^+). Con el aumento de concentración de K^+ , el estoma se abre, y con un descenso, el estoma se cierra.

Los estomas en general, se abren al amanecer y se cierran en la oscuridad.

Durante la noche se permite la entrada de CO_2 que se utiliza durante el día. La apertura suele requerir de una hora y el cierre ocurre de manera gradual durante todo el atardecer. Hay algunas plantas de metabolismo CAM, en general desérticas, que muestran apertura estomática durante la noche, esto es porque pierden una cantidad menor de agua, ya que en la noche la temperatura ambiental es mucho menor y la humedad relativa siempre es mayor. Los estomas tipo C_3 muestran ritmos diarios de apertura y cierre, es decir, muestran ritmos circadianos, pero también responden a factores ambientales, es decir, el ciclo de cierre y apertura estomática puede verse afectado por: concentración de CO_2 , iluminación y temperatura.

■ Elementos físicos.

Desde un punto de vista físico la transpiración es un cambio de fase debido a la existencia de un gradiente de presión de vapor entre la concentración de agua en la hoja y la concentración de agua en el aire. La fuerza asociada al flujo de la transpiración es el gradiente de presión de vapor del agua, del interior de la hoja a la atmósfera que se encuentra más allá de la capa límite (interfaz de la hoja con el ambiente).

La transpiración como un proceso físico se ve afectado por varios factores o variables que se enumeran a continuación.

¹⁸Cabe mencionar que la palabra estoma significa boca en griego

¹⁹Se llaman así las aberturas de los diversos órganos en las estructuras vivas, en este caso se refiere a las aberturas de los estomas

1. Presión de vapor.

La molécula de agua aparece siempre en los sistemas vivos. Las células con metabolismo activo, es decir, sin considerar aquellas como las semillas o las esporas, por lo general tienen entre un 60% y 90% de agua; esto es porque es la sustancia principal en la que están disueltas o distribuidas las moléculas que aparecen en los sistemas vivos.

Además de que su capacidad calorífica la hace un excelente acumulador térmico.

El calor específico se define como la cantidad de energía calorífica que necesita un kilogramo de agua para elevar su temperatura un grado.

$$C_p = 10^3 \frac{\text{Cal}}{\text{KgK}} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{KgK}}$$

El calor específico del agua es aproximadamente el doble que el de otros líquidos que aparecen en los sistemas vivos, esto quiere decir, que es un buen acumulador térmico, pues su temperatura varía muy poco pese a que reciba un gran aporte de calor.

2. Humedad Relativa y Humedad Absoluta.

La humedad absoluta se define como la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y se expresa en $\frac{g}{m^3}$. La humedad relativa es el cociente entre la humedad absoluta y la humedad máxima o saturación. La presión de vapor se duplica aproximadamente cuando la temperatura aumenta 11° C. La presión de vapor aumenta al aumentar la temperatura.

3. Agua.

Una falta de agua conduce a una pérdida de turgencia por parte de las células oclusivas, y con ello al cierre de los estomas. Por tanto, para analizar experimentalmente y sin perturbaciones a la transpiración, se debe tener un constante y abundante suministro de agua para la planta (indispensable para garantizar condiciones de frontera constantes).

4. Luz.

Los estomas se activan por iluminación. La luz estimula la apertura de los estomas, interviene en los mecanismos activos de membrana que expulsan protones (H+) hacia fuera de la célula oclusiva, permitiendo la entrada de los iones K+ y Cl-. Además, la luz activa la fotosíntesis en las células del mesófilo; de esta forma se consume CO₂ y la concentración de este gas en los espacios intercelulares y en las células oclusivas se mantiene baja.

5. Temperatura.

La transpiración es sensible a los cambios de temperatura en el ambiente exterior de la planta. Un gradiente de temperatura entre la hoja y el ambiente, acentúa el gradiente de presión de vapor, ya que la presión de vapor máxima depende de T (esto es porque el aire caliente retiene más agua que el aire frío). Por arriba de los 25 ° los estomas tienden a cerrarse.

Otra forma en como afecta la temperatura es considerando que la capa límite es más delgada y opone la menor resistencia a la transferencia de calor por convección para el caso de hojas pequeñas y velocidades de viento elevadas. Por ende, la transferencia convectiva del calor es más eficiente en tales condiciones, por lo que las hojas pequeñas tienen temperaturas más cercanas a la temperatura del aire que las hojas mayores, en especial si hay viento, pero en caso de lo contrario la diferencia de temperatura de las hojas con el exterior es la misma en todas las hojas. Por tanto en condiciones de temperatura ambiental constante y ausencia de viento, la diferencia de temperatura entre las hojas y el aire se puede considerar la misma para todos los tamaños de hojas, y la transferencia convectiva es nula.

6. Concentración de CO₂.

Las bajas presiones parciales conducen a la apertura de los estomas y las altas al cierre de éstos.

7. Regulación hormonal del sistema vivo.

Esto se refiere a la concentración de ácido abscísico. Este ácido se concentra sobre todo en las plantas marchitas y puede aumentar en ellas más allá de un 40% de su concentración normal. Este ácido provoca el cierre de los estomas para impedir una mayor pérdida de agua. La forma experimental de impedir esta concentración, es con una luminosidad moderada y con agua abundante.

8. Velocidad del Viento.

La tasa de transpiración se ve afectada por la velocidad del viento, puesto que, como ya se dijo, se tiene que considerar el proceso de difusión de las moléculas cercanas a la capa límite. Sin embargo, en condiciones controladas de ambiente, este factor no se considera para el análisis del proceso.

3.4.3. Cuantificación de la Transpiración

Existen diferentes métodos para medir la transpiración de una planta. Los más comunes son los relacionados con cambios gravimétricos, cambios de un color indicador, por ejemplo, cloruro de cobalto, medición del vapor de agua, variaciones de volumen en la planta y de conductancia estomática. A últimos años han surgido lo que se conoce como los métodos térmicos.

- **Métodos Gravimétricos**

Son los que se basan en la variación de peso en una planta, ya sea en alguna de sus partes o en toda ésta. A veces suele hacerse sólo sobre un brote o sobre una hoja. Cuando se hace en la planta completa, se determina la masa ganada o perdida en un intervalo de tiempo. Se considera el conjunto planta-maceta con tierra como todo el sistema al que se le mide la variación de masa. Para evitar la pérdida de agua a través de la tierra se cubre con un material impermeable y en caso de tener un contenedor poroso (barro por ejemplo), también debe impermeabilizarse. Los resultados de este método se expresan en gramos o mililitros de agua por superficie foliar y unidad de tiempo. Cuando se hace sólo en una hoja, ésta se corta y se determina rápidamente su masa en una balanza de torsión durante un intervalo de tiempo que no pase de 1 ó 2 minutos. Debido a esta medición se puede establecer una curva de peso en función del tiempo. La extrapolación al tiempo cero sería la tasa de transpiración del órgano, ya que la pendiente inicial se considera representativa de la transpiración al momento de corte. Cabe hacer notar que si la planta se encontraba bajo estrés hídrico, entonces el valor encontrado sería superior al real para esa planta, esto es porque el cesamiento súbito de las columnas de agua supondría una menor resistencia y por lo tanto tasas de transpiración mayores

- **Método de color indicador**

Este método se basa en el cambio de color que ocurre en unos discos de papel impregnados con una solución acética de cloruro de cobalto al 3% ó 5% que se desecan. Si el papel seco es de color azul, expuesta al aire húmedo va gradualmente virando hacia el rosa. Dado esto al poner el papel completamente en azul en contacto con la hoja, éste cambia a rosa y la velocidad del cambio puede ser una estimación de la velocidad de la transpiración. Para evitar una medida indirecta de la humedad del ambiente, se requiere presionar con unas pinzas delgadas y de material transparente sobre el papel de tal manera que el sistema quede aislado del ambiente. Este método es más inexacto que otros, pero es una estimación aceptable.

- **Medida de la pérdida de vapor**

Se trata de colocar a la planta en una cámara donde entra una columna de aire a velocidad y humedad conocidas. El aire saldrá por otro tubo y se determina la humedad a la salida. La transpiración se determina a partir de las diferencias de humedad en la masa del aire. Este método es el más utilizado en laboratorios, puesto que se puede dar condiciones ambientales al tubo, tales que simulen de cerca las del hábitat de la planta.

Se tienen registros bibliográficos de la magnitud de la transpiración en algunos casos sencillos:

- Una planta de maíz transpira 200 kg de agua en su vida ($300 \frac{Kg}{m^2}$ en una plantación promedio). Se sabe que el desarrollo de una planta de maíz es del orden de dos a siete meses, ó entre 80 y 200 días. Si se considera el dato de 200 días se tiene que la tasa de transpiración quedaría como

$$\frac{1kg}{1da} = \frac{,011g}{s} = \frac{,00064mol}{s}$$

.El área cubierta por una planta de maíz se puede aproximar por un metro cuadrado o quizá menos. Si se considera $1m^2$, se tiene que la tasa de transpiración es de $\frac{,011g}{sm^2}$; en cambio si se toma una fracción de esa área, por ejemplo .75% se tiene que la tasa asociada es de

$$\frac{0,0146g}{sm^2} = \frac{,000814mol}{sm^2}$$

- En un bosque se tiene una tasa de $500kg/m^2$ año, esto es

$$0,0158 \frac{g}{sm^2} = \frac{,000893mol}{sm^2}$$

Cabe recordar que 1 mol de $H_2O = 18g$.

Se dice que la diferencia de la transpiración entre especies, conocida como la variabilidad entre plantas se deduce del cociente: agua transpirada/biomasa producida = 100 a 1000.

3.4.4. Producción de Entropía de la Transpiración

Siguiendo la sección anterior, se considera a la planta como un sistema abierto fuera del equilibrio y con condiciones de frontera constantes. Se hace notar que las condiciones de frontera para una planta están dadas por el ciclo lumínico-nocturno, esto es, su régimen estacionario depende de condiciones de frontera periódicas. Entonces se define la entropía de la planta como:

$$\frac{dS}{dt} = 0 = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt} \quad (3.25)$$

La producción de entropía total será constante; por lo tanto, el flujo de la producción de entropía resulta cero. dS_e es el flujo de entropía externo (ambiente) y dS_i la producción de entropía interna.

En el proceso de la transpiración se identifican los flujos y las fuerzas del proceso. La fuerza es el gradiente de presión de vapor y el flujo es el paso en el tiempo de las moléculas de agua de la evaporación, es decir, es un flujo de masa. En este caso la afinidad es tal que viola los criterios de estabilidad del sistema y el sistema se separa abruptamente dando lugar al cambio de fase como flujo.

Para calcular la producción de entropía interna debida al proceso de transpiración se tienen que considerar varios aspectos.

- La temperatura del agua de la hoja T_l no es necesariamente la temperatura que va a tener el agua del aire. Esta diferencia se da por la variación de condiciones ambientales, en general es del orden de 2 a 6 grados. Las unidades utilizadas para temperatura son grados Kelvin (K).
- La temperatura del vapor del aire T_v puede cambiar mucho en condiciones ambientales no controladas, si se supone la temperatura constante el cálculo se simplifica y no se tienen que integrar sobre un rango de temperaturas ni hacer un promedio temporal.
- Potencial químico del agua en fases de líquido μ_l y vapor μ_v . El gradiente de potencial químico (entre la temperatura para representación entrópica del sistema) es la afinidad o fuerza para los flujos de masa o las reacciones químicas, así como un gradiente de temperatura lo es para un flujo de energía calorífica. Se puede entender como una tendencia al cambio de un compuesto o su tendencia a reaccionar químicamente. La unidad de medición del potencial químico es el Gibbs²⁰. El potencial químico, como cualquier magnitud física, requiere un estado de referencia respecto al cual medirse, sin embargo hay tantos ceros para el potencial como elementos químicos; esto significa que el potencial químico, para cada elemento puede en principio, escogerse arbitrariamente. Los valores de los potenciales químicos de las sustancias se relacionan con los potenciales químicos de los elementos que las componen y se determinan para muchas sustancias experimentalmente en condiciones estándares o normales. Para el agua está calculado en éstas condiciones, esto es, $10^5 Pa$ y $298 K$. Sin embargo el potencial químico puede expresarse como una función de la temperatura.
- La tasa de transpiración de la planta corresponde al flujo del proceso; es decir, dada la afinidad como $F(\mu_{l,v}(T, P), T)$ se obtiene un flujo de materia $\frac{dn}{dt}$ como número de moles por unidad de segundo, o puede calcularse también por unidad de área ($\frac{mol}{segcm^2}$).

Con estos datos se calcula el flujo de producción de entropía del proceso como:

$$\begin{aligned} \frac{d_i S}{dt} &= JX \\ &= \frac{dn}{dt}(T) \left(\frac{\mu_l(T_l P_l)}{T_l} - \frac{\mu_v(T_v P_v)}{T_v} \right) \end{aligned} \quad (3.26)$$

donde $\left[\frac{d_i S}{dt} \right] = [J/sK]$

Producción de Entropía de la Planta

La planta se considera un estado estacionario, por lo tanto, $dS = 0$; con lo que se tiene que $dS = dS_i + dS_e = 0$, por lo tanto $dS_i = -dS_e$. Se sabe que la producción de entropía interna está ligada a la transpiración, por tanto el flujo de entropía externa está ligada al intercambio energético como calor y radiación en este caso y demás intercambios de masa menores, por lo tanto el coeficiente de producción de entropía externo para la planta queda dado como:

$$\Gamma_\gamma^e = \frac{1}{T} \frac{de_\gamma + dq_\gamma}{dt} - \frac{1}{T} \sum_\alpha \mu_\alpha \gamma \frac{dn_{\alpha\gamma}}{dt} \quad (3.27)$$

²⁰Abreviado G, en memoria de Josiah Willard Gibbs (1839- 1903), científico que introdujo dicha magnitud en la Física.

Donde el primer término del lado derecho tiene que ver con el flujo de entropía externo debido a intercambio energéticos, como puede ser por convección, radiación, etc. y el segundo término del lado derecho tiene que ver con el flujo de masa asociado a procesos como absorción de nutrientes o intercambio de minerales. $dS_e = \sum_{\gamma=1}^n P_{\gamma}(T)\Gamma_{\gamma}^e$

Parte III

Desarrollo Experimental

Capítulo 4

Condiciones de Frontera y Aparatos de Medición

Los experimentos fueron llevados a cabo en la Unidad de Ambientes Controlados del Área del Conocimiento de Biología, Facultad de Ciencias, UNAM. Se dispuso de cuatro individuos de la misma especie (*Begonia Semperflorens*) con condiciones de frontera constantes e idénticas entre ellos.

4.1. Humedad Relativa

Se midió cada hora durante todo el tiempo que duró el experimento y se mantuvieron valores constantes. Se tiene un período noche-día, por tanto se obtuvieron valores periódicos. Se utilizó un registrador Recolector de Datos HOBO U12 para Humedad Relativa con incertidumbre de .0005 % Modelo: U12-011. Mca. Onset Computer Corporation. Programa: Greenline)



Figura 4.1: Sensor de Humedad Relativa y Temperatura

4.2. Intensidad de luz

Se utilizó un medidor de la intensidad luminosa sobre el follaje de cada planta para garantizar que tuvieran intensidad constante. El medidor utilizado fue el Sensor de Quantum. LI-COR Radiation Sensors. Modelo: LI-250 Light Meter. La iluminación fue a base de focos Osram de luz blanca, 39 watts.

4.3. Flujo de agua

Con base en el metabolismo particular de esa especie se mantuvo un flujo constante de agua de $100\text{ml} \pm 10\text{ml}$ cada 24 horas, (con retardo o adelanto de una hora) en cada sistema. Con este flujo de agua se aseguró que la planta no sufriría estrés hídrico y por tanto no se perturbaría al fenómeno de apertura de estomas.

4.4. Temperatura

Se llevó a cabo con las siguientes condiciones de frontera de iluminación y temperatura. Se pusieron los cuatro individuos por parejas en las cámaras de ambientes controlados.

Cabe hacer notar que entre más lámparas haya en la cámara más se eleva la temperatura, pero si se colocan menos lámparas se reduce la intensidad luminosa y eso no conviene a la gran mayoría de las plantas, así que la regulación de la temperatura es por medio de un termostato digital que se programa para que tenga un rango de temperatura (por ejemplo, en la cámara 4 $25 \pm 2^\circ\text{C}$) y cuando la temperatura se eleva más de ese valor, entra en funcionamiento un ventilador que enfría el aire, el cual se apaga en cuanto regresa a la temperatura programada.

La disposición fue la siguiente:

Planta	Cámara Etapa 1	Cámara Etapa 2
1	3	4
2	4	3
3	3	4
4	4	3

Cuadro 4.1: Disposición de las plantas en cada etapa

La cámara 4 se mantuvo a una temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ó lo que es lo mismo, $298\text{ K} \pm 2\text{K}$. Mientras que la cámara 3 se mantuvo a $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ó $303\text{ K} \pm 2\text{K}$



Figura 4.2: Arreglo de las plantas dentro de las cámaras

Con esto, se tiene que la temperatura del aire o ambiente fue la registrada en las cámaras (298 K y 304 K, dependiendo de la etapa del experimento). Se utilizó un Registrador Recolector de Datos HOBO U12 para la Temperatura Modelo: U12-011 con incertidumbre de $\pm 2^\circ\text{C}$.

La temperatura de la hoja no fué la misma que la del aire, puesto que para que el proceso se lleve a cabo debe haber un gradiente de temperatura entre la fase líquida y gaseosa del agua. La temperatura de la hoja fué medida con un termómetro superficial marca sunny LCD Thermometer con incertidumbre de $\pm 0,5^\circ\text{C}$

4.5. Otros factores

Factores como la concentración de CO_2 y la regulación hormonal del sistema vivo no tuvieron que ser tomados en cuenta, puesto que al mantenerse constantes las otras variables el sistema no entraría en estrés. La concentración de CO_2 afecta, como ya se mencionó, la apertura de estomas, sin embargo en las cámaras se mantuvo una misma cantidad de cultivos y este factor se mantuvo constante.

Capítulo 5

Procedimiento Experimental

Se colocaron los individuos a la misma distancia de los focos, en la misma disposición en cada cámara. Se cubrieron todas las plantas, incluyendo las macetas, la tierra y el tronco de la planta, de tal manera que se pudiera asegurar que la evaporación registrada era de las hojas (estomas) y no de la tierra de la maceta.



Figura 5.1: Arreglo para evitar la pérdida de agua por evaporación del agua de la tierra y la maceta

5.1. Medida de la Evaporación

Se midió la transpiración de cada individuo durante las dos etapas por método lisimétrico; es decir, se utilizó una balanza granataria (siempre la misma) con incertidumbre sistemática de $\pm 0,5g$.

Se registraron inicialmente las masas de cada individuo y se comenzó a suministrar un flujo constante de masa (agua). Se registraron las variaciones diarias de masa de la planta; con ello se obtuvo el total de transpiración diaria de cada planta.



Figura 5.2: Método para obtener la variación de masa de cada planta

5.2. Medida de la Temperatura

Se registraron las temperaturas superficiales de las hojas de cada planta (se tenían los termómetros superficiales en algunas hojas de cada planta, no en todas) cada 24 horas.

La temperatura de cada cámara fue monitoreada por el sensor cada hora durante los dos meses (octubre-noviembre 2008) que duraron los experimentos.

5.3. Medida del área

Se consideraron diferentes métodos para calcular las áreas verdes de las plantas. Al final, el método más práctico fue el de considerar una aproximación de las áreas de las hojas con cubiertas circulares, triangulares o cuadradas.

5.4. Humedad Relativa

La humedad relativa y la temperatura se monitorearon simultáneamente dentro de cada cámara con un intervalo entre mediciones de una hora.

Parte IV

Resultados

Capítulo 6

Registros en las cámaras

6.1. Luminosidad

La intensidad luminosa está medida en $\frac{\mu\text{mol}}{\text{sm}^2}$.

Los focos no eran los reguladores de la temperatura, por tanto se mantuvo el mismo número de estos aun en cámaras distintas.

Los focos que se utilizaron fueron de la marca Osram de lo que se conoce como luz blanca de 39 watts. Las unidades del registro son micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$); están basados en el número de fotones de una cierta longitud de onda incidente por unidad de área y por unidad de tiempo. Se usa comúnmente para medir en el rango PAR (400-700 nm)¹.

	Cámara 3 (303 ± 3 K)	Cámara 4(298 ± 2 K)
Repisa	32.78	33.14
Follaje	51.95	40.96

Cuadro 6.1: Intensidad luminosa registrada en el follaje de las plantas

6.2. Temperatura y Humedad Relativa

Se tienen las siguientes distribuciones de temperatura y humedad relativa para cada una de las cámaras.² Para la primera etapa, efectuada durante el mes de octubre se tiene que:

¹PAR, por sus siglas en inglés es la Radiación Fotosintéticamente Activa que les llega a las plantas

²Para las gráficas de temperatura y humedad relativa por separado, veáse Apéndice C.

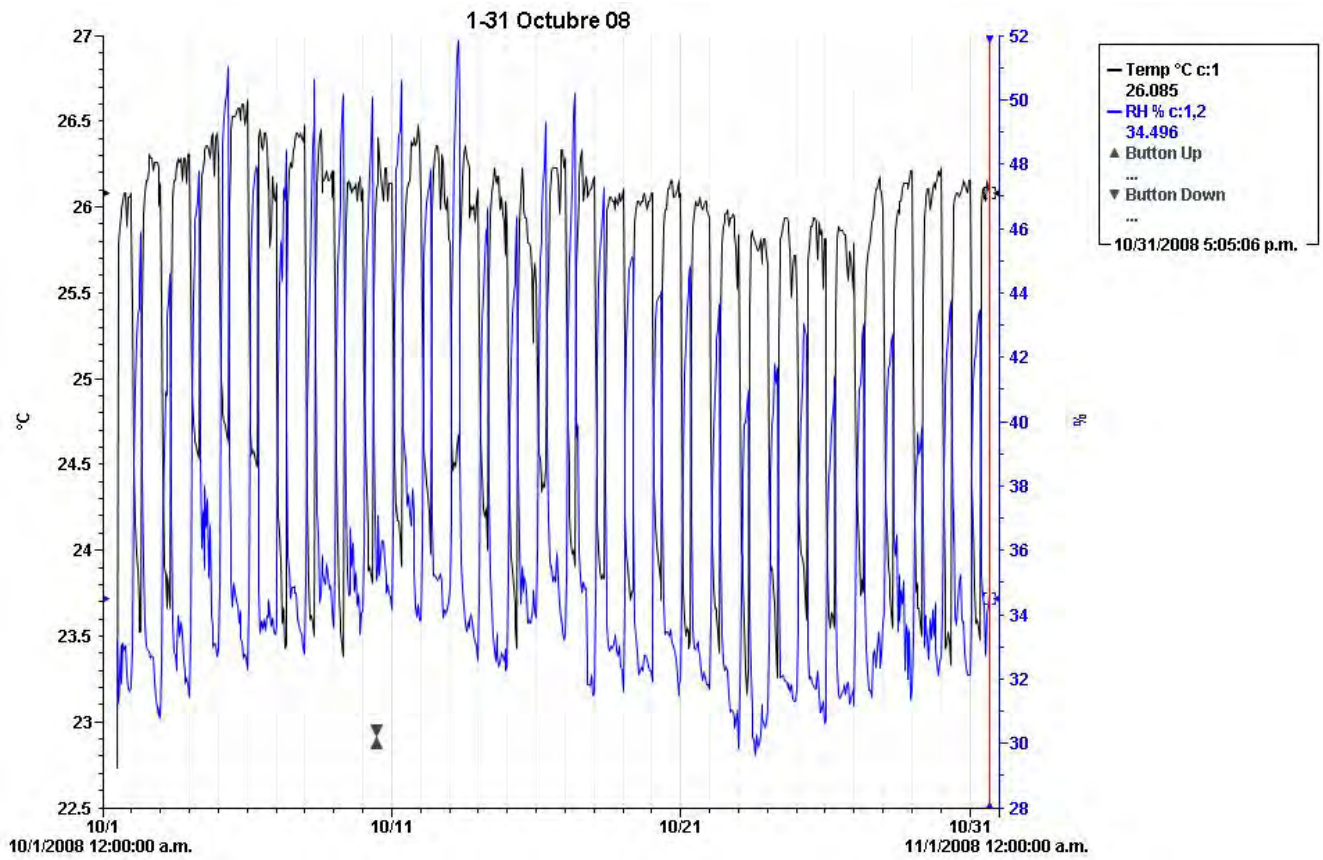


Figura 6.1: Humedad Relativa y Temperatura Cámara 4 Octubre 2008

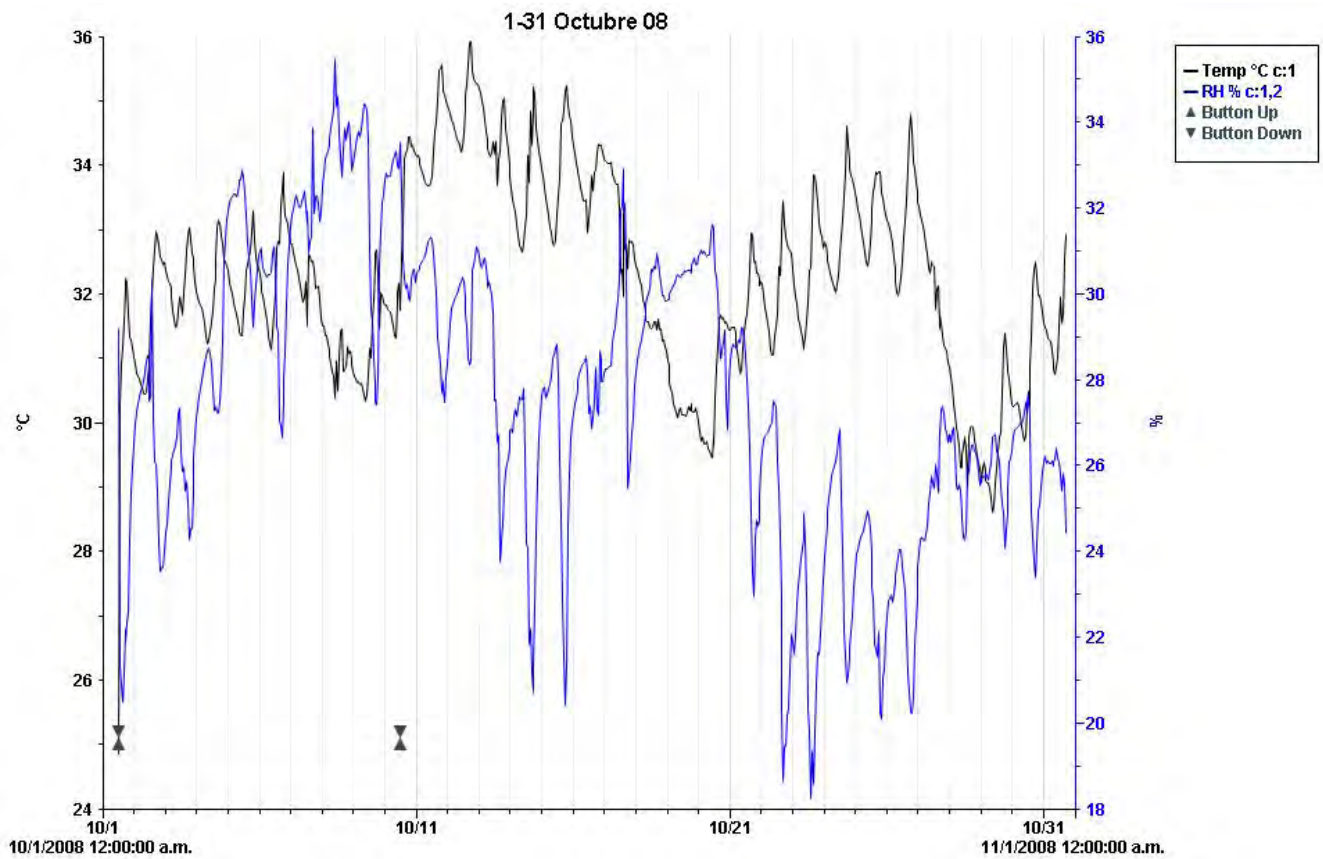


Figura 6.2: Humedad Relativa y Temperatura Cámara 3 Octubre 2008

Para la segunda etapa del experimento los registros son de noviembre del 2008

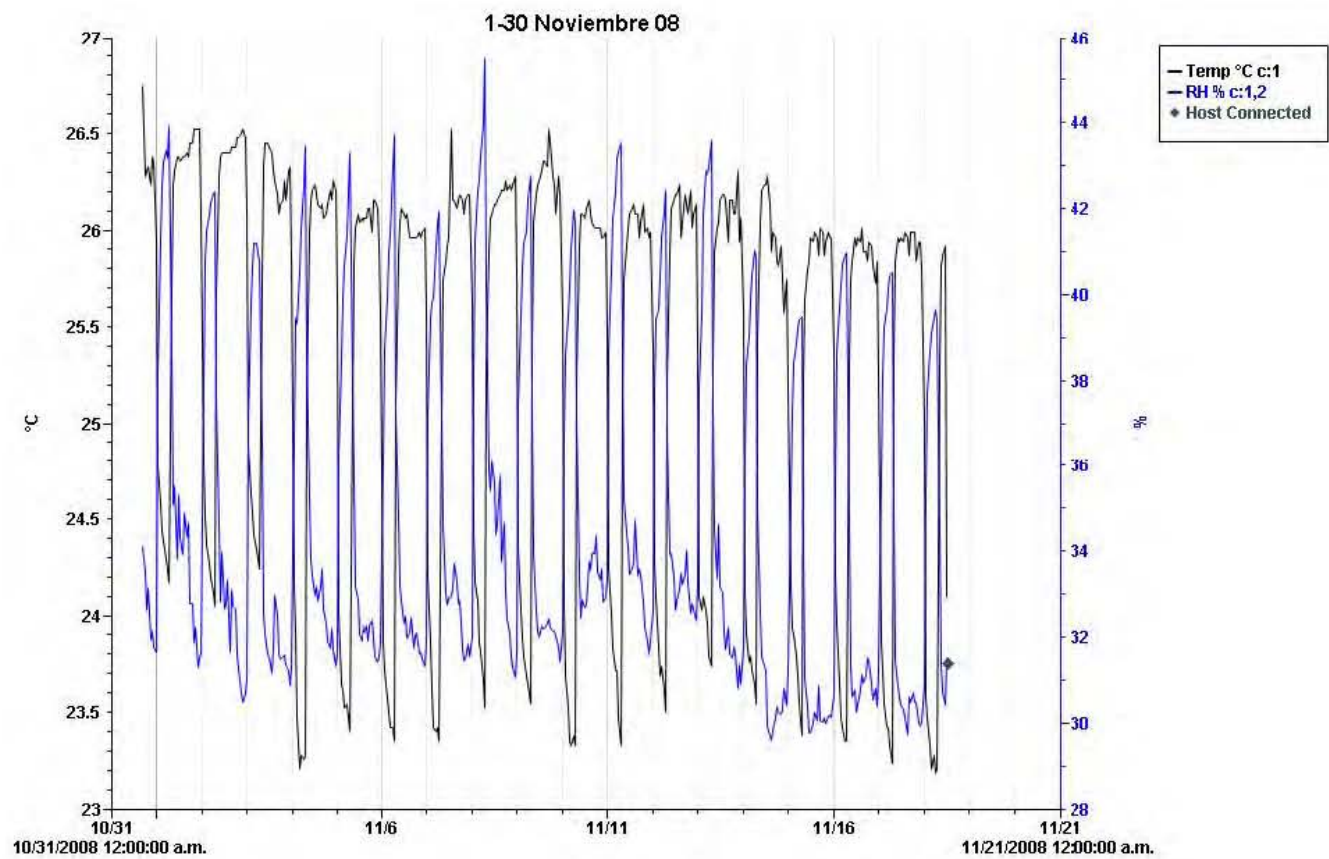


Figura 6.3: Humedad Relativa y Temperatura Cámara 4 Noviembre 2008

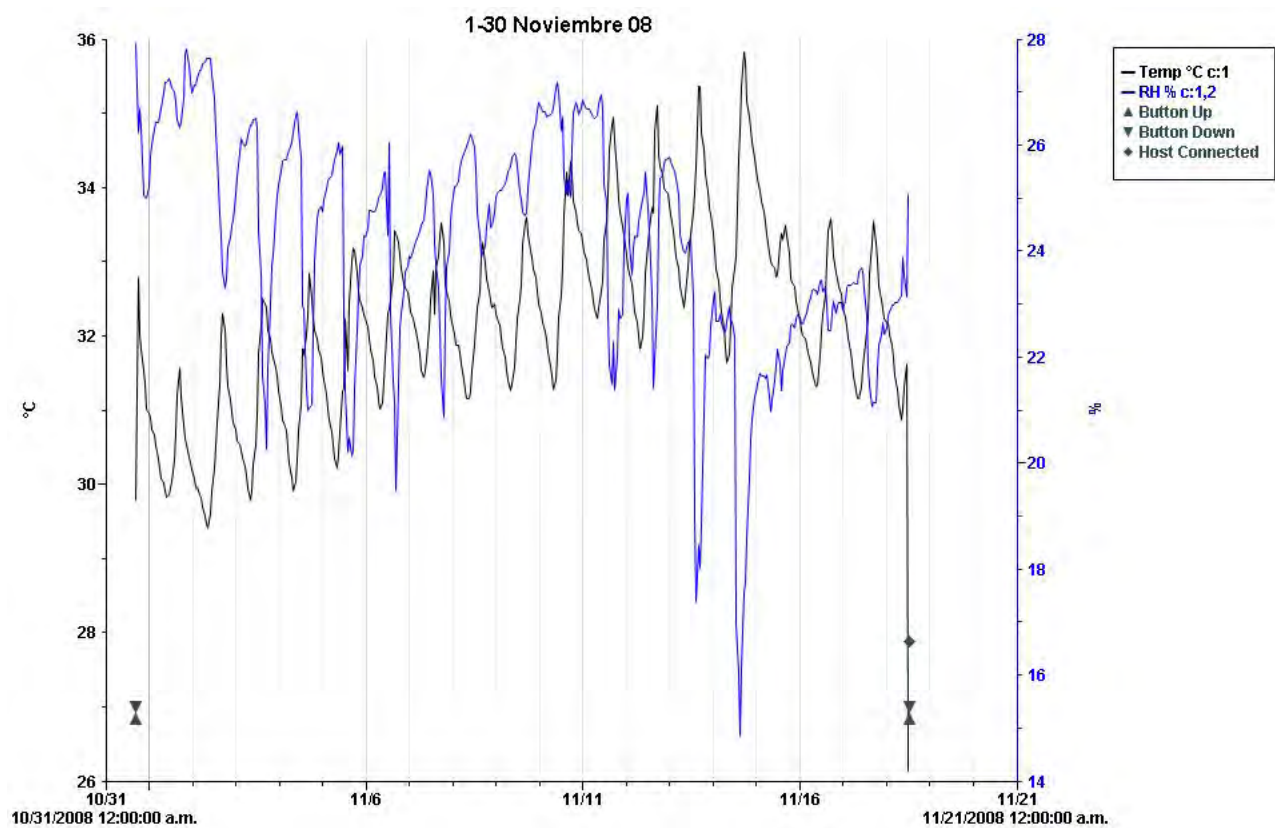


Figura 6.4: Humedad Relativa y Temperatura Cámara 3 Noviembre 2008

Los gráficos de temperatura y humedad relativa muestran el ciclo del día y la noche como la condición de frontera predominante. En cada uno de los días de registro se tiene un máximo de temperatura, que en general corresponde a las horas del medio día, y en las mismas horas se tiene un mínimo de humedad relativa.

Se tienen los valores promedios para cada etapa.

Etapas	Planta	T Hoja (K) $\pm 0,05K$	T Ambiente (K) $\pm 2K$	Humedad Relativa Promedio (% $\pm 0,0005$ %)
30 sep-17 oct	1	309.35	307.056	28.2538
30 sep-17 oct	2	299.73	298.538	37.9716
30 sep-17 oct	3	309.35	307.056	28.2538
30 sep-17 oct	4	299.63	298.538	37.9716
27 oct-11 nov	1	299.71	298.418	35.4454
27 oct-11 nov	2	307.43	304.836	25.0393
27 oct-11 nov	3	299.51	298.418	35.4454
27 oct-11 nov	4	307.33	304.836	25.0393

Cuadro 6.2: Temperatura y Humedad Relativa Promedio

6.3. Área de las Hojas

El área de las hojas es importante porque se necesita saber el área expuesta a la radiación luminosa; además, en una parte posterior de los cálculos se requieren los valores de producción de entropía por unidad de área, para así tener noción de la producción de entropía en un área verde cualquiera. Para cada planta se hicieron cálculos de las áreas en cada etapa del experimento. Se considera el área verde total de la planta, puesto que la densidad estomática no se conoce. La densidad estomática de una planta debe ser proporcional al área de las hojas.



Figura 6.5: Vista utilizada para aproximar el área total de las plantas



Figura 6.6: Vista utilizada en particular para la Planta 2

Se utilizaron dos diferentes procedimientos para tener comparación. Se hizo un conteo de las hojas y se consideró el área mayor y menor para cada planta. Se sacó un promedio de ésta área y se obtuvieron las siguientes áreas:

Planta	Área Verde Etapa 1 $cm^2 \pm 0,030$	Área Verde Etapa 2 $cm^2 \pm 0,030$
1	451.58	461.04
2	340.72	350.02
3	463.72	263.72
4	292.00	313.46

Cuadro 6.3: Medidas promedio del área de cada planta

Durante el lapso de tiempo entre las dos etapas de experimentos se mantuvieron fuera de las cámaras y se continuaron regando con la misma cantidad de agua. Este tiempo fué de 7 días, y la planta 3 se vió afectada por una plaga que la hizo perder parte de su follaje, por ello hay una diferencia de masa considerable entre la etapa 1 y la etapa 2 para dicho individuo.

Parte V

Análisis

Capítulo 7

Medidas Promedios

7.1. Temperatura

Se tuvieron los siguientes resultados para la humedad relativa promedio, la temperatura ambiente y la temperatura de la hoja para cada individuo. Se tienen dos resultados por planta puesto que corresponden a las dos etapas del experimento.

Planta	Temperatura Ambiente (K)(± 2)	Temperatura Hoja (K)($\pm 0,05$)	Humedad Relativa (%) ($\pm 0,0005$)
1	307.05	309.36	28.25
2	298.54	299.70	37.98
3	307.05	309.55	28.25
4	298.53	299.64	37.98
1	298.41	299.71	35.44
2	304.83	307.43	25.04
3	298.41	299.51	35.44
4	304.83	307.33	25.04

Cuadro 7.1: Medidas promedio de la temperatura ambiental, la temperatura de la hoja y la humedad relativa

7.1.1. Área de las plantas

Se obtuvo lo siguiente para las áreas de las plantas:

Planta	Área Primera Etapa (cm^2) ($\pm 0,030$)	Área Segunda Etapa (cm^2) ($\pm 0,030$)
Planta 1	451.5	461.045
Planta 2	340.725	350.024
Planta 3	463.72	263.721
Planta 4	292	313.466

Cuadro 7.2: Medida promedio del área de cada planta

7.1.2. Variación de la Masa

Se hicieron cálculos para la variación de masa y se obtuvieron valores diarios del flujo de masa. Se obtuvo lo siguiente:

- Planta 1 $303K \pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05$ g)	Cantidad de Agua (g ± 10)	$\Delta m(g)(\pm 0,05)$	Tasa $\frac{g}{seg} (\pm 0,05)$
Martes 30 sep	640		90.9	0.001052083
Miércoles 1 oct	549.1	150	122.9	0.00142
Jueves 2 oct	576.2	150	91.5	0.00105
Día	Masa (g $\pm 0,05$ g)	Cantidad de Agua (g ± 10)	$\Delta m(g)(\pm 0,05)$	Tasa $\frac{g}{seg} (\pm 0,05)$
Viernes 3 oct	634.7	200	278	0.00321
Lunes 6 oct	556.7	100	99.1	0.00057
Martes 7 oct	557.6	100	77.8	0.00090
Miércoles 8 oct	579.8	100	164.5	0.00193
Jueves 9 oct	515.3	100	-13.2	-0.00015
Viernes 10 oct	628.5	200	239.4	0.00277
Martes 14 oct	589.1	100	113.1	0.00130
Miércoles 15 oct	576	100	93.1	0.00107
Jueves 16 oct	582.9	150	94.3	0.00109
Viernes 17 oct	638.6			

Cuadro 7.3: Variación de la masa, Planta 1, 303 K

- Planta 2 298K $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05$ g)	Cantidad de Agua (g ± 10 g)	$\Delta m(g) (\pm 0,05)$	Tasa $\frac{g}{seg} (\pm 0,05)$
Martes 30 sep	529.1		57.2	0.00066
Miércoles 1 oct	471.9	100	77.7	0.00089
Jueves 2 oct	494.2	150	92.2	0.00106
Viernes 3 oct	552	200	234.2	0.00271
Lunes 6 oct	517.8	100	106.4	0.00061
Martes 7 oct	511.4	100	92.6	0.00107
Miércoles 8 oct	518.8	100	62.6	0.00072
Jueves 9 oct	556.2	100	95.4	0.00110
Viernes 10 oct	560.8	200	209.3	0.00060
Martes 14 oct	551.5	100	99.3	0.00114
Miércoles 15 oct	552.2	100	82.3	0.00095
Jueves 16 oct	569.9	150	109.9	0.00127
Viernes 17 oct	610			

Cuadro 7.4: Variación de la masa, Planta 2 , 298 K

- Planta 3 303K $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05g$)	Cantidad de Agua (g $\pm 10g$)	$\Delta m(g)$ ($\pm 0,05$)	Tasa $\frac{g}{seg}$ ($\pm 0,05$)
Martes 30 sep	628		65.5	0.00075
Miércoles 1 oct	562.6	100	96.8	0.0011
Jueves 2 oct	565.8	150	66.3	0.00076
Viernes 3 oct	649.5	200	264.8	0.00306
Lunes 6 oct	584.7	100	89.5	0.00051
Martes 7 oct	595.2	100	66.2	0.00076
Miércoles 8 oct	629	100	61.8	0.00071
Jueves 9 oct	667.2	100	104.7	0.00121
Viernes 10 oct	662.5	200	257.1	0.00074
Martes 14 oct	605.4	100	108.7	0.00125
Miércoles 15 oct	596.7	100	96.9	0.00112
Jueves 16 oct	599.8	150	135.3	0.00156
Viernes 17 oct	614.5			

Cuadro 7.5: Variación de la masa, Planta 3, 303 K

- Planta 4 298K $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05g$)	Cantidad de Agua (g $\pm 10g$)	$\Delta m(g)$ ($\pm 0,05$)	Tasa $\frac{g}{seg}$ ($\pm 0,05$)
Martes 30 sep	575		42.9	0.00049
Miércoles 1 oct	532.1	100	73.4	0.00084
Jueves 2 oct	558.7	150	62.9	0.00072
Viernes 3 oct	645.8	200	260.3	0.00301
Lunes 6 oct	585.5	100	90.9	0.00105
Martes 7 oct	594.6	100	85.3	0.00098
Miércoles 8 oct	609.3	100	46	0.00053
Jueves 9 oct	663.3	100	99	0.00114
Viernes 10 oct	664.3	200	221.8	0.00251
Martes 14 oct	642.5	100	81.8	0.00094
Miércoles 15 oct	660.7	100	83.9	0.00097
Jueves 16 oct	576.8	150	125	0.00144
Viernes 17 oct	701.8			

Cuadro 7.6: Variación de la masa, Planta 4, 298 K

- Planta 1 298k $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05g$)	Cantidad de Agua (g $\pm 10g$)	$\Delta m(g)$ ($\pm 0,05$)	Tasa $\frac{g}{seg}$ ($\pm 0,05$)
Lunes 27 oct	641.4	100	146.1	0.00084
Miércoles 29 oct	595.3	150	93.7	0.00054
Jueves 30 oct	651.6	100	159	0.00736
Lunes 30 nov	592.6	150	83.3	0.00093
Martes 4 nov	659.3	100	121.8	0.00140
Miércoles 5 nov	637.5	100	109.7	0.00126
Jueves 6 nov	627.8	100	93.8	0.00108
Viernes 7 nov	634	200	269	0.00103
Lunes 10 nov	565	100	64.7	0.00074
Martes 11 nov	600.3	100		

Cuadro 7.7: Variación de la masa , Planta 1,298 K

- Planta 2 303K $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05g$)	Cantidad de Agua (g $\pm 10g$)	$\Delta m(g)$ ($\pm 0,05$)	Tasa $\frac{g}{seg}$ ($\pm 0,05$)
Lunes 27 oct	548.8	100	179.8	0.00104
Miércoles 29 oct	519	150	118.4	0.00137
Jueves 30 oct	550.6	100	192.1	0.00055
Lunes 30 nov	508.5	150	117	0.00135
Martes 4 nov	541.5	100	112.5	0.00130
Miércoles 5 nov	529	100	110.8	0.00128
Jueves 6 nov	518.2	100	92.5	0.00107
Viernes 7 nov	525.7	200	223.9	0.00086
Lunes 10 nov	501.8	100	88.8	0.00102
Martes 11 nov	513	100		

Cuadro 7.8: Variación de la masa, Planta 2, 303 K

■ Planta 3 298K $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05g$)	Cantidad de Agua (g $\pm 10g$)	$\Delta m(g)$ ($\pm 0,05$)	Tasa $\frac{g}{seg}$ ($\pm 0,05$)
Lunes 27 oct	784.2	100	166.6	0.00096
Miércoles 29 oct	717.6	150	93.2	0.00107
Jueves 30 oct	774.4	100	195.9	0.00056
Lunes 30 nov	678.5	150	75	0.00086
Martes 4 nov	753.5	100	92.5	0.00107
Miércoles 5 nov	761	100	117.5	0.00135
Jueves 6 nov	743.5	100	101.5	0.00117
Viernes 7 nov	742	200	285.4	0.00110
Lunes 10 nov	656.6	100	67.4	0.00078
Martes 11 nov	689.2	100		

Cuadro 7.9: Variación de la masa, Planta 3, 298 K

■ Planta 4 303K $\pm 2K$

Día	Masa (g $\pm 0,05g$)	Cantidad de Agua (g $\pm 10g$)	$\Delta m(g)$ ($\pm 0,05$)	Tasa $\frac{g}{seg}$ ($\pm 0,05$)
Lunes 27 oct	665.8	150	194.7	0.00112
Miércoles 29 oct	621.1	150	103.6	0.00119
Jueves 30 oct	667.5	150	204.5	0.00059
Lunes 30 nov	613	150	162.4	0.00187
Martes 4 nov	666	100	84.6	0.00119
Miércoles 5 nov	662.4	100	103.6	0.00119
Jueves 6 nov	643.6	100	118.8	0.00137
Viernes 7 nov	649.4	200	94.2	0.00109
Lunes 10 nov	588.9	100	260.5	0.00100
Martes 11 nov	635.3	100	53.6	0.00062

Cuadro 7.10: Variación de la masa, Planta 4, 303 K

Capítulo 8

Cálculo del coeficiente de producción de entropía como función de la Temperatura

8.1. Problema del Potencial Químico como una función $\mu(T, p)$

Para el cálculo del coeficiente de producción de entropía se tiene que el potencial químico en realidad no permanece constante, puesto que:

$$\frac{d_1 S}{dt} = \frac{dn}{dt}(T) \left(\frac{\mu_l(T_l, P_s)}{T_l} - \frac{\mu_v(T_v, P_i)}{T_v} \right) \quad (8.1)$$

Donde en el interior de la hoja se tiene que la presión corresponde a P_s que es la presión de saturación y en el ambiente se considera P_i que es la presión parcial. Esta diferencia de las presiones del vapor de agua es suficiente y necesaria para que ocurra el proceso de la evaporación. Se harán los cálculos necesarios para determinar el potencial químico en función de estas presiones y temperaturas.

8.1.1. Presión de Saturación

Se realizó un ajuste de los datos de la tabla 2.3 para la presión de saturación en función de la temperatura. Se obtuvieron los siguientes valores:

Temperatura(K)	Presión de Vapor teórica (atm)	Presión de Vapor Ajustada (atm)
273	0.00605	0.00652
293	0.02300	0.02070
313	0.07276	0.06090
333	0.19605	0.16761
353	0.46710	0.43480
373	1	1.07013
307.05571		0.04452
298.53792		0.02811
298.41838		0.02793
304.83633		0.03954

Cuadro 8.1: Ajuste de la presión de saturación en función de la temperatura

El ajuste está dado por la siguiente ecuación:

$$P(T) = 1x10^{-41}(T)^{16,34} \quad (8.2)$$

con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9967$

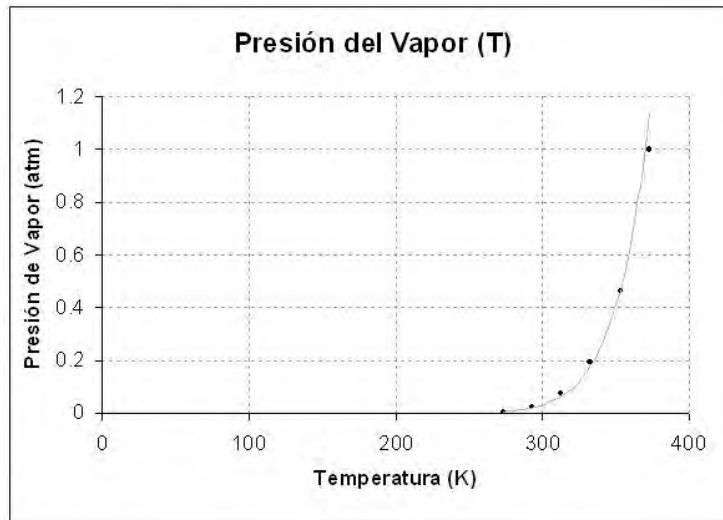


Figura 8.1: Gráfico de Ajuste de la Presión de Saturación

8.1.2. Presión Parcial

La presión parcial se obtiene como se vió en la sección 2.3.1 como:

$$P_i = \frac{HR}{100} x P_s$$

tomando los valores promedio de la humedad relativa se obtiene que

Temperatura	Presión de Vapor Ajustada (atm)	Humedad Relativa	Presión Parcial
307.05571	0.04452	37.97	0.01690
298.53792	0.02811	28.25	0.00794
298.41838	0.02793	35.45	0.00990
304.83633	0.03954	25.04	0.00990

Cuadro 8.2: Presión parcial en función de la temperatura

8.1.3. Potencial Químico

El potencial químico ajustado se calcula entonces como:

$$\mu(T, p) = \mu_0 + RT \ln \left(\frac{P_i}{P_s} \right)$$

Donde $R = 1.986 \frac{\text{cal}}{\text{molK}}$

Para el interior de la hoja no se tiene corrección al potencial químico puesto que el término $\ln \frac{P_s}{P_s} = 0$; es decir la corrección el potencial químico en la fase líquida es el de saturación. Para el potencial químico en el aire o en la fase gaseosa, se considera la presión parcial encontrada en función de la temperatura y se tiene entonces que:

Temperatura(K)	Presión de Vapor Ajustada (atm)	Presión Parcial	ϵ (J/mol K)
307.05571	0.04452	0.0169	-8.8501
298.53792	0.02811	0.0079	-11.3398
298.41838	0.02793	0.0099	-9.4461
304.83633	0.03954	0.0099	-12.3288
Temperatura(K)	Presión de Vapor Ajustada (atm)	Presión Parcial	ϵ (J/mol K)

Cuadro 8.3: Corrección al Potencial Químico

Se denota como ϵ la corrección hecha al potencial $\mu_v(T, p)$. Se da la corrección por unidad de temperatura. Posteriormente se determinará con esta corrección la producción de entropía de la transpiración.

8.2. Cálculo de la Transpiración $\frac{dn}{dt}$

Se hizo un promedio por cada planta en sus dos diferentes etapas, con lo que se obtuvieron 8 valores de flujo de masa promedio en gramos/segundo.

Intervalo de Tiempo	Planta	Tasa $\frac{g}{s}$	Kat = $\frac{mol}{s}$
30 sep-17 oct	1	0.001352093	7.511×10^{-6}
30 sep-17 oct	2	0.001069565	5.942×10^{-6}
30 sep-17 oct	3	0.001134187	6.301×10^{-6}
30 sep-17 oct	4	0.001184172	6.578×10^{-6}
27 oct-11 nov	1	0.00169539	9.418×10^{-6}
27 oct-11 nov	2	0.001111526	6.175×10^{-6}
27 oct-11 nov	3	0.001000241	5.556×10^{-6}
27 oct-11 nov	4	0.001106607	6.147×10^{-6}

Cuadro 8.4: Flujo de masa promedio para cada planta.

Para el agua se tiene que un mol es equivalente a 18 gramos, por tanto se obtuvo la variación molar promedio para cada planta.¹

8.3. Cálculo de la Producción de Entropía Γ

8.3.1. Cálculo sin corrección al Potencial

Se calculó primero sin corrección al potencial químico; es decir, si se considera μ constante; ie, que no varíe con la temperatura, se tiene que:

$$\frac{d_i S}{dt} = \left[\frac{\mu_l(T_l, P_l)}{T_l} - \frac{\mu_v(T_v, P_v)}{T_v} \right] \frac{dn}{dt}(T)$$

Esto es con $\mu_l(T_l, P_l) = \mu_l$ y $\mu_v(T_v, P_v) = \mu_v$

¹Esta medida está dada en la unidad katalítica, el katal (kat) indica que tan rápido se da el proceso de transformación de una sustancia.

Etapa	Planta	Temperatura Hoja (K)(±0,05)	Temperatura Ambiente (K) (±2)	Coefficiente ($\frac{J}{sK}$)	($\frac{J}{sKmolm^2}$)
30 sep-17 oct	1	309.355	307.056	0.00251	0.05574
30 sep-17 oct	2	299.738	298.538	0.00189	0.05552
30 sep-17 oct	3	309.555	307.056	0.00214	0.04618
30 sep-17 oct	4	299.637	298.538	0.00207	0.07115
27 oct-11 nov	1	299.713	298.418	0.00302	0.06559
27 oct-11 nov	2	307.436	304.836	0.00213	0.06090
27 oct-11 nov	3	299.518	298.418	0.00175	0.06658
27 oct-11 nov	4	307.336	304.836	0.00210	0.06722

Cuadro 8.5: Coeficiente de Producción de entropía sin corrección al Potencial Químico

Se obtiene para el ajuste

$$CoeficientedeProduccindeEntropa(T) = -0,0012T + 0,4165 \tag{8.3}$$

Con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,56$ El coeficiente de producción de entropía queda dado como una función de la temperatura, de tal modo que disminuye al aumentar la temperatura. Esto quiere decir que la producción de entropía debido a la transpiración es inversamente proporcional a la temperatura, en este tipo de planta; sin embargo se puede observar una región de temperaturas en la que la producción de entropía sería máxima.

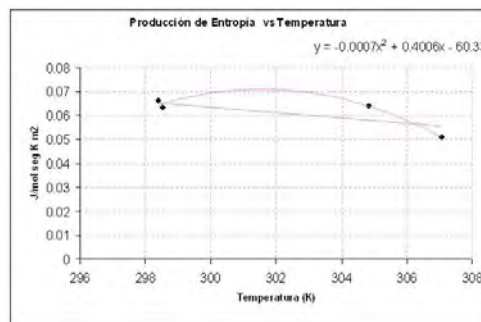


Figura 8.2: Ajuste del Coeficiente de Producción de Entropía en Función de la Temperatura

8.3.2. Cálculo con corrección al Potencial Químico

Se obtuvieron las correcciones al potencial químico de la fase gaseosa, es decir del ambiente. Se denotan por ϵ estas correcciones, entonces, el cálculo de la producción de entropía queda dado como:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\mu_l(T, p)}{T_l} - \left(\frac{\mu_v(T, p)}{T_v} + \epsilon \right) \tag{8.4}$$

Temperatura	$\frac{J}{smolK}(\epsilon)$	$\frac{J}{smolK m^2}(\epsilon)$
307.05571	0.0005583	0.01221
298.53792	0.0006599	0.02106
298.41838	0.0006480	0.01795
304.83633	0.0007114	0.02150

Cuadro 8.6: Coeficiente de Producción de entropía con correcciones al potencial

Se realizó un ajuste en función de la temperatura y se observa, como en el caso anterior, un comportamiento cuadrático. Existe una región de temperaturas en donde la producción de entropía sería máxima para esta planta.

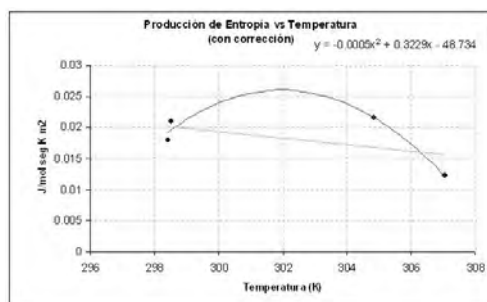


Figura 8.3: Ajuste del Coeficiente de Producción de Entropía con corrección en Función de la Temperatura

Se obtienen para las cuatro temperaturas promedio:

Temperatura	$\frac{J}{molsK}$	$\frac{J}{molsKm^2}$	$\frac{J}{segK}(\epsilon)$	$\frac{J}{segKm^2}(\epsilon)$
307.056	0.001528	0.05096	0.0005583	0.01221
298.538	0.001616	0.06334	0.0006599	0.02106
298.418	0.001918	0.06608	0.0006480	0.01795
304.836	0.001346	0.06406	0.0007114	0.02150

Cuadro 8.7: Comparación de la Producción de entropía

8.4. Producción de Entropía en la Tierra

Dado el coeficiente de producción de entropía de la transpiración, se calcula para un área verde la producción de entropía en términos de este valor. Cabe hacer notar que no se consideran estratificaciones en el área verde muestra, es decir, se toman datos superficiales. Esto reduce considerablemente el factor resultante puesto que al área verde de una zona boscosa, por ejemplo, puede considerar varios órdenes de magnitud por arriba del área superficial que ocupe la zona.

Para los siguientes cálculos se consideran los coeficientes de producción de entropía interna calculados con la corrección al potencial ($\mu(\epsilon)$). Se sabe que el área verde total es del 43.9 % del área total continental ($147\ 918\ 932\text{km}^2$) y corresponde a $64\ 936\ 411.15\ \text{km}^2 = 6.4936411 \times 10^{13}\ \text{m}^2$

8.4.1. Cálculo con corrección al Potencial Químico

Área Verde (Km^2)	307.055 K	298.537 K	298.418 K	304.836 K
64 936 411.15	7.9336×10^{11}	1.36805×10^{12}	1.16612×10^{12}	1.3967×10^{12}
	$(\frac{J}{smolK})$	$(\frac{J}{smolK})$	$(\frac{J}{smolK})$	$(\frac{J}{smolK})$

Cuadro 8.8: Cálculo de la Producción de entropía de las Áreas Verdes de la Tierra

8.5. Variación de Temperatura y Albedo en el cálculo

Una región con menos plantas tendrá un albedo mayor; esto es, una región más clara (un desierto, por ejemplo). Por tanto se puede calcular la producción de entropía de la tierra con diferentes valores de albedo a temperatura constante 255K. Esto provocará una disminución de la producción de entropía global.

Se puede ver entonces que los coeficientes de producción de entropía externa disminuirán al aumentar el albedo y al aumentar la temperatura. Las variaciones de temperatura se hacen con albedo constante de 0.39. Se utiliza que: el área de la tierra total es de $510\ 072\ 000\ \text{Km}^2$, la temperatura del sol está dada como 5778 K. Se hace el cálculo de forma similar al realizado en la sección 3.2.

Albedo	Temperatura	Incidente ($\frac{W}{m^2}$)	$\frac{J}{segKm^2}$	$\frac{J}{segK_{sol}m^2}$	$\frac{J}{segKm^2}$	$\frac{J}{segK}$
0.39	255	208.46	0.81751	0.03607	0.78144	$3,99x10^{13}$
0.39	307.056	208.46	0.67892	0.03607	0.64284	$3,28x10^{13}$
0.39	298.538	208.46	0.69829	0.03607	0.66221	$3,38x10^{13}$
0.39	298.418	208.46	0.69857	0.03607	0.66249	$3,38x10^{13}$
0.39	304.836	208.46	0.68386	0.03607	0.64778	$3,30x10^{13}$
0.36	255	218.72	0.85772	0.03785	0.81987	$4,18x10^{13}$
0.45	255	187.96	0.73710	0.03253	0.70457	$3,59x10^{13}$
0.50	255	170.87	0.67009	0.02957	0.64052	$3,27x10^{13}$
0.60	255	136.70	0.53607	0.02365	0.51241	$2,61x10^{13}$
0.70	255	102.52	0.40205	0.01774	0.38431	$1,96x10^{13}$

Cuadro 8.9: Cálculo del Coeficiente de Producción de Entropía variando el Albedo y la Temperatura

Dada el área total de la Tierra, la última columna indica la producción total de entropía. Si se considera la producción de entropía debido a la transpiración, se puede hablar de un porcentaje significativo del total de producción de entropía de la Tierra.

Considerando el valor de la producción de entropía global para un albedo de 0.39 y una temperatura de la Tierra de 255 K se tiene que la producción de entropía debida a la transpiración es una fracción de la global. Se considera el área total de la Tierra como $510\,072\,000Km^2$. Se considera que la Tierra tiene un flujo de entropía externo de $0.78144 \frac{J}{segKm^2}$, que es la magnitud calculada anteriormente y por ende $3,99x10^{13} \frac{J}{Kseg}$ de producción total en toda su superficie. Si se considera solo el área continental, bajo las mismas condiciones se obtiene que la producción es de $1.16 \times 10^{13} \frac{J}{Kseg}$.

Si la transpiración fuera el único proceso que contribuye a la producción de entropía interna, deberían de igualarse estas cantidades, pero como no es así, la producción de entropía debido a la transpiración resulta una fracción de este total. Pero, si solo se considera el área verde ($64\,936\,411.15$ de km^2) se tiene que:

Temperatura (K)	$\frac{J}{segm^2K}$	Área Verde($\frac{J}{segK}$)	% de la Producción Total	% de la Producción Continental
307.056	0.01221	$7.9336x10^{11}$	1.99	6.84
298.538	0.02106	$1.36805x10^{12}$	3.43	11.8
298.418	0.01795	$1.16612x10^{12}$	2.92	10.1
304.836	0.02115	$1.3967x10^{12}$	1.16	12.0

Cuadro 8.10: Porcentaje debido a la transpiración de la Producción de entropía de la Tierra en función de la Temperatura

Es difícil cuantificar este resultado, por tanto, para tener una idea más clara de las magnitudes se considera un proceso reversible en el que se produce esta cantidad de entropía tras evaporar una cantidad de masa m desconocida.

Si el proceso es reversible $dS=0$, por tanto la cantidad de energía calorífica arrojada al ambiente tras el proceso es la misma cantidad de energía utilizada para transformar esa cantidad de masa de agua en vapor.

Se sabe que el calor absorbido por una masa m es tal que $Q = mL$ donde L es el calor de vaporización del agua con valor de 539 calorías/gramos en condiciones estándares de 1 atmósfera y 100°C.

Se consideran como variables las temperaturas para cada uno de los coeficientes:

Temperatura	$Q (\frac{J}{sK})$	Agua evaporada($\frac{kg}{s}$)	Agua Evaporada (Kg/ao)	Agua Evaporada ($\frac{m^3}{ao}$)
255.000	$3,99x10^{13}$			
307.056	$3,28x10^{13}$	$1.85x10^5$	$5.85x10^{12}$	$5.85x10^9$
298.538	$3,38x10^{13}$	$1.50x10^5$	$4.72x10^{12}$	$4.2x10^9$
298.418	$3,38x10^{13}$	$1.50x10^5$	$4.73x10^{12}$	$4.73x10^9$
304.836	$3,30x10^{13}$	$1.47x10^5$	$4.62x10^{12}$	$4.62x10^9$

Cuadro 8.11: Cálculo de la Cantidad de Agua Evaporada por Año

Donde Q es la cantidad de calor absorbida por la Tierra para el albedo de 0.39; y la cantidad de agua evaporada

se calcula con esta cantidad de calor como $m=Q/L$.

La cantidad de agua evaporada al año en la Tierra es de 74200 Km^3 , es decir $7,42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ por año.

Parte VI

Conclusiones

- Se concluye que la tasa de producción de entropía sí es afectada con la perturbación de temperatura. En la región estudiada de temperaturas se tiene que a menor temperatura se tiene mayor producción de entropía y a mayor temperatura una producción menor. Se puede proponer un modelo lineal al menos en esa región de temperaturas.
- Sí es significativo el aporte de la producción de entropía a la producción de entropía global, sin embargo, se necesita refinar el cálculo para obtener la densidad de hojas o densidad estomática por unidad de volumen de biomasa para obtener una mejor aproximación. Esto se refiere al hecho de que los porcentajes podrían aumentarse considerando los estratos de vegetación, puesto que el área considerada en los cálculos tiene realmente una diferencia de profundidades que no están siendo consideradas.

Parte VII
Apéndices

A. Orden en los sistemas vivos

Una de las características más representativas de los seres vivos es que presentan un orden arquitectónico y un orden funcional; ambos sumamente sofisticados. Para hablar del orden en los sistemas vivos se introduce lo que se conoce como estructuras disipativas.

Un ejemplo sencillo de este tipo de estructuras es lo que se conoce como inestabilidad de Benard. Se calienta una capa líquida desde la parte inferior. El sistema sale del estado de equilibrio que tenía puesto que ya no hay uniformidad en la temperatura; por pequeños gradientes de temperatura el calor se transporta por conducción, pero a partir de un cierto valor del gradiente (gradiente crítico) el calor se comienza a transportar también por convección. De este movimiento se generan ciertas estructuras con una organización muy regular, como celdas. Las celdas tienen forma hexagonal. Este fenómeno es una estructura con un alto nivel de complejidad; cabe hacer notar que antes de que aparecieran las celdas, la energía del sistema residía totalmente en su energía de agitación térmica. Después una parte es transferida en corrientes macroscópicas ordenadas comprendiendo un número muy elevado de moléculas. El hecho más notable es que estas estructuras son mantenidas debido a los intercambios de energía con el mundo exterior, en condiciones de no-equilibrio. Por esta razón se llaman estructuras disipativas.

Se puede demostrar que esta estructura nace después de una inestabilidad del sistema cerca del equilibrio termodinámico; a grandes rasgos el proceso físico puede verse como sigue: corrientes de convección aparecen continuamente, como fluctuaciones, pero por debajo del valor crítico del gradiente estas fluctuaciones experimentan una regresión. Más allá de este punto crítico algunas fluctuaciones son amplificadas y dan origen a una corriente macroscópica. Aparece un nuevo orden que corresponde esencialmente a una fluctuación grande que se estabiliza por los intercambios de energía con el mundo exterior. Es el llamado orden por fluctuación.

Para explicar la aparición de una estructura disipativa hay que tener en cuenta las fluctuaciones que aparecen en el sistema y analizarlas en el marco de la termodinámica irreversible. Dada la teoría de la termodinámica irreversible y el orden que se manifiesta en las estructuras y funciones de los sistemas vivos, se deduce que el funcionamiento de los sistemas vivos se realiza en un estado de no-equilibrio, y por tanto sus estructuras se pueden catalogar como estructuras disipativas.

De aquí se sigue que el funcionamiento de un sistema vivo puede ser aproximado con teoría de sistemas a estados de equilibrio libres de perturbaciones o fluctuaciones debidas al intercambio con el exterior. Cabe mencionar que dado el tamaño de las fluctuaciones el sistema puede o no caer en otro tipo de estructura disipativa según las nuevas interacciones.

B. Mundo de Margaritas (Daisy World)

Es una simulación que fue creada por James Lovelock y Andrew Watson para ilustrar la hipótesis Gaia.

Se basa en la hipótesis de un mundo que orbita un sol cuya temperatura está aumentando lentamente. El planeta se siembra con dos variedades diferentes de margaritas como únicas formas de vida: margaritas negras y blancas. Las margaritas blancas tienen flores que reflejan la luz y la otra variedad tiene flores negras que absorben la luz. Ambas especies tienen la misma tasa de reproducción en función de la temperatura, pero las margaritas negras son en sí mismas más calientes que las blancas y que la tierra desnuda. Un planeta con predominio de margaritas blancas es más frío que otro con más margaritas negras.

Al principio de la simulación, mundo de margaritas es tan frío que sólo unas pocas margaritas negras y casi ninguna blanca pueden sobrevivir. Siempre que la temperatura del planeta disminuya, las flores negras predominarán, absorben calor del sol, lo que hace que la temperatura del planeta aumente, permitiendo una mayor proliferación de margaritas negras y mayor absorción de calor. Cuando el planeta se hace más cálido, las margaritas blancas comienzan a reproducirse más, y a la larga, el planeta alcanza un punto de equilibrio en la temperatura. Cualquier incremento de temperatura es combatido por una mayor proporción de margaritas blancas; cualquier disminución de la temperatura conduce a tener un mayor número de margaritas negras. Un sistema así, es extraordinariamente estable frente a las variaciones de energía solar incidente; todo el planeta se mantiene en homeostasis. Finalmente la temperatura se hará demasiado alta para ser contrarrestada por las margaritas y el calor arrasará el planeta.

Cuando la simulación se realiza sin margaritas, la temperatura del planeta sigue la curva de la temperatura solar. Con las margaritas, al principio de la simulación el planeta tiene un calor adicional y al final es más fresco, resultando una temperatura cercana al equilibrio durante la mayor parte de la simulación. En este sentido, las margaritas están modificando el clima para crear unas condiciones más favorables para sí mismas. De cualquier manera, el sistema mundo de margaritas manifiesta histéresis: para unas constantes solares, el planeta tiene dos estados estables distintos, uno sin vida y otro cubierto de vida al 100%.

En versiones posteriores de la simulación mundo de margaritas se incluyen conejos, zorros y otras especies. Uno de los aspectos más sorprendentes de estas simulaciones es que cuanto mayor es el número de especies, mayor es la mejoría de los efectos sobre el planeta (esto es, la regulación de la temperatura mejora). Estos descubrimientos dan bases a la idea de que la biodiversidad es valiosa e inició la actual discusión a favor de la biodiversidad.

C.Humedad Relativa y Temperatura

A continuación se enlistan las figuras de humedad relativa y temperatura para cada cámara durante las dos etapas experimentales.

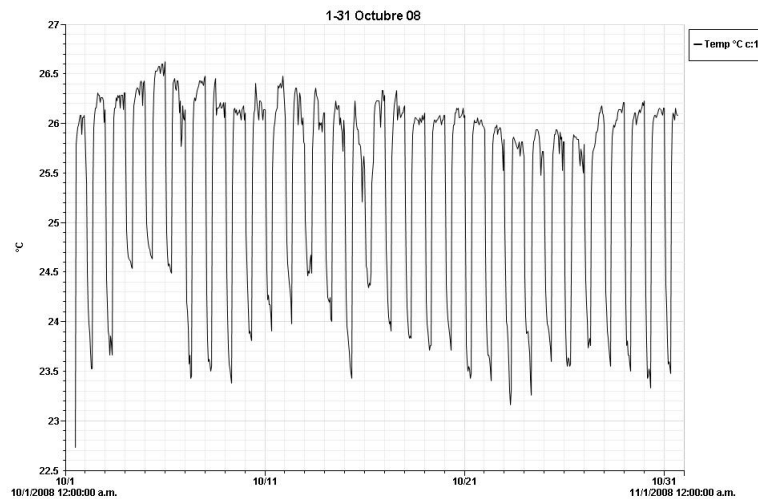


Figura 8.4: Temperatura Cámara 4 Octubre 2008

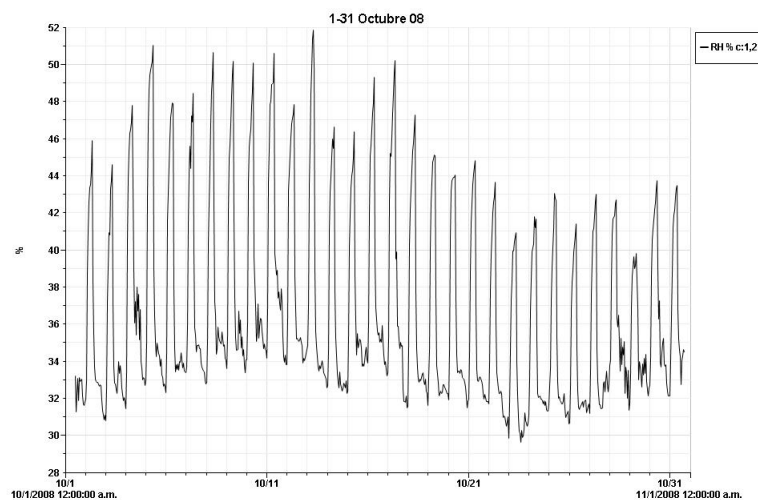


Figura 8.5: Humedad Relativa Cámara 4 Octubre 2008

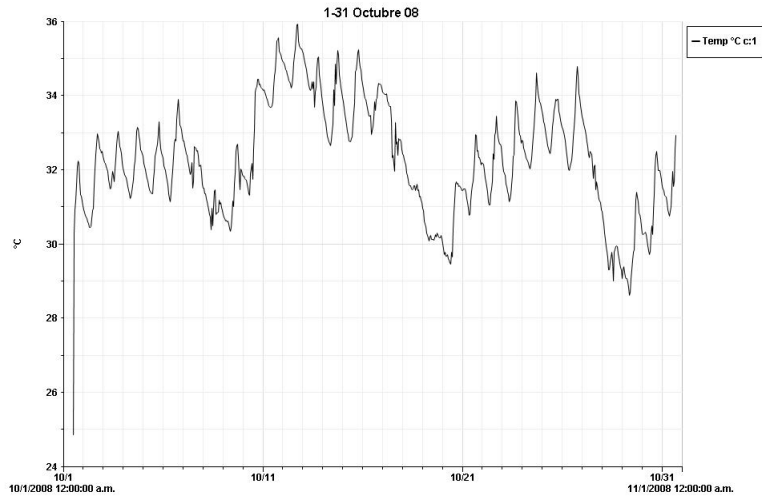


Figura 8.6: Temperatura Cámara 3 Octubre 2008

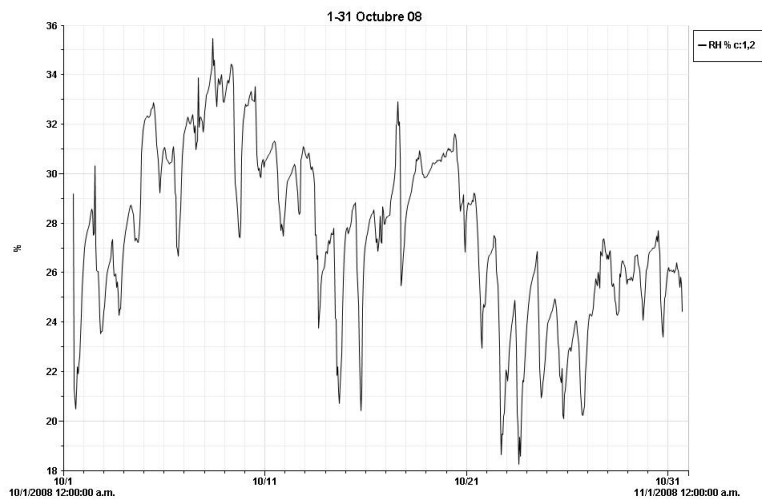


Figura 8.7: Humedad Relativa Cámara 3 Octubre 2008

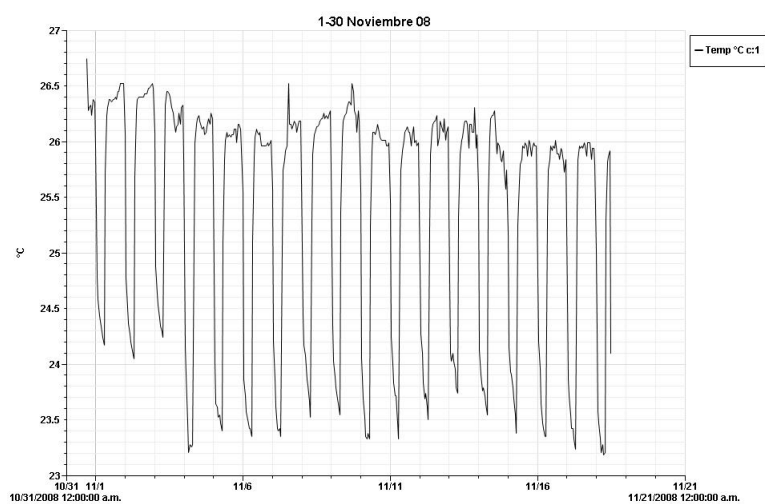


Figura 8.8: Temperatura Cámara 4 Noviembre 2008

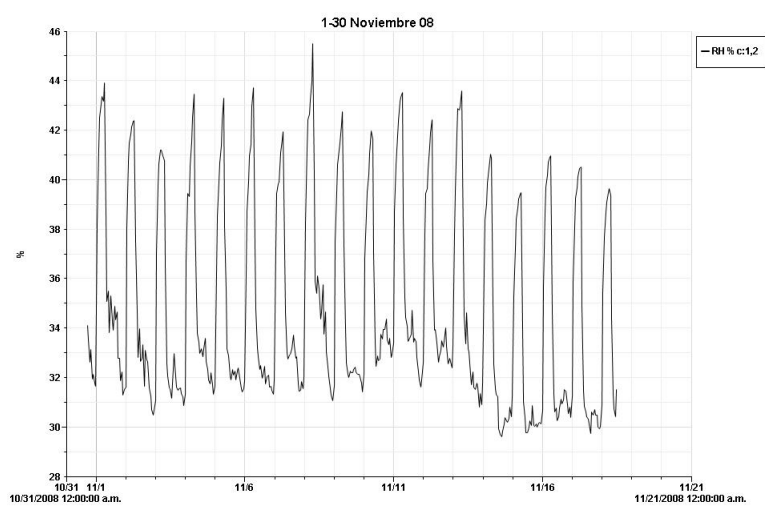


Figura 8.9: Humedad Relativa Cámara 4 Noviembre 2008

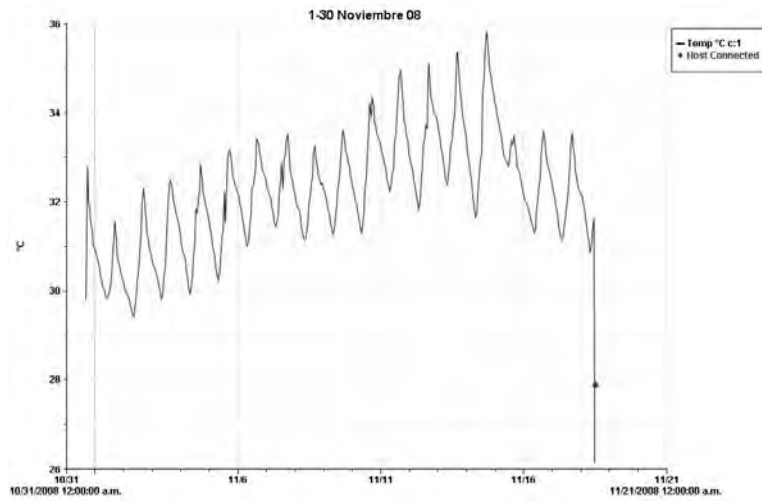


Figura 8.10: Temperatura Cámara 3 Noviembre 2008

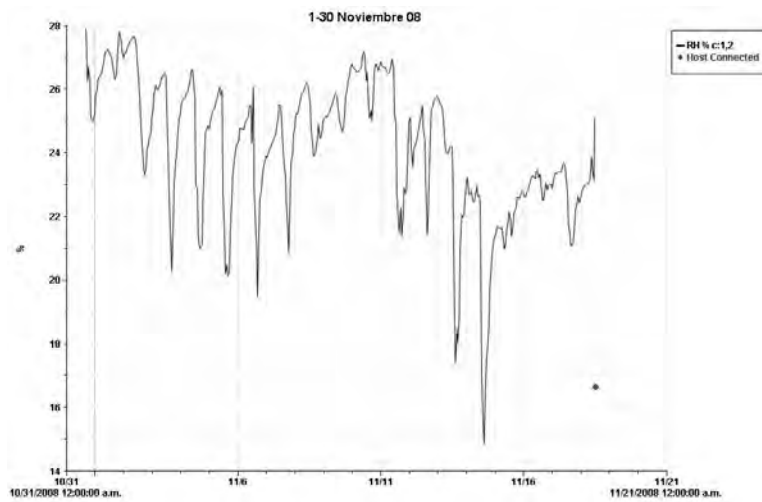


Figura 8.11: Humedad Relativa Cámara 3 Noviembre 2008

Bibliografía

- [1] Física Cuántica. Robert Eisberg, Robert Resnick. Editorial Limusa, S.A. 1978 México. Primera Edición.
- [2] La Termodinámica Aplicada a los Fenómenos Químicos Parte 2. Javier Rivas Ramos Hugo Solís Corola. Editorial Edicol S.A. México 1975.
- [3] Los tres primeros minutos del universo. Steven Weinberg. Alianza Editorial, S.A. España 1980. Segunda edición.
- [4] Termodinámica del Equilibrio. C. J. Adkins. Editorial Reverté, S.A. España 1977
- [5] Introducción a la Termodinámica Clásica. Leopoldo García, Colín Scherer. Editorial Trillas. Segunda Edición. México 1972
- [6] Termodinámica. Herbert B. Callen. México
- [7] Matemáticas para la ciencias de la naturales. José Luis Gutiérrez Sánchez y Faustino Sánchez Garduño. Sociedad Mexicana de Matemáticas . México. 1998
- [8] Biofísica. Gates
- [9] Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Ilya Prigogine. Charles c. Thomas Publisher. Tercera edición. 1967
- [10] Biofísica. Wolfgang Laskowski y wolfgang Pohlit. Ediciones Omega, s.A. Barcelona. España 1978
- [11] What's life? Mind and Matter. Erwin Schrödinger. Cambridge University Press. Inglaterra 1967.
- [12] El Origen de la Vida. A.Oparin. Ediciones de Cultura Popular, S.A. México 1977. Primera edición, Decimocuarta reimpresión.
- [13] El Origen de la Vida. Antonio Lazcano y Alfredo Barrera. UNAM. Dirección General de Publicaciones. Primera Edición. México 1978
- [14] Biología Molecular. F. Jacob, J.Monod, M. Calvin, E.Tatum, J. Brachet, I. Prigogine, et all. Ediciones Orbis S.A. España 1986
- [15] Fisiología Vegetal. Frank B. Salisbury, Clean W Ross. Grupo Editorial Iberoamérica S.A de C.V., 1994, México. 4º edición.
- [16] Ecología. Ramón Margalef. Ediciones Omega. Barcelona 1989.
- [17] Fisiología Vegetal. Dieter Hess. Ediciones Omega S. Barcelona, 1980
- [18] Plant transpiration and net entropy exchange on the Earth's surface in Czech watershed. Miroslav Tesar, Miloslav Sir, Lubomir Lichner & Jan Cermak. Versita Biologia, Bratislava. 62/5:547-551, 2007 Section Botany.
Ecosistemas
- [19] Visual Atlas of the World. National Geographic Society. Italia 2009
- [20] <http://www.eoearth.org/article/Ecosystem>

- [21] [http://www.eoearth.org/article/Causes of forest land use change](http://www.eoearth.org/article/Causes_of_forest_land_use_change)
- [22] <http://www.worldbiomes.com/>
- [23] [http://www.fao.org/docrep/007/ae217s/ae217s00.htm# TopOfPage](http://www.fao.org/docrep/007/ae217s/ae217s00.htm#_Toc123456789)
- [24] <http://archive.wri.org/page.cfm> Plantas
- [25] <http://homepage.mac.com/uriarte/carbono13.html>
- [26] <http://www.cienciahoy.org.ar/hoy27/agua2.htm>
- [27] [http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/act biologicos/acertijos00-01/solucion17.htm](http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/act_biologicos/acertijos00-01/solucion17.htm) permanentes/conciencia/biologia/acertijos
- [28] [http://www.etsmre.upv.es/varios/biologia/Temas/tema 12.htm](http://www.etsmre.upv.es/varios/biologia/Temas/tema_12.htm) física
- [29] <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi>
- [30] [http://www.burle.com/cgi-bin/byteserver.pl/pdf/Electro Optics.pdf](http://www.burle.com/cgi-bin/byteserver.pl/pdf/Electro_Optics.pdf)
- [31] [http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/El agua en la tierra.html](http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/El_agua_en_la_tierra.html)