

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA

**MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA ECOLÓGICA
DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES,
ORIENTADO A SU USO DIDÁCTICO.**

Idónea Comunicación de Resultados

Para obtener el grado de Maestro en Ecología Aplicada

PRESENTA

BIÓL. JOSÉ MANUEL MARTÍNEZ MONTES

COMITÉ TUTORAL:

Director: Dr. Luis Amado Ayala Pérez. DEHA. UAM-X

Codirector: Dr. Manuel Jesús Zetina Rejón CICIMAR-IPN

Asesor: Dr. Rodrigo Moncayo Estrada. CICIMAR-IPN

Ciudad de México, 20 de septiembre de 2024.

Los integrantes del comité tutorial de **José Manuel Martínez Montes**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado la Idónea Comunicación de Resultados titulada: **“Modelo de simulación de la dinámica ecológica de La Reserva de la Biósfera Los Petenes, orientado a su uso didáctico”** para obtener el grado de **Maestro en Ecología Aplicada**.

Nombre

Firma

Director de Tesis Dr. Luis Amado Ayala Pérez

Codirector de Tesis Dr. Manuel Jesús Zetina Rejón

Asesor de Tesis Dr. Rodrigo Moncayo Estrada

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a todas aquellas personas que, de un modo u otro, estuvieron a mi lado brindándome su indiscutible apoyo y creyendo en mí. Principalmente, a mi madre Antonina Montes Domínguez y a mi padre Pedro Martínez Mejía, que me encaminaron por el sendero de la educación, conocimiento y aprendizaje, siempre los llevo en mi mente. A la luz de mi vida, mi hija Giselle Martínez Villarruel, a mi esposa Angélica Villarruel S., por su gran amor y respeto y a toda mi familia en general. Gracias por existir.

Con todo mi amor para ustedes

AGRADECIMIENTOS

A las instituciones que brindaron su apoyo tanto académico como financiamiento económico:

- Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT)

Al Comité Tutorial por su apoyo incondicional, su gran conocimiento y paciencia durante el desarrollo de esta investigación:

- Dr. Luis Amado Ayala Pérez
- Dr. Rodrigo Moncayo Estrada
- Dr. Manuel Jesús Zetina Rejón

Por su apoyo y asesoría brindada con ejemplos de sistemas acuáticos:

- Maestro Alfonso Esquivel Herrera

Por su paciencia, apoyo moral y el espacio brindado durante el taller impartido:

- Dra. Brenda Iliana Vega Rodríguez

A mis compañeros de Maestría en Ecología Aplicada, por sus comentarios asertivos y el apoyo durante los tutoriales:

- M. en E. A. José Ángel Labastida Valerio
- Biól. Verónica Pacheco González
- Biól. Antony Daniel Muñiz Bravo
- Biól. José Luis Perea Ramírez

"Dímelo y lo olvidaré, muéstrame y lo recordaré, involúcrame y lo aprenderé."

Confucio

ÍNDICE

Resumen general	9
Capítulo I. Generalidades de los modelos de simulación. Información de las comunidades biológicas y aspectos hidrometeorológicos de la RBLP.	
I.1. Introducción	11
<i>I.1.1 Conceptos generales</i>	14
I.2. Objetivo general	17
I.3. Objetivos particulares	17
I.4. Métodos	17
<i>I.4.1. Área de estudio</i>	17
<i>I.4.2. Trabajo de gabinete</i>	19
<i>I.4.3. Metodología para desarrollar un modelo</i>	21
I.5. Resultados	23
<i>I.5.1. Comportamiento climático - meteorológico</i>	23
<i>I.5.2. Especies representativas</i>	26
<i>I.5.3. Esquema conceptual</i>	27
I.6. Discusión	28
<i>I.6.1. Variabilidad Ambiental</i>	28
<i>I.6.2. Relación entre las variables de estado</i> <i>y las funciones de fuerza</i>	29
I.7. Conclusiones	31

I.8. Bibliografía	32
-------------------	----

Capítulo II. Modelo diagramático.

II.1. Introducción	40
II.2. Objetivo general	43
II.3. Objetivos particulares	43
II.4. Métodos	43
<i>II.4.1. Análisis de datos</i>	43
II.5. Resultados	45
<i>II.5.1. Modelo diagramático</i>	45
II.6. Discusión	50
<i>II.6.1. Modelo diagramático</i>	50
<i>II.6.2. Estructura del sistema y Calidad de la energía</i>	50
<i>II.6.3. Principio de Máxima Potencia (Lotka, 1922)</i>	52
<i>II.6.4. Longitud de las tramas tróficas</i>	53
<i>II.6.5. Ciclo de Materia</i>	53
<i>II.6.6. Sistema termodinámico</i>	54
II.7. Conclusiones	54
II.8. Bibliografía	55

Capítulo III. Modelo computarizado

III.1. Introducción	60
III.2. Objetivo general	61

III.3. Objetivos particulares	61
III.4. Métodos	61
<i>III.4.1. Valores de inicio y ecuaciones de flujo</i>	61
<i>III.4.2. Modelo de simulación</i>	62
III.5. Resultados	63
<i>III.5.1. Variabilidad ambiental y ecuaciones polinómicas</i>	63
<i>III.5.2. Valores de inicio y ecuaciones de flujo</i>	63
<i>III.5.3. Modelo de simulación</i>	65
<i>III.5.4. Diagrama de fase</i>	73
<i>III.5.5. Aportación de biomasa al detritus</i>	73
<i>III.5.6. Situaciones de inestabilidad en el sistema de la RBLP</i>	75
III.6. Discusión	77
<i>III.6.1. Modelo de simulación</i>	77
<i>III.6.2. Variabilidad ambiental</i>	78
<i>III.6.3. Diagrama de fase</i>	79
<i>III.6.4. Aportación de biomasa hacia el detritus</i>	80
<i>III.6.5. Situaciones de inestabilidad en el sistema de la RBLP</i>	81
III.7. Conclusiones	84
III.8. Bibliografía	85

Capítulo IV. Metodología activa y la dinámica de sistemas como herramienta de aprendizaje.

IV.1. Introducción	92
--------------------	----

IV.2. Objetivo general	95
IV.3. Objetivos particulares	95
IV.4. Métodos	96
<i>IV.4.1. Manual operativo</i>	96
<i>IV.4.2. Taller teórico-práctico “Introducción al modelado de sistemas dinámicos mediante el software Stella”</i>	98
<i>IV.4.3. Material didáctico. Modelo de simulación de la Reserva de la Biósfera Los Petenes</i>	99
<i>IV.4.4. Evaluaciones del contenido, material didáctico y del modelo de simulación</i>	101
IV.5. Resultados	101
<i>IV.5.1. Taller teórico-práctico “Introducción al modelado de sistemas ecológicos mediante el software Stella”, Manual operativo y uso del material didáctico</i>	101
<i>IV.5.2. Evaluación del curso, material didáctico y del modelo de simulación</i>	110
IV.6. Discusión	116
<i>IV.6.1. Evaluación del taller, manual operativo y material didáctico. Contribución al aprendizaje de los asistentes.</i>	117
IV.7. Conclusiones	122
IV.8. Bibliografía	124
Anexos.	127

RESUMEN GENERAL

La presente Idónea Comunicación de Resultados (ICR) tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación que represente las principales variables de estado y funciones forzantes que condicionan dinámica ecosistémica de una red trófica acuática presente en la Reserva de la Biósfera Los Petenes (RBLP), Campeche, México. Este modelo fue pensado para introducir a los alumnos de la Licenciatura en Biología de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco al uso de herramientas de modelización y simulación de procesos ecológicos utilizando el software Stella, siguiendo las propuestas metodológicas de la literatura especializada

Este trabajo está dividido en cuatro capítulos: el **primero** abarca una revisión sistemática de literatura sobre conceptos y metodologías utilizadas para desarrollar modelos de simulación; así como la información de los grupos funcionales ecológicos y la variabilidad ambiental que representarán el sistema de una red trófica acuática. El **capítulo dos** aborda el modelo conceptual del sistema mediante el uso del lenguaje de circuitos de energía de Odum, describiendo la estructura y la dinámica de transferencia de energía de los principales grupos funcionales que forman parte de la red trófica. El **capítulo tres** se enfoca en el modelo de simulación mediante el software Stella versión 10.0.6. Se delimitó como escenario un ecosistema acuático costero, el cual está integrado por nueve grupos funcionales que considera la parte biológica donde se expresa la biomasa ($t/km^2/año$) de productores primarios: fitoplancton, pastos marinos, manglar de borde y detritus; consumidores primarios: un pez consumidor primario herbívoro y zooplancton; consumidores secundarios: un crustáceo y un pez consumidor secundario; y un consumidor terciario: un pez piscívoro. Por último, en el **capítulo cuatro** se presenta la descripción metodológica que hace uso del modelo de simulación de la RBLP como material didáctico junto a una metodología activa de aprendizaje y de pensamiento sistémico para ser presentado a los estudiantes mediante un taller denominado “Introducción al modelado de sistemas ecológicos

mediante el software Stella”. **Un entorno educativo óptimo para la modelización de sistemas dinámicos, el respaldo de un material didáctico, el uso del software Stella y métodos de participación activa, en suma, potencian la comprensión y la memorización de las ideas durante el aprendizaje de los nuevos usuarios en la instrucción de la modelización de sistemas ecológicos con el objetivo de examinar opciones de gestión que permitan su uso y preservación. Palabras clave: Modelo de simulación, Stella, trama trófica cuática.**

CAPITULO I.

Generalidades de los modelos de simulación. Información de las comunidades biológicas y aspectos hidrometeorológicos de la RBLP.

RESUMEN

Se realizó una revisión sistemática de literatura a partir de publicaciones académicas, libros, base de datos, repositorios, directorios y librerías electrónicas que aborden ejemplos sobre la dinámica y estructura de ecosistemas costeros haciendo énfasis en los componentes bióticos y abióticos. Se desarrolló un modelo conceptual, utilizando el lenguaje de caja-flecha, de un ecosistema acuático costero en la Reserva de la Biosfera Los Petenes. De igual forma, se recolectaron datos acerca de registros climáticos de varias fuentes de información para representar la variabilidad ambiental del modelo. Se consideró un periodo de tiempo del 2010 al 2021 para calcular promedios de variación mensual. Los resultados se integraron en una base de datos en Excel y se representan mediante gráficas. El desarrollo de la parte conceptual del modelo de simulación, desde el punto de vista holístico, facilitó la comprensión de los componentes que conforman un ecosistema acuático costero y cómo estos se vinculan con la variabilidad ambiental. En este contexto, el aprendizaje más significativo se produjo durante la construcción del modelo. Desarrollarlo requiere reconocer las conexiones entre los elementos del sistema.

Este procedimiento genera interrogantes que incentivan la búsqueda de respuestas, un proceso iterativo y heurístico.

ABSTRACT

A systematic literature review was conducted using academic publications, books, databases, repositories, directories and electronic libraries that address examples of the dynamics and structure of coastal ecosystems, emphasizing biotic and abiotic components. A conceptual model was developed, using the box-arrow language, of a coastal aquatic ecosystem in the Los Petenes Biosphere Reserve. Likewise, data on climate records from various sources of information were collected to represent the environmental variability of the model. A time period from 2010 to 2021 was considered to calculate average monthly variation. The results were integrated into an Excel database and represented using graphs. The development of the conceptual part of the simulation model, from a holistic point of view, facilitated the understanding of the components that make up a coastal aquatic ecosystem and how these are linked to environmental variability. In this context, the most significant learning occurred during the construction of the model. Developing it requires recognizing the connections between the elements of the system. This procedure generates questions that encourage the search for answers, an iterative and heuristic process.

I.1 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas son, por definición, sistemas complejos que combinan factores biológicos, climáticos y geológicos con factores sociales, políticos y económicos para generar una serie de procesos ambientales que determinan la evolución de cada uno de estos en el tiempo. Esto conlleva a que el estudio y la gestión de cualquier ecosistema sea un asunto complicado (Blanco, 2013). Una aproximación utilizada para analizar, comprender y predecir el funcionamiento de cualquier ecosistema en función de las variables que rigen su dinámica es el desarrollo de **modelos de simulación** (Hartig, 2017). El significativo progreso

alcanzado ha propiciado su inclusión en la educación universitaria en ciencias biológicas, donde se han notado beneficios para su aplicación en el estudio de sistemas dinámicos (Mayer, 2003). Sin embargo, algunos estudiantes presentan a menudo dificultades para entender el funcionamiento y utilidad de los modelos. La enseñanza de la modelización ecológica de forma exclusivamente teórica no es suficiente para transmitir al alumno el potencial real de esta aproximación metodológica, pues a través de esta obtienen un conocimiento factual del modelado ecológico, y en consecuencia tienden a no percibir los modelos como una estructura dinámica que representa la evolución temporal de un sistema real y complejo (Ithurralde, 2014).

El uso de computadoras y programas de creación de modelos permite a los estudiantes adquirir un conocimiento metódico de modelización, al brindarle la oportunidad de realizar actividades como el diseño de modelos conceptuales, el análisis de sensibilidad, la validación, entre otras, (Lytvynova, 2020), adquiriendo un ambiente de aprendizaje exploratorio basado en programas computacionales para la docencia de la modelización ecológica (An *et al*, 2022). Son numerosas las herramientas que permiten desarrollar modelos de dinámica de sistemas en disciplinas científicas. Entre estos, **Stella** (Systems Thinking, Experimental Learning Laboratory with Animation) es un lenguaje de programación visual que nace de la necesidad de ofrecer un ambiente sencillo y de fácil manejo, que posibilita al usuario una mayor interacción, modelando fenómenos a través de objetos dinámicos, imágenes o animaciones, modificar variables, formular hipótesis, crear experiencias, ejecutar medidas y examinar los resultados (De Leo *et al*, 2020).

Para muchos estudiantes de ciencias biológicas, uno de los sistemas que exhiben redes de interacciones complejas con numerosas interrelaciones y procesos que pueden resultar complicados de explicar mediante métodos convencionales son los ecosistemas costeros. Esto se debe a que son áreas de transición entre los elementos terrestres y marinos en la superficie terrestre (Crossland *et al*, 2006). Su entendimiento integral es de gran relevancia para las

nuevas generaciones de profesionistas. En México, específicamente el Golfo de México, es considerado una región de suma importancia por el potencial biológico y energético que posee (Rivera-Arriaga y Borges-Souza, 2008). La Península de Yucatán (Campeche, Yucatán y Quintana Roo) cuenta con 25 Áreas Naturales Protegidas, formando un continuo ambiental de geografía, clima, paisajes y biodiversidad. La **Reserva de la Biosfera Los Petenes (RBLP)** forma parte de una importante ecorregión, integrada por la Reserva de la Biosfera Ría Celestún y el Área Natural Protegida Estatal El Palmar. La RBLP es la única Reserva del Golfo y Caribe Mexicanos que presenta limitados asentamientos humanos dentro de la superficie decretada (CONANP, 2006). En estos ecosistemas se identifican cadenas tróficas conocidas usualmente como **cadena de pastoreo** y **cadena de detritus**. Dependiendo de su complejidad, ambas vías se presentan como redes al estar conectados cada uno de sus elementos por flujos energéticos donde usualmente existe más de una fuente energética externa (luz, mareas, oleaje). Toda esta diversidad de componentes estructurales ecosistémicos nos permite contemplar la complejidad de su funcionamiento. Además, comprenden interrelaciones igual de complejas entre los organismos y su entorno físico ambiental por medio de tramas tróficas y de interacciones ecológicas como depredación y competencia (Vega-Cendejas, 1998).

Los trabajos realizados sobre modelización de sistemas en la RBLP son mínimos. Para contribuir en la información acerca del estudio de sistemas dinámicos en la educación universitaria, se presenta el desarrollo de un modelo de simulación que describe la dinámica de un ecosistema acuático costero para ser utilizado como material de apoyo didáctico, dirigido a los alumnos de la Licenciatura en Biología, para guiarlos, como parte introductoria, a la modelización de sistemas bajo el enfoque sistémico. Con base en el análisis e interpretación de la literatura, el modelo representa una red trófica acuática donde se consideran los componentes estructurales bióticos y abióticos más característicos de la RBLP. Para tal efecto, se utiliza el programa computacional Stella versión 10.0.6. mostrando las diferentes etapas en el proceso de transferencia de biomasa y energía.

1.1.1 Conceptos generales

Para impartir este conocimiento a los estudiantes, es imprescindible considerar primero los conceptos y métodos empleados en la modelización de sistemas.

Una variante del **enfoque sistémico** se denomina **dinámica de sistemas** (DS) y se especializa en entender las causas del comportamiento de un problema (sistema) modelándolo matemáticamente como un conjunto de acumulaciones, actividades y ciclos de retroalimentación (Black, 2002; Luna Reyes, 2008). Esta variante se basa en el uso de modelos, simulación y análisis en el tiempo para explicar el comportamiento de los agentes de un sistema en una realidad compleja (Kay, 2006; Cadenas-Anaya y Guaita, 2020). Si se desea entender un sistema y poder predecir su conducta, es necesario estudiar el sistema como un todo, si el sistema es analizado en partes se destruyen las conexiones afectándose la naturaleza y comportamiento del propio sistema (Sherwood, 2002). Los modelos están contruidos con supuestos explícitos y las relaciones entre ellos se pueden ver en el modelado del sistema. La dinámica de sistemas combina el pensamiento sistémico y los modelos conceptuales con el avance del poder computacional en la actualidad (Jackson, 2000).

Un **modelo científico** es una representación abstracta, conceptual, gráfica o visual y física de fenómenos, sistemas o procesos a fin de analizar, describir, explicar y simular esos fenómenos. Se considera que la creación de un modelo es una parte esencial de toda actividad científica (Cartwright, 1983; Acevedo *et al*, 2017). La construcción de modelos se vuelve aún más necesaria si la mente humana ha de captar, comprender y generar hipótesis acerca del funcionamiento del sistema del que es una pequeña parte (Odum, 1983). Un **modelo de simulación** es un conjunto de ecuaciones que representa **variables y relaciones** entre componentes estructurales de un fenómeno del mundo real, cuyo objetivo es el de **mejorar el entendimiento sobre los sistemas** en estudio para probar teorías científicas,

predecir el resultado de una combinación de situaciones, o controlar el sistema estudiado, proporcionando indicios aproximados de su **comportamiento** bajo diferentes condiciones de manejo (Ortega *et al*, 1999; Pérez *et al.*, 2006)

De acuerdo con Hall y Day (1977), un **sistema** se define como cualquier fenómeno, ya sea estructural o funcional, que tiene al menos **dos componentes** separables y alguna **interacción** entre estos componentes. Es decir, un sistema posee elementos que interactúan entre sí en un determinado tiempo para funcionar como un todo. La palabra clave aquí es **interacción**. Si una parte tiene un efecto sobre el resto del sistema y el sistema como un todo tiene un efecto sobre esa parte, entonces se ha creado una **relación circular o bucle**.-Las **relaciones** subyacentes y **conexiones** entre los componentes de un sistema se le conoce como **estructura del sistema**. Por ejemplo, la estructura de un ecosistema se determina por las interacciones entre poblaciones, tasas de nacimiento y mortalidad, la productividad, las proporciones de alimento y otras variables específicas a un ecosistema en particular como son el hábitat y el ambiente (Acevedo *et al*, 2017). Esta estructura debe incluir las variables de mayor influencia en el sistema.

Enfoque Holístico y Enfoque Reduccionista

Es importante entender a los sistemas como objetos de estudio por sí mismos, con sus propias características, comportamientos y oportunidades para efectuar cambios y encontrar soluciones. El **enfoque holístico** de la **teoría de sistemas** es el más adecuado para entender los sistemas complejos. Mediante este estudio integral de un sistema y sus elementos, la identificación de las conexiones entre estos, y la exploración de la estructura de dichas interacciones, se pueden entender las características y el funcionamiento del sistema en su conjunto (Lara *et al*, 2021). En lugar de reducir un sistema complejo a sus componentes (**enfoque reduccionista**), debemos dar un paso atrás y observar los sistemas en su totalidad (Bertalanffy, 1986; Gigch, 2008). Cuando se habla de métodos experimentales bajo un **enfoque reduccionista**, significa que se aísla la causa y el efecto, simplificando un problema que de otro modo sería irremediablemente complejo (Viniegra, 2014).

No obstante, la comprensión y las soluciones a los grandes sistemas no se encuentran en relaciones causales simples y únicas.

Dos tipos de modelización

Al elaborar un modelo, es importante conocer los dos tipos de modelados (y modeladores) que existen: **analíticos** y **numéricos**. El **modelo analítico** se refiere a un conjunto de procedimientos para encontrar soluciones exactas a ecuaciones diferenciales u otro tipo de ecuaciones. Por otra parte, el **modelo numérico** es el proceso de colocar cualquier conjunto de ecuaciones en una computadora y explorar consecuencias (Chapra y Canale, 2002). En un modelo con este enfoque se deben generar las ecuaciones necesarias, garantizar que tengan solución y en el mejor de los casos que las soluciones sean únicas. Aunque ambos enfoques están, en teoría, dirigidos a aumentar la comprensión y predicción de los sistemas y sus componentes, en la práctica, los dos métodos generalmente se usan para preguntas completamente diferentes y usan enfoques matemáticos diferentes. Por lo que el método analítico no es especialmente útil en la construcción de modelos de ecosistemas debido a la necesidad de resolver simultáneamente docenas a cientos de ecuaciones, muchas de las cuales pueden ser no lineales (Hall y Day, 1977).

El grado de complejidad de un modelo ecológico depende del objetivo para el cual ha sido desarrollado (Kimmmins *et al*, 2008). Si el objetivo es explicar cómo funciona un ecosistema, se necesita una descripción específica de los procesos ecológicos y como están unidos entre sí. Esta es una fase importante del proceso de modelización: clarificar lo que es conocido y determinar qué aspectos se necesita más información. Un sistema es parte de una jerarquía de otros sistemas, por lo que es importante seleccionar y definir los niveles y límites espaciales, temporales y conceptuales. Definir límites es de alguna forma arbitrario, pues los ecosistemas generalmente comprenden todos los componentes de una unidad o paisaje con continuidad geográfica y geológica. En la práctica, los límites los define el investigador, así como todas las estructuras e interacciones de interés en el ecosistema (Cervantes-Sandoval *et al*, 2009)

I.2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la importancia de la variabilidad ambiental y de los grupos funcionales ecológicos que serán los representantes del modelo de simulación, así como las interacciones presentes en el sistema. El primer paso para efectuarlo es desarrollar un modelo conceptual con la información obtenida de la revisión sistemática de literatura.

I.3. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar los Grupos Funcionales Ecológicos y las funciones forzantes que serán parte de la estructura del sistema a desarrollar.
- Realizar gráficas de dispersión de la variación climática en la RBLP, a fin de obtener las ecuaciones necesarias para integrarlas al modelo de simulación.
- Desarrollar un modelo conceptual de la estructura del sistema.

I.4 MÉTODOS

I.4.1. Área de estudio

La Reserva de la Biosfera Los Petenes (Figura I.1.) es una larga y estrecha franja costera, con porciones terrestre y marina, llanura costera kárstica, con tierras bajas resultantes de procesos acumulativos y susceptibles a inundaciones, localizada en la zona costera norte del Estado de Campeche, en el sureste del Golfo de México. Queda comprendida entre los 20°51'30" y 19°49'00" de latitud norte y los 90°45'15" y 90°20'00" de longitud oeste. Tiene poco contraste en altitud, ya que no superan los 10 m y las pendientes son menores al 0.5% (Ayala-Pérez *et al*, 2016).

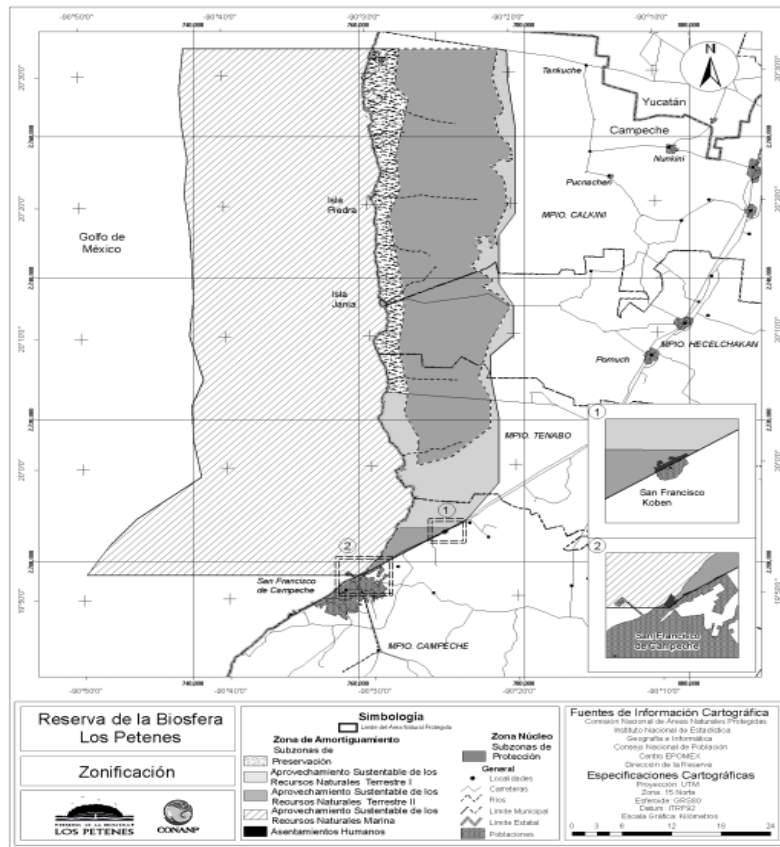


Figura I.1. Ubicación geográfica de la Reserva de la Biósfera los Petenes, sureste del Golfo de México (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2006)

Se identifican dos épocas climáticas para la región, la **época de secas**, que abarca de noviembre a abril y la época de lluvias, de mayo a octubre. Durante la época de secas, la temperatura y precipitación mensual promedio es de 25.5 ° C y 23 mm respectivamente y de 28.4 ° C y 139.9 mm para la **temporada de lluvias** (CONANP, 2006).

Cuenta con una alta diversidad de flora y fauna, entre los que destacan los petenes (pequeñas “islas” de vegetación arbórea, principalmente de selva mediana perennifolia y subperennifolia, así como de manglar, que se encuentran inmersas en zonas inundables amplias de tipo pantanoso) y áreas de **pastos marinos** de mayor extensión, tamaño y buen estado de conservación en todo el país; los **manglares de borde** y las múltiples especies de **peces** que representan la macrofauna acuática más abundante y diversa en la zona costero-marina de la

RBLP (Ayala-Pérez *et al*, 2008). Una característica relevante de los petenes es la presencia constante de agua dulce durante todo el año, dado que, en el núcleo de cada petén se ubica un manantial de agua dulce. En ocasiones, debido al azolvamiento, el agua se filtra a través de la roca y del suelo cargado de restos orgánicos, de manera que el manantial no se puede observar (Duran-García, 1995).

1.4.2. Trabajo de gabinete

Información de las comunidades biológicas y aspectos hidrometeorológicos.

Se realizó una revisión sistemática de literatura (RSL) a partir de publicaciones que aborden la dinámica y estructura de ecosistemas costeros, haciendo énfasis en los componentes bióticos como manglares, pastos marinos y las poblaciones de peces. Se acudió, en primera instancia, a motores de búsqueda de las principales páginas web de editoriales académicas, así como a Google Académico. La ventaja de buscar a través de esta página es que Google tiene gran capacidad de indexación accediendo a millones de resultados de forma instantánea. Además, para la recopilación de información de publicaciones académicas y libros, se accedió a base de datos, repositorios, directorios y librerías electrónicas públicas y privadas, como Redalyc. También se investigó en trabajos de grado y tesis doctorales alojados oportunamente en repositorios institucionales.

Se recabaron datos sobre registros climatológicos en diversas fuentes de información para representar a la variabilidad ambiental en el sistema, como el Servicio Meteorológico Nacional, Secretaría de Marina, cartas temáticas de la INEGI, la Comisión Nacional del Agua, el Instituto de Tecnología del Agua para la región de estudio. Se consideró un periodo del 2010 al 2021 para calcular promedios de variación mensual, el cual, permitirá observar el comportamiento climático en la RBLP. Los resultados se integraron en una base de datos en Excel y se representaron mediante gráficas.

Se utilizaron aplicaciones computacionales MARV09, para hacer pronósticos de mareas confiables en Cd. Del Carmen, Campeche (Figura I.2.); y ECOPATH WITH ECOSIM 6.6.7.17812 (Figura I.3.) con la intención de identificar y definir las variables de estado, así como los valores de inicio que serán integradas al modelo

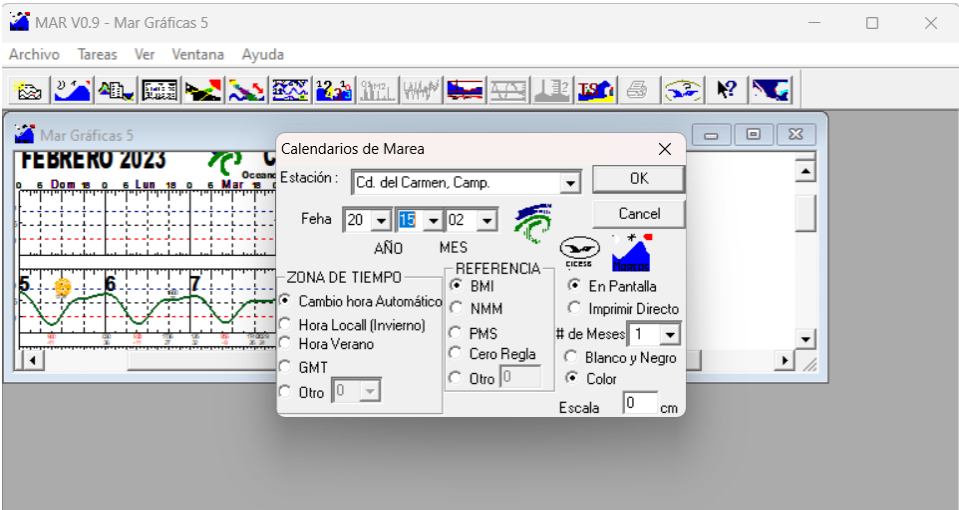


Figura I.2. Aplicación MARV09. Gracias al uso de esta herramienta, se obtuvieron datos y gráficas de mareas en Cd. Del Carmen Campeche en un periodo de tiempo del 2010 al 2021.

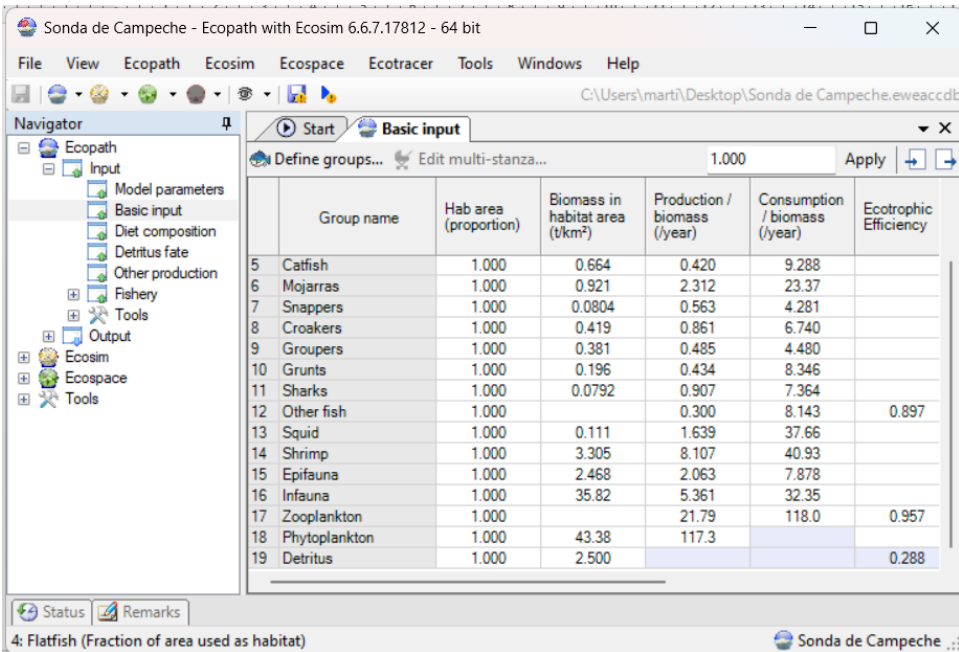


Figura 1.3. Interfaz de la aplicación ECOPATH WITH ECOSIM 6.6.7.17812. Se obtuvieron los datos sobre biomasa de diferentes especies, así como la eficiencia trófica dentro de la sonda de Cd. Del Carmen, Campeche (Vega- Cendejas *et al.*, 1993)

Se seleccionaron únicamente aquellos que aportaran definiciones, ejemplos prácticos o análisis de ecosistemas costeros.

1.4.3. Metodología para desarrollar un modelo.

La metodología empleada en este estudio es la sugerida por Hall y Day (1977) debido a su enfoque general. Se detalla a continuación:

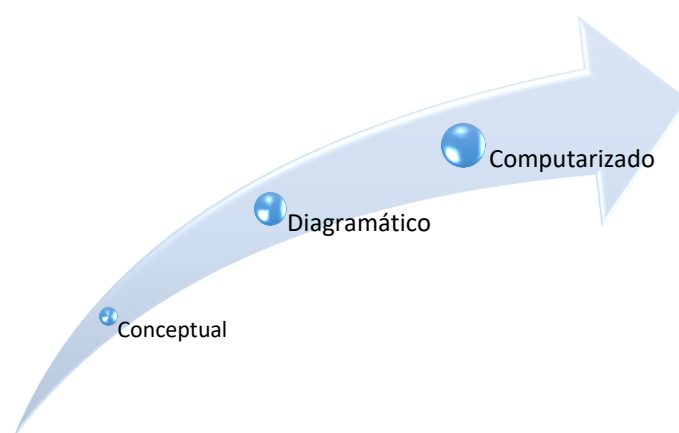


Figura 1.4. Metodología para desarrollar un modelo de simulación propuesta por Hall y Day (1977).

Modelo conceptual

Yáñez-Arancibia *et al.*, (2004), describen el concepto de **Grupos Funcionales Ecológicos** como la asociación de poblaciones de especies demersales de comportamiento similar, que desempeñan un papel análogo o función determinada en el ecosistema. Para este estudio se delimitó como escenario un ecosistema acuático costero, el cual está integrado por nueve grupos funcionales que considera la parte biológica donde se expresa la **biomasa** ($t/km^2/año$) de productores primarios: **fitoplancton, pastos marinos, manglar de borde y detritus**; consumidores primarios: **un pez herbívoro y zooplancton**; consumidores secundarios: **un crustáceo y un pez omnívoro**; y un consumidor terciario: **un pez piscívoro** que es el principal depredador. Las especies más

representativas se muestran en la Tabla I.1. Estos grupos funcionales son de gran interés por ser piezas clave en la estructura y dinámica de la comunidad; ya que forman parte importante de la regulación de los flujos de biomasa en el sistema estuario-plataforma y realizan un papel fundamental en el sostenimiento de la biodiversidad y los recursos. Las funciones forzantes que se seleccionaron son: **mareas, temperatura, precipitación y radiación solar**; las cuales representan la variabilidad ambiental del sistema.

De esta manera, se observará el papel que desempeña el detritus como productor primario en una red trófica que transporta biomasa y energía dentro y fuera de la RBLP. Entre los trabajos que sustentan la relevancia ecológica de estos componentes estructurales de la RBLP se encuentran: Santos y Uribe, (1997); Rabalais *et al*, (2002); Ayala-Pérez *et al*, (2008); Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega, (2010); Agraz-Hernández *et al*, (2012); Pérez-Espinosa *et al*, (2019). Muchos elementos estructurales bióticos y abióticos que pueden estar presentes en un ecosistema costero fueron omitidos para mantener el modelo sencillo de explicar.

Para ilustrar el sistema de la red trófica, se realizó un diagrama mediante el lenguaje de **caja-flecha** utilizado por DiToro *et al*, (1971)

Modelo diagramático

Se traza en papel o se desarrolla con programa computacional específico, un esquema que simboliza abstracciones de la naturaleza para comprender y manifestar la esencia de un sistema antes de trasladarlo a un programa de simulación. Para este trabajo se utilizó el lenguaje de circuitos de energía de Odum, (1983); el cual se detallará en el capítulo II de esta tesis.

Modelo computarizado

Para el desarrollo del modelo computarizado, se tomó como ejemplo el modelo realizado por Patonai y Fabian, (2022); que muestra una red trófica

acuática en el lago Balaton, Hungría. Este apartado se mostrará más detalladamente en el capítulo III.

I.5. RESULTADOS

I.5.1. Comportamiento climático - meteorológico temporal en la RBLP.

A partir de la información recabada del Servicio Meteorológico Nacional y de la aplicación MARV09, se llevó a cabo un promedio para elaborar los gráficos de dispersión. Se presenta la variación histórica de un periodo de tiempo del 2010 al 2021 en términos de temperatura, precipitación, mareas y radiación solar detectada en la estación climatológica: San Francisco de Campeche y Cd. Del Carmen, las cuales fueron consideradas por la cercanía a la Reserva de la Biósfera los Petenes.

De acuerdo con la CONANP (2006), el registro de la temperatura más alta se presenta en mayo con 30.1 °C (Figura I.5.), mientras que el mes con la temperatura más baja se observó en enero con 23.5 °C. En cuanto a precipitación (Figura I.6.), el promedio varía de 260.8 mm en junio a 18.9 mm en febrero.

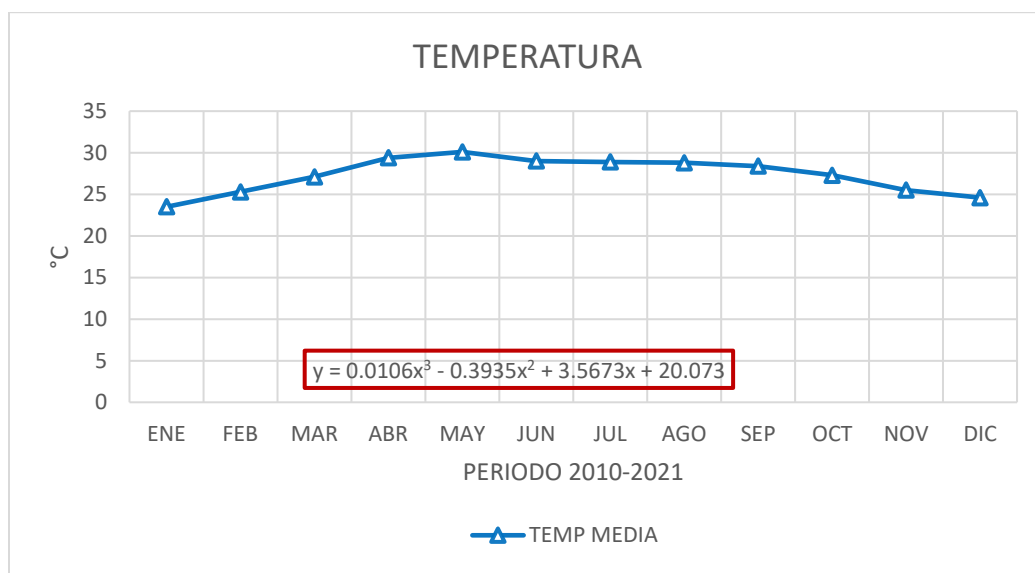


Figura I.5. Variación promedio anual de temperatura en la estación climatológica Campeche, Campeche a partir del 2010 al 2021. Se presenta la ecuación polinómica (rectángulo rojo) que se usará en Stella para simular su comportamiento.

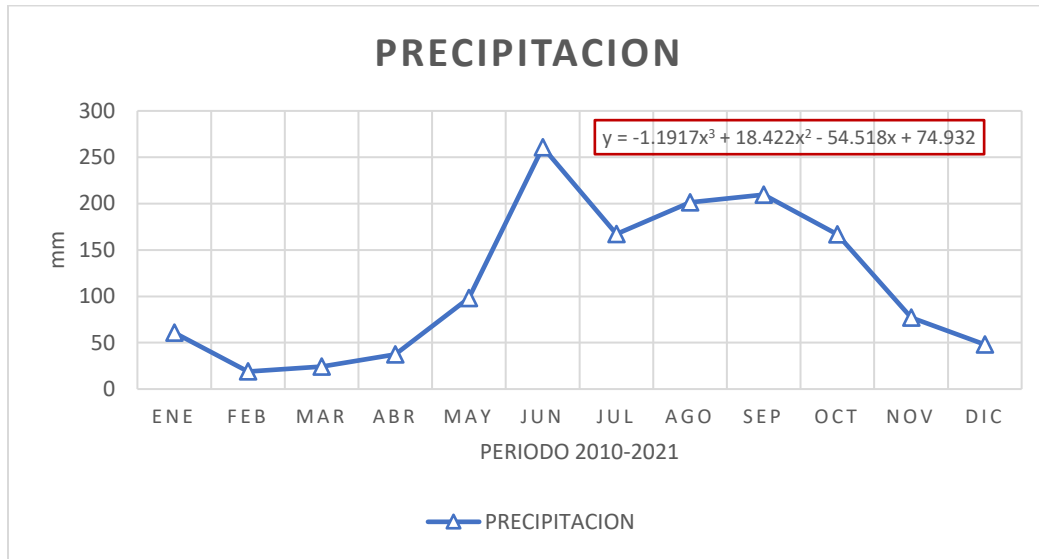


Figura I.6. Variación promedio anual de precipitación en la estación climatológica Campeche, Campeche a partir del 2010 al 2021. Se presenta la ecuación polinómica (rectángulo rojo) que se usará en Stella para simular su comportamiento.

Respecto a las mareas, el programa MARV09 presentó varios resultados. Se capturaron en Excel y se llevó a cabo una media para elaborar el gráfico de la Figura I.7. El mes en el que se registró la mayor altitud de las mareas (pleamar) fue octubre con 36 mm, mientras que la mínima altitud (bajamar) tuvo lugar en julio con 10.1 mm.

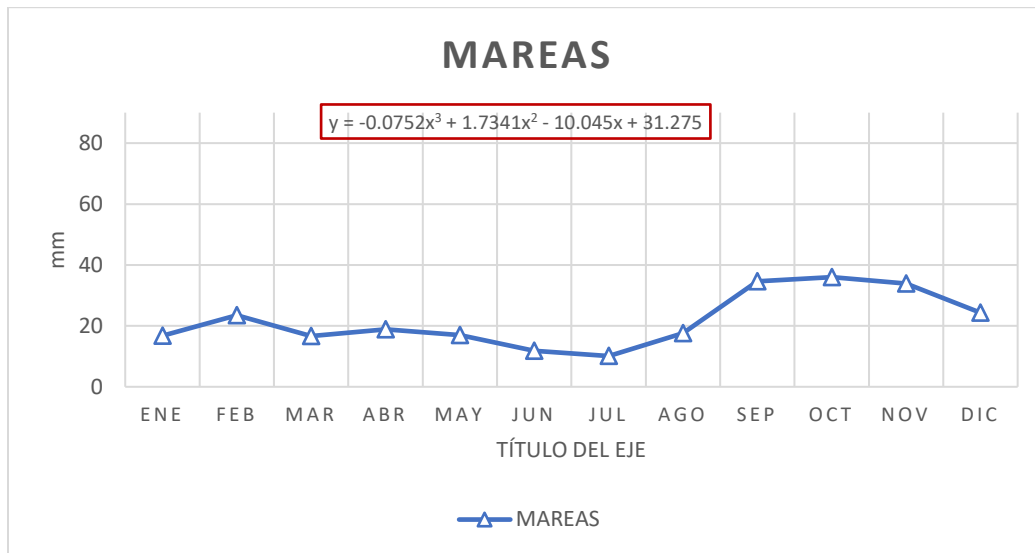


Figura I.7. Variación promedio anual de mareas en la estación climatológica Campeche, Campeche a partir del 2010 al 2021. Se presenta la ecuación polinómica (rectángulo rojo) que se usará en Stella para simular su comportamiento.

En la gráfica de radiación solar (Figura I.8.), los valores máximos se mostraron a partir de marzo, alcanzando su punto más alto en abril con 6.9 Kwh. Los valores disminuyen en mayo con 5.7 Kwh, manteniendo esta tendencia hasta el mes de enero.

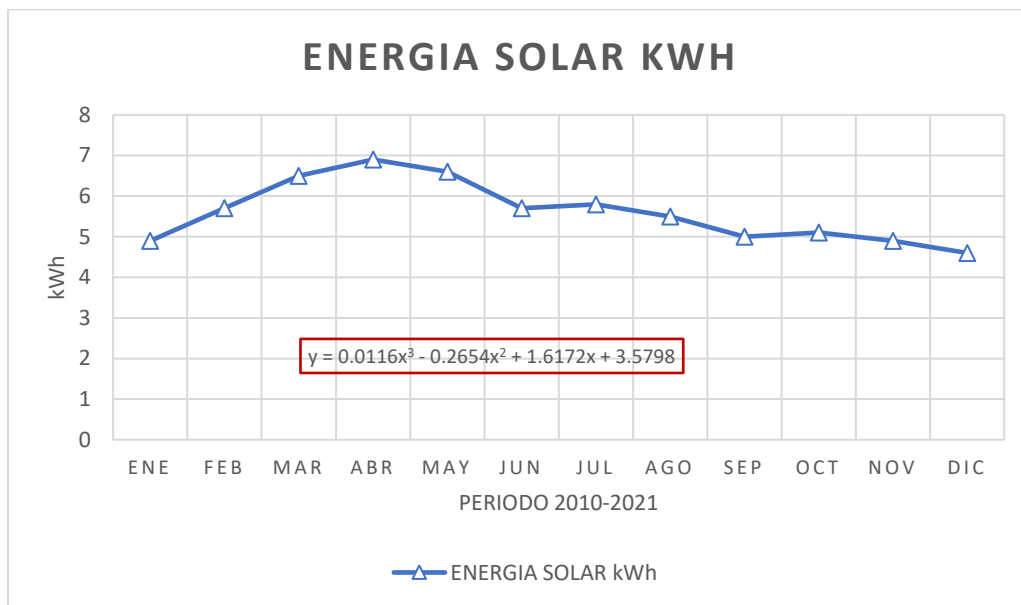


Figura I.8. Variación promedio anual de energía solar en la estación climatológica Campeche, Campeche a partir del 2010 al 2021. Se presenta la ecuación polinómica (rectángulo rojo) que se usará en Stella para simular su comportamiento.

I.5.2. Especies representativas.

La tabla I.1 muestra las especies más representativas que se encuentran en la RBLP.

Tabla I.1. Especies que conforman la red trófica del modelo en la RBLP.

Grupo ecológico funcional	Especie representativa en la RBLP	Referencias
Fitoplancton	Bacillariophyta	Pérez-Díaz, 1988
Pastos marinos	<i>Thalassia testudinum</i>	Pérez-Espinosa <i>et al</i> , 2019
Manglar de borde	<i>Rizophora mangle</i>	Trejo <i>et al</i> , 1993
Crustáceo	<i>Farfantepenaeus duorarum</i>	Santos y Uribe, 1997
Pez 1° herbívoro	<i>Sparisoma radians</i>	Dromard <i>et al</i> , 2016
Pez 2° omnívoro	<i>Haemulon plumierii</i>	Toro-Ramírez <i>et al</i> , 2017

I.5.3. Esquema conceptual.

La Figura I.9 se presenta la estructura inicial de la red trófica acuática en el ecosistema costero.

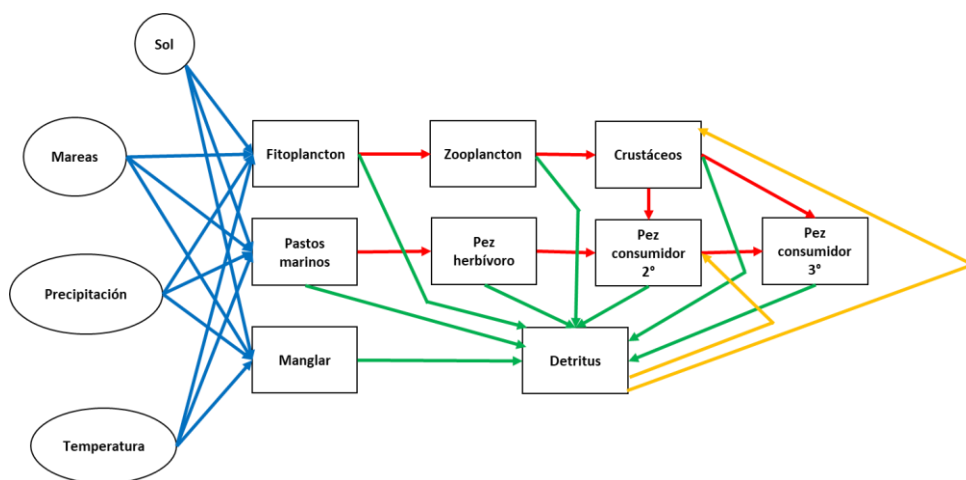


Figura I.9. Diagrama conceptual inicial de la trama trófica acuática utilizando el lenguaje de caja-flecha.

Tanto los productores primarios (fitoplancton, pastos marinos, manglar y detritus) como los consumidores (zooplancton, crustáceos, pez consumidor 1°, pez consumidor 2° y pez consumidor 3°) son representados en cajas rectangulares. Las entradas a un compartimiento desde el exterior del sistema de estudio se conocen como **funciones forzantes**, las cuales se representaron como óvalos localizados en la parte izquierda del diagrama, las flechas marcadas en azul que salen de estos representan la fuerza motriz, calorífica y energética respectivamente de las variables ambientales que modifican la producción de los productores primarios. Las flechas marcadas en rojo representan el movimiento o flujo de energía y biomasa de la cadena de pastoreo durante el proceso de alimentación. Las flechas marcadas en verde muestran a cada una de las variables (productores y

consumidores) conectadas directamente al detritus, que aportan biomasa en descomposición. Por último, las flechas marcadas en amarillo simbolizan el consumo de detritus por ciertos organismos omnívoros, es decir, la cadena de detritus.

I.6. DISCUSIÓN

Para orientar a los estudiantes de ciencias biológicas como nuevos usuarios en la modelización de sistemas; es necesario como primer paso, describir holísticamente la estructura y funcionamiento del sistema que se desea representar. El desarrollo y conocimiento sobre la dinámica de sistemas efectuado en este trabajo permitió delimitar el sistema de interés, categorizar los componentes estructurales importantes del sistema, identificar la forma de cómo estas partes se interconectan y representar el modelo conceptual de manera gráfica.

El ecosistema acuático del modelo forma parte de un sistema más grande, por lo que fue necesario analizar detalladamente cada factor biótico y abiótico que se desea mostrar. En este contexto, el aprendizaje más significativo se produjo durante el desarrollo del modelo. Construirlo requiere reconocer las conexiones entre los elementos del sistema, determinando cuáles son las conexiones, qué elementos se comprenden y cuáles requieren más detalles. Es decir, este proceso genera preguntas y estas motivan la búsqueda de respuestas, un proceso iterativo y heurístico. Esto significa que incluso, si no es posible encontrar todos los datos que se necesita para hacer un modelo, aún es posible aprender mucho sobre el sistema del mundo real en el que se está trabajando.

I.6.1. Variabilidad Ambiental

Se definen tres épocas climáticas: **secas**, que abarcan de noviembre a abril (Figura I.4.) y **lluvias**, que van de mayo a octubre (Figura I.5.) de acuerdo con lo reportado por CONANP (2006). La Reserva de la Biosfera Los Petenes es la zona con la mayor extensión de vegetación acuática sumergida del país (Mijangos, 2018) y está sujeta a una dinámica donde se denota la importancia de las

temporadas de lluvias y **nortes**, ya que hay un aumento en las descargas dulceacuícolas debido a que, a partir del mes de mayo, aumentan significativamente las precipitaciones (CONAGUA, 2018). Los resultados del comportamiento de la variable ambiental de los registros meteorológicos reflejan el marco ambiental de la zona de estudio y permiten argumentar la dinámica y las interacciones existentes de los elementos bióticos junto a su medio que se presenta en la zona.

1.6.2. Modelo conceptual. Relación entre las variables de estado y las funciones de fuerza

Los organismos presentes en estos ecosistemas se ven influenciados a partir de las condiciones climáticas (Espinosa *et al*, 2001). Gracias a esta interacción, la energía solar fluye a través del sistema océano-atmósfera-tierra y se distribuye en los diversos compartimientos de este sistema dinámico (Ayala-Pérez, 2015). Esto permite el desarrollo de los organismos en el ecosistema costero de la RBLP, que buscan satisfacer sus requerimientos energéticos en las distintas fuentes orgánicas disponibles, de las cuales destacan: manglar, fitoplancton, pastos marinos y sedimentos ricos en materia orgánica. La composición y disponibilidad de las fuentes orgánicas influye significativamente en la biodiversidad resultante en un ecosistema (Canuel *et al*, 2007)

Conocer las fuentes energéticas primarias y de su transferencia a la estructura trófica es central para el entendimiento de la dinámica y persistencia de las comunidades en la escala temporal (Martineau *et al*, 2004). De tal manera que la variabilidad de las principales fuentes orgánicas (manglar, pastos marinos y fitoplancton) determinarían el tipo de biota (como la ictiofauna) que predominaría en el espacio y en el tiempo. De igual manera, la caracterización geoquímica de las fuentes de carbono y nitrógeno de los productores primarios (Aguíñiga, 1999; Aguíñiga *et al*, 2010), es de gran importancia para identificar su origen y transferencia dentro de las redes tróficas, así como sus efectos en la biodiversidad y en los ecosistemas costeros.

En la figura I.9. se observa que la biomasa proveniente de pastos marinos, manglar de borde, fitoplancton y de todos los consumidores que mueren por causa natural entran a la capa de detritus, donde los microorganismos, como bacterias y hongos, tienen un papel importante en la descomposición y mineralización de residuos (Kuehn *et al*, 2000). Los pastos marinos y manglares representan ambientes particulares de elevada productividad que ofrecen condiciones adecuadas para el desarrollo de todo o parte del ciclo de vida de múltiples especies, especialmente peces (Lara-Domínguez y Yáñez-Arancibia 1999). El fitoplancton ocupa el lugar base de la cadena trófica tradicional. Comprende la mayor porción de organismos productores primarios del océano y es el alimento básico para los consumidores. Al igual que los pastos marinos y manglar, el fitoplancton es un actor relevante en la captura de carbono, al encargarse de fijar el CO₂ atmosférico. Parte del exceso de CO₂ que hay en la atmósfera entra en la red trófica del océano gracias al fitoplancton, de tal manera, que al ser este el primer eslabón y considerando que todos los organismos están compuestos por carbono, la red comienza a funcionar hasta llegar a los organismos más grandes (López *et al*, 2016).

A través de su estructura, el modelo conceptual permitió recopilar y facilitar la información necesaria para comprender el sistema desde un enfoque ecosistémico. Es importante señalar que las fallas en los modelos ecológicos pueden ser el resultado de un modelo conceptual incompleto o malentendido, así como de una formulación incorrecta. Por tal motivo, uno de los puntos críticos es reunir información correcta para poder estructurar el modelo (Christensen *et al*, 2005). Sin embargo, muchas veces la falta de esta es una limitante al momento de incluir y formar los elementos estructurales que serán incluidos en el sistema.

Por otro lado, el lenguaje utilizado en la modelización de sistemas puede resultar complicado para aquellos que se inicien en el tema. Es importante tener manuales de usuario que incluyan información necesaria para mejorar la comprensión y el aprendizaje de los usuarios durante la realización de modelos de simulación.

I.7. CONCLUSIONES

- La modelización de ecosistemas es una sucesión de aprendizaje, con procesos de retroalimentación (iterativos y heurísticos), que en cada paso se debe construir, revisar, comparar y cambiar el modelo, hasta llegar a una versión final. En cada ciclo se entiende mejor la realidad del estudio
- Al elaborar un modelo es importante identificar los procesos y variables claves para generar una versión abstracta de eventos reales. En particular, se deben esquematizar las relaciones entre variables, estableciendo así la estructura del modelo
- En el campo de la biología y ecología, la modelización resulta imprescindible para comprender los procesos naturales, dado que su complejidad suele ser agobiante. Los modelos generados se deben revisar frecuentemente y comparar con las condiciones del mundo real, para asegurar que su representación es adecuada o que la forma en que se está abordando el proceso no es la más indicada.
- El desarrollo de la parte conceptual en el modelo de simulación permitió comprender los elementos que integran un ecosistema acuático costero y la manera en que estos se interconectan junto a la variabilidad ambiental. También permitió la simplificación y la identificación de las variables más importantes para modelar la dinámica del flujo de materia y energía en una red trófica acuática.
- La Reserva de la Biósfera Los Petenes es un sistema ecológico complejo y dinámico que se caracteriza por una estructura diversa donde los manglares de borde, los pastos marinos y los peces constituyen los elementos más conspicuos. Además, muestra un comportamiento ambiental determinado tanto por la variabilidad climática regional, la frecuencia e intensidad de eventos “Norte” así como por la estructura de hábitat que tienen un efecto sobre la dinámica ecológica

- Uno de los objetivos de la modelización es adquirir habilidades de pensamiento crítico y una metodología para abordar problemas complejos, donde el proceso de modelación es una actividad continua que debe fortalecer el juicio humano.

I.7. BIBLIOGRAFIA

- Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M. M., Oliva-Martínez, J. M. (2017). Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. *Revista Científica*, 30(3), 155-166. <https://doi.org/10.14483/23448350.12288>.
- Aguíñiga García, S. (1999). Geoquímica de la cuenca estuarina del río Colorado: $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y biomarcadores lipídicos en sedimentos superficiales. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Marinas. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, B. C.
- Aguíñiga García, S., Sánchez A., Silverberg, N. (2010). Temporal variations of C, N, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$ in organic matter collected by a sediment trap at Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, SW Gulf of California. *Continental Shelf Research*. 30 (15).
- Agraz Hernández, C. M., Osti Sáenz, J., Chan Keb, C. A., Chan Canul, E., Gómez Ramírez, D., Requena Pavón, G., Reyes Castellanos J. E. (2012). Programa regional para la caracterización y el monitoreo de ecosistemas de manglar del Golfo de México y Caribe Mexicano: Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México. Informe Final SNIB-CONABIO. Proyecto FN010. México, D.F.
- An, S., Bates, R., Rugaber, S., Hammock, J., Weigel, E., Goel, A. K. (2022). Cognitive assistance for inquiry-based modeling. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2209.02576>.
- Ayala Pérez, L. A., Ramos Miranda, J., Flores Hernández, D., Vega Rodríguez, B. I., Moreno Medina, U. C. (2008). Biological and ecological

- characterization of the catfish *Cathorops melanopus* (Gunther 1864) off the coast of Campeche, Mexico. *Cienc. Mar.* 34: 453-465 pp.
- Ayala Pérez, L. A. (2015). Cuarto Simposio de la Red para el conocimiento de los recursos costeros del sureste, Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. NU007, México D.F.
 - Ayala Pérez, L. A., Sosa López, A., Terán González, G. J., Vasco Villa, O. (2016). Peces costeros de la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), México, 170 p.
 - Bertalanffy, L.V. (1986). Teoría general de los sistemas. Fondo de Cultura Económica, México. 311 p.
 - Black, L. J. (2002). Collaborating across boundaries: Theoretical, empirical, and simulated explorations. Cambridge, MA, MIT. Sloan School of Management.
 - Blanco, J.A. (2013). Modelos ecológicos: descripción, explicación y predicción. *Ecosistemas* 22(3):1-5 pp.
 - Cadenas Anaya, C. R., Guaita, W. (2020). Dinámica de sistemas: Una metodología para la construcción de modelos de toma de decisiones en sectores agroindustriales. Editorial Politécnico Grancolombiano.
 - Canuel, E., Spivak, A., Waterson, E., Duffy, J. (2007). Biodiversity and Food Web Structure Influence Short-Term Accumulation of Sediment Organic Matter in an Experimental Seagrass System. *Limnology and Oceanography* 52(2): 590-602 pp.
 - Cartwright, N. (1983). 'Introduction', How the Laws of Physics Lie. Oxford. Online edn. Oxford Academic.
 - Cervantes, S. A., Chiappa, C. X., Días, M. N. (2009). Stella©, software para modelación dinámica en Biología. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de México. Recuperado el 14 de diciembre de 2022. Website: http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/Manuales_files/PA_PIME_Manual_Stella.pdf

- Chapra, C. S., Canale, P. R., (2002). Métodos Numéricos para Ingenieros. Con programas de aplicación. McGraw-Hill Internacional, México. 703-759 pp.
- Christensen, V., Walter, C. J., Pauly, D. (2005). Ecopath with Ecosim: a User's Guide. Fisheries Centre, University of British Columbia. Vancouver, 154 p.
- CONANP. (2006). Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biosfera Los Petenes Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.
- CONAGUA. (2018). Reporte del clima en México. Comisión Nacional del agua, México
- Crossland, C., Baird, D., Ducrotoy, J. P., Lindeboom, H., Buddemeier, R., Dennison, W., Maxwell, B., Smith, S., Swaney, D. (2006). The Coastal Zone - a Domain of Global Interactions. In: Crossland, C.J., Kremer, H.H., Lindeboom, H.J., Marshall Crossland, J.I., Le Tissier, M.D.A. (eds) Coastal Fluxes in the Anthropocene. Global Change — The IGBP Series. Springer, Berlin, Heidelberg.
- De Leo, E., Aranda, D., Addati, G. A. (2020). Introducción a la dinámica de sistemas (Serie Documentos de Trabajo No. 739). Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA).
- DiToro, D.M., O'Connor, D.J., Thomann, R.V. (1971). A dynamic model of the phytoplankton populations in the Sacramento-San Joaquin Delta. Adv. Chem. Ser., 106: 131-180.
- Dromard, C., Vaslet, A., Gautier, F., Bouchon Navaro, Y., Harmelin, M., Bouchon, C. (2016). Resource use by three juvenile scarids (*Cryptotomus roseus*, *Scarus iseri*, *Sparisoma radians*) in Caribbean seagrass beds. Aquatic Botany.
- Espinosa, D., Aguilar, C., Escalante, T. (2001). Endemismo, áreas de endemismo y regionalización biogeográfica. In Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones,

- J. Llorente y J. J. Morrone (eds.). Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM, México, D. F. 31-37 pp.
- Hall, C., Day Jr, J. W. (1977). Systems and Models: Terms and Basic Principles. In: Hall and Day Jr. Ecosystem Modelling. John Wiley and Sons. N.Y. 684 p.
 - Hartig, Florian (2017). Simulation Modeling. obo in Ecology. doi: 10.1093/obo/9780199830060-0189
 - Ithurralde, S. (2014). Entre modelos y modelizaciones: El ser vivo desde el nivel inicial. Quehacer Educativo, 24. Recuperado de https://www.fumtep.edu.uy/editorial/item/download/931_0d57363040e4e835061069d601adf140
 - Jackson, M. (2000). Systems Approaches to Management. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
 - Kay, A. (2006). The dynamics of public policy: theory and evidence. Cheltenham, United Kingdom.
 - Kimmins, J.P., Blanco, J. A., Seely, B., Welham, C., Scoullar, K. (2008). Complexity in modelling forest ecosystems. How much is enough? Ecology and Management 256: 1646-1658 pp
 - Kuehn, K. A., Lemke, M. J., Suberkropp K., Wetzel, R. G. (2000). Microbial biomass and production associated with decaying leaf litter of the emergent macrophyte *Juncus effusus*. Limnological Oceanographic, 45: 862-870 pp.
 - Lara-Rosano, F. J., Gallardo Cano, A., Almanza Márquez, S. (2017). Teorías, métodos y modelos para la complejidad social: Un enfoque de sistemas complejos adaptativos. Colofón; UNAM; Conacyt.
 - Luna Reyes, L. F. (2008). System Dynamics to Understand Public Information Technology. In G. D. G. y. M. Khosrow-Pour (ed.), Handbook of Research on Public Information. Technology Hershey, PA: Idea-Group Publishing, 476-492 pp.
 - López-Sánchez, A., Luque-Badillo, A., Orozco-Nunnelly, D., Alencastro-Larios, N., Ruiz-Gómez, J., García-Cayuela, T., Gradilla-Hernández, M.

- (2016). Fitoplancton: pequeños centinelas del océano. Revista Ciencia, 1, 1-2. Recuperado de <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/FitoPlancton.pdf>
- Lytvynova, S. H. (2019). The model of the use of computer modeling system for formation competences of natural and mathematical subject students. Physical and Mathematical Education, 1(19), 108-115. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2019-019-1-017>.
 - Martineau, C., Vincent, W. F., Frenette, J. J., Dodson, J. J. (2004). Primary consumers and particulate organic matter: isotopic evidence of strong selectivity in the estuarine transition zone. Limn. Ocean., 49:1679-1686 pp.
 - Mayer, R.E. (2003). The promise of multimedia learning: using the same instructional design methods across different media. Learning and Instruction, 13: 125-139 pp.
 - Mijangos, H. I. A., (2018). Análisis de la productividad de *Thalassia testudinum* Banks ex Kôenig y su relación con los factores ambientales de la Reserva de la Biósfera los Petenes, Campeche. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México.
 - Odum, H. T. (1983). Systems Ecology: and Introduction. John Wiley. New York, 644 p.
 - Ortega, J. F., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Merino, R., Valiente, M. (1999). Modelo de optimización económica del manejo del agua de riego en las explotaciones agrícolas: aplicación de la agricultura de regadío de la provincia de Toledo. Invest. Agricultura y Producción Vegetal, 14: 325-354 pp.
 - Patonai, K., Fábíán, V.A. (2022). Comparison of three modelling frameworks for aquatic ecosystems: practical aspects and applicability. Community Ecology 23: 439–451 pp.
 - Pérez Díaz, E. P. (1988). Contribución al conocimiento de la composición y ciclo estacional del plancton marino de la costa de Campeche, México. Tesis licenciatura, Facultad de Biología, Univ. Ver., Jalapa, Ver. México, 56.

- Pérez, M. O., Delfin, C., Fregoso, A., Cotler, H. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78: 6584 pp.
- Pérez Espinosa, I., Gallegos Martínez, M. E., Ressler, R., Valderrama Landeros, L. H., Hernández Cárdenas, G. (2019). Distribución espacial de la vegetación acuática sumergida en los Petenes, Campeche. *Terra Digitalis*. 3(2).
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., Wiseman, W. J. (2002). Gulf of Mexico Hypoxia, a.k.a. "The Dead Zone." *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33: 235–263 pp.
- Rivera, A. E., Borges, S. G. (2008). El gran ecosistema marino del Golfo de México. *Perspectivas para su manejo*. Jaina Boletín informativo, 16:30-48 pp.
- Santos, J., Uribe, J.A. (1997). Composición y abundancia de camarón rosado en aguas estuarino-costeras de Champotón e Isla Arena, Campeche, durante 1994. CRIP Lerma, Campeche, Informe Técnico del INP.
- Sherwood, D. (2002). *Seeing the Forest for the Trees: A Manager's Guide to Applying Systems Thinking*. London. Recuperado el 28 de agosto de 2023. Website: https://www.academia.edu/17748878/Seeing_the_forest_for_the_trees
- Terán González, G. J., Ayala Pérez, L. A., Reyes, E., Vega Rodríguez, B. I. (2016). Recursos pesqueros de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche: Un modelo de simulación. *Revista digital E-BIOS*, 4(11): 73-93 pp.
- Toro Ramírez, A., Sosa López, A., Ayala Pérez, L.A., Pech D., Hinojosa Garro, D., Del Río Rodríguez, R. (2017). Abundancia y diversidad de la ictiofauna en la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche, México: asociaciones con los ciclos nictimerales y las épocas climáticas. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(2): 1-11 pp.
- Trejo Torres, J., Durán, R., Olmsted, I. (1993). Manglares de la Península de Yucatán. 660-672 pp. En: Salazar Vallejo y González (eds)

Biodiversidad marina y costera de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Aprovechamiento de la Biodiversidad (CONABIO, CIQRO) México, 865 p.

- Vega Cendejas, M. E., Arreguín Sánchez, F., Hernández, M. (1993). Trophic fluxes on the Campeche Bank, Mexico. 206-213 pp. En Christensen V., Pauly D., Christensen V., Pauly D., Christensen V., Pauly D.
- Vega Cendejas, M. E. (1998). Trama trófica de la comunidad neotónica asociada al ecosistema de manglar en el litoral norte de Yucatán. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Villalobos Zapata, G. J., Mendoza Vega, J. (Coord.), (2010). La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. 730 p.
- Viniegra, L. (2014). El reduccionismo científico y el control de las conciencias. Parte I. Boletín Médico de Hospital Infantil de México, 71(4): 252-257 pp.
- Yáñez-Arancibia, A., Sánchez-Gil, P., Tapia García, M., de la C. García-Abad, M. (2004). Ecología, estructura de la comunidad y evaluación de peces demersales tropicales en el Golfo de México Sur. Revista de Biología Tropical, 52(3), 1-28. <https://doi.org/10.15517/rbt.v52i3.12988>.

CAPITULO II.

Modelo diagramático.

RESUMEN

Este capítulo expone el siguiente paso para desarrollar un modelo de simulación. Se llevó a cabo un modelo diagramático utilizando el lenguaje de circuitos de energía, tomando como base el modelo diagramático presentado en el capítulo I. Se describe la estructura y la dinámica de transferencia de energía de los principales grupos funcionales que forman parte de la red trófica en la RBLP. Observar la vía de los flujos energéticos entre los diferentes niveles y la eficiencia con la cual la energía es asimilada, transferida y disipada, provee un conocimiento significativo sobre la estructura y función de los ecosistemas. Los resultados muestran que el todo en un sistema se vuelve más que la suma de las partes cuando hay interacciones. Fortaleció de manera práctica al conocimiento acerca de las conexiones existentes entre las partes productoras y consumidoras de la red trófica, sobre el flujo de la energía, el reciclaje de materiales y el uso del almacenaje para condicionar los procesos de producción de las variables de estado. Así mismo, el lenguaje de circuitos de energía facilitó la capacidad de expresar la primera y segunda ley de la termodinámica, así como la retroalimentación y, finalmente, el refuerzo de máxima potencia.

ABSTRACT

This chapter presents the second step in developing a simulation model. A diagrammatic model was developed using the language of energy circuits, based on the diagrammatic model presented in Chapter I. The structure and dynamics of biomass and energy transfer of the main functional groups that form part of the food web in the RBLP are described. Observing the path of energy flows between the different levels and the efficiency with which energy is assimilated, transferred and dissipated provides significant knowledge about the structure and function of ecosystems. The results show that the whole in a system becomes more than the

sum of its parts when there are interactions. It practically strengthened the knowledge about the existing connections between the producing and consuming parts of the food web, about the flow of energy, the recycling of materials and the use of storage to condition the production processes of the state variables. Likewise, the language of power circuits facilitated the ability to express the first and second laws of thermodynamics, as well as feedback and, ultimately, maximum power boost.

II.1. INTRODUCCIÓN

Una vez que se ha establecido la necesidad de desarrollar y comprender un sistema de interés, la ruta operativa para representar el campo conceptual es desarrollar un **modelo diagramático**, conforme a lo sugerido por Hall y Day (1977). Esta etapa, en conjunto con la parte **conceptual**, constituyen una de las fases de mayor relevancia al desarrollar modelos de simulación. La utilización de los diagramas es ampliamente utilizada en las ciencias en general, a pesar de que pueda parecer una simple representación visual de la forma del objeto que se pretende analizar. Los modelos diagramáticos buscan representar **funciones y relaciones** (Ilário y Paixão, 2018).

Uno de los conflictos que surgen a los principiantes en la modelización de sistemas es cómo convertir las observaciones y conceptos adquiridos anteriormente sobre un sistema a una representación gráfica que lo describa, sin la confusión semántica de usar solo palabras. Para ello, el **lenguaje de circuitos de energía de Odum** es uno de los enfoques tradicionales más empleados como herramienta para explicar y modelar la estructura y funcionamiento de un sistema, siendo congruentes con las **leyes de la termodinámica**. Emplea diagramas que organizan los procesos que se están considerando, uniendo una serie de módulos que representan procesos de un sistema. Además, están conectados por líneas que indican las vías de transferencias de energía, materia o información (Odum, 1983). La ventaja de utilizar este lenguaje es que se puede representar por medio de un programa computacional. Otra característica importante es que los diagramas son

directamente convertibles a funciones matemáticas exactas, así, **a cada variable de estado le corresponde una ecuación de diferencia** de tipo:

$$Q_{t2} = Q_{t1} + \sum_{i=1}^b J_i$$

Donde la cantidad **Q**, al tiempo **t2** es igual a su cantidad en el tiempo **t1** más todos los flujos **J_i** durante el intervalo de tiempo **t1 - t2**. Esta ecuación expresa un cambio, una **diferencia**, que ocurre durante una unidad de tiempo bajo ciertas condiciones. El signo de cada flujo individual **J_i** es clave. Los flujos entrantes (*inputs*) tienen signo positivo (**J_i > 0**) y aumentan el valor de **Q**. Los flujos salientes (*outputs*) tienen signo negativo (**J_i < 0**) y reducen **Q**.

Las cantidades que se observan pueden fluctuar, razón por la cual, se trazan gráficos de las cantidades a través del tiempo. Estas variables se denominan **variables de estado**, ya que describen el estado del sistema mientras varía (Odum, 1983). Así, un sistema está en un estado de transición.

Así mismo, existen dos principales enfoques que complementan el análisis de la estructura de las comunidades y ecosistemas. Uno, son las **redes tróficas**, las cuales simbolizan las interacciones entre depredador y presa, es decir, quién se nutre de quién (Trifonova *et al*, 2015). Las tasas de movimiento de materia o biomasa entre factores descritos por variables de estado son llamados **tasas de flujo**. Por ejemplo, la depredación es un flujo de energía y materia entre dos componentes de un sistema ecológico, un depredador y su presa (Shoemaker, 1977). Dos, el **ciclo de materia y energía**, que es generalmente considerado como un proceso importante en la función del ecosistema (Odum, 1970), el cual contribuye a su conducta autónoma. Observar la vía de los flujos energéticos entre los diferentes niveles y la eficiencia con la cual la energía es asimilada, transferida y disipada, provee un conocimiento significativo sobre la estructura y función de los ecosistemas (Ulanowicz, 1986), los cuales son descritos por Margalef (1983) y Alcívar-Cuello (2003) como **sistemas cibernéticos**, retroalimentados por

elementos unidos entre sí a través de fuerzas recíprocas, es decir, la **ciencia del control y la regulación**.

En una red trófica, solo el 10% de la energía media se puede aprovechar por los organismos del siguiente nivel trófico, a esto se le conoce como **Ley del diez por ciento** (Carabias *et al*, 2009). Gracias a los estudios de los aspectos trofodinámicos de la ecología, es posible visualizar el flujo de energía a través de los niveles de un ecosistema (Odum, 1968). Se consideró que se debe tener en cuenta cómo fluye, así como la **primera y segunda ley de la termodinámica** (Lindeman, 1942). Parte de la energía recibida (solar) se pierde por la reflectancia de las plantas, y también se pierde como calor gastado en el metabolismo y la evapotranspiración (Ulloa, 2014). Solo una fracción mínima de la energía es consumida por los organismos del siguiente nivel trófico, de esta energía consumida, una fracción pequeña es asimilada, y de esta solo una fracción mínima se destina a la producción de tejidos nuevos. De lo anterior se deriva el concepto de **eficiencia ecológica**, es decir, la eficacia de transferencia de energía en los niveles tróficos y como se aprovecha en cada uno de ellos (Carabias *et al*, 2009).

En este capítulo se elaboró un modelo diagramático de la red trófica acuática empleando el lenguaje de circuitos de energía de Odum, fundamentado en el modelo conceptual presentado en el capítulo I, lo que posibilitó una segunda aproximación a la estructura definitiva del modelo de simulación efectuada en Stella. A pesar de que este programa puede generar un modelo directamente desde el inicio, es conveniente emplear previamente el lenguaje de circuitos de energía. Esto permite seguir aportando ideas, entender cálculos, sustituir uno o varios componentes estructurales del modelo y, en última instancia, examinar y entender las rutas de operativas y las transformaciones de materia y energía dentro del ecosistema analizado.

II.2. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo diagramático de la red trófica del ecosistema costero, con el fin de observar las transferencias energéticas desde el consumo de productores primarios o detritus hasta los depredadores tope, analizando la estructura, dinámica y funcionamiento del ecosistema.

II.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

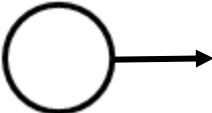
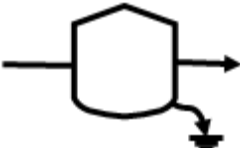
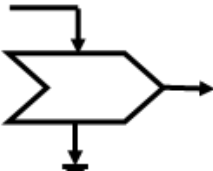
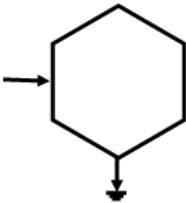
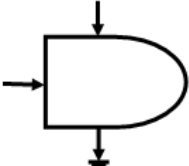
- Representar en un modelo diagramático los componentes bióticos y abióticos más importantes que integran la red trófica en la RBLP, tomando en cuenta las Leyes de la Termodinámica
- Explicar, de manera más detallada, algunos procesos que se llevan a cabo en la dinámica de este sistema.
- Analizar las interacciones entre los productores y consumidores del ecosistema costero, el uso de la energía, el reciclaje de materiales y el uso de los almacenajes de energía para entender los procesos de producción del sistema.

II.4. MÉTODOS

II.4.1. Análisis de datos

Se desarrolló un modelo diagramático donde se considera la biomasa de los principales grupos funcionales de la RBLP como **variables de estado**. Se incorpora el fitoplancton, pastos marinos, manglar de borde y detritus como **productores primarios**, un pez herbívoro y zooplancton como **consumidores primarios**, crustáceos y un pez omnívoro como **consumidores secundarios** y un pez piscívoro como **consumidor terciario**. Las variables de estado están condicionadas por la variabilidad ambiental, las cuales están representadas por las **funciones forzantes** (temperatura, precipitación, mareas y radiación solar). Para ello se empleó la simbología de circuitos de energía de Odum (1983; Tabla II.1)

Tabla II.1. Simbología de circuitos de energía de Odum (1983).

	Límites del sistema. Representa las fronteras que limitan el estudio del sistema.
	Flujo de energía. Todos los flujos (energía, materia e información) se representan por una línea. La punta de la flecha indica la dirección del flujo de energía.
	Fuente (función forzante). Representan los estímulos producidos por el medio exterior del sistema (sol, combustibles fósiles, viento, etc.)
	Almacenaje (variable de estado). Este símbolo representa cualquier cantidad almacenada de materia, energía, dinero, activos, información, etc.
	Interacción. Convergencia de dos vías acopladas para producir una salida en proporción a la función de ambas. Son objetos que no almacenan memoria de comportamiento continuo.
	Consumidor (variable de estado de transformación autocatalítica) Transforma la calidad de la energía recibida con los productos, la almacena y la retroalimenta de forma auto catalítica para mejorar el flujo de entrada. Representa cualquier población de consumidores en un sistema, incluidos los seres humanos. Los detalles dentro del consumidor no se especifican a menos que se describan en el interior.
	Productor (variable de estado que convierte energía de baja en energía de alta calidad). Recopila y transforma energía de baja calidad bajo el control de interacciones de flujos de alta calidad.
	Disipador de calor. Representa la Segunda Ley de la termodinámica. La dispersión de la energía disponible (energía potencial) en un estado degradado incapaz de generar trabajo. A partir de cada símbolo de transformación, y cada tanque se requieren rutas de disipación de calor.

II.5. RESULTADOS

II.5.1 Modelo diagramático

El modelo diagramático describe la estructura y la dinámica de **transferencia de energía** de los principales grupos funcionales que forman parte de una red trófica (Figura II.1). El recuadro diseñado alrededor de los símbolos marca el **límite del sistema**. Los círculos de carácter externo al recuadro representan las **fuentes (temperatura, precipitación, mareas)**. La fuente **radiación solar** marca la producción de biomasa mediante la fotosíntesis de los tres productores primarios en el sistema (fitoplancton, pastos marinos y manglar), por ello **el flujo de energía** va acompañado del símbolo **interacción**. Las redes de caminos (flechas) representan los flujos de energía y biomasa y, por lo tanto, de las acciones de fuerza causal de los mismos (Odum, 1971).

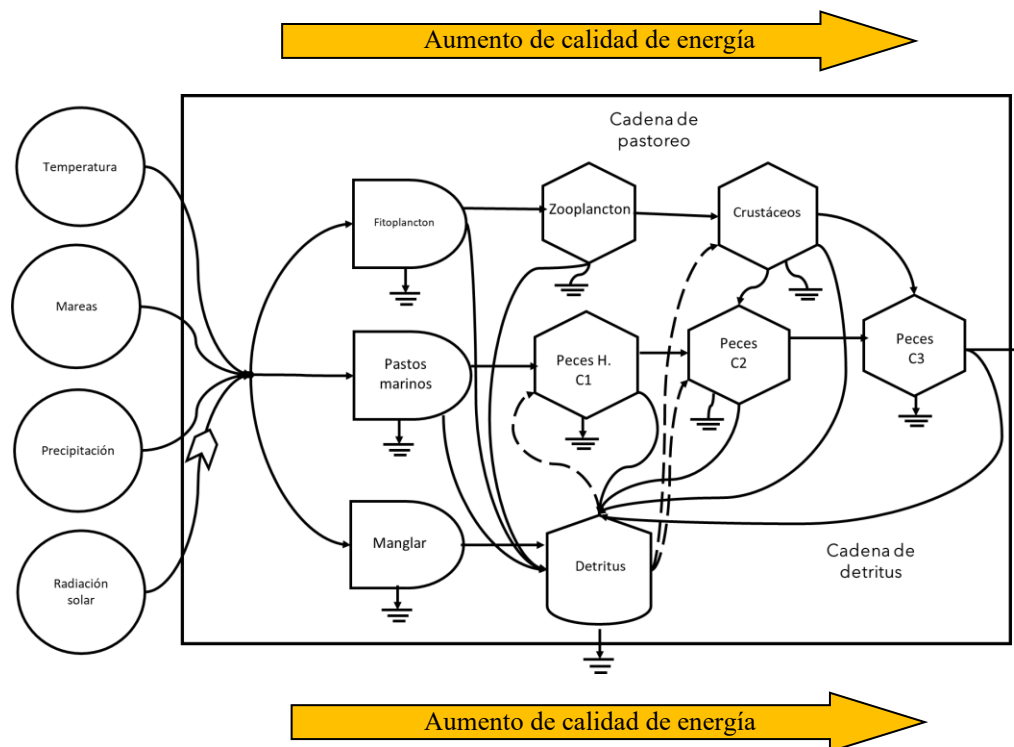


Figura II.1. Modelo diagramático de una red trófica en un ecosistema costero en la RBLP. C1, C2 y C3 representan a los consumidores primarios, secundarios y terciarios respectivamente.

El modelo diagramático muestra las cadenas tróficas existentes en estos ecosistemas, **cadena de pastoreo** y **cadena de detritus**.

Se elaboraron una serie de diagramas derivados del modelo diagramático previo para detallar los procedimientos que se realizan en la red trófica. La Figura II.2 presenta de manera interna a los productores del sistema durante el proceso de fotosíntesis, representando una interacción que combina los nutrientes y la energía. La flecha marcada en rojo fluye del almacenaje a los procesos de interacción nuevamente.

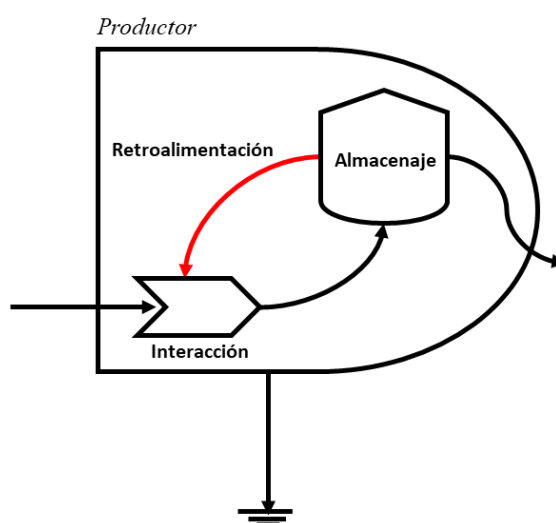


Figura II.2. Componentes internos de un productor (interacción y almacenaje). La flecha marcada en rojo representa la retroalimentación.

Un consumidor también presenta un proceso de **interacción** y **almacenaje**. En la Figura II.3. se muestra el proceso de interacción de los consumidores al alimentarse de los productores. El **almacenaje** es la **biomasa** del tejido del consumidor. Los componentes y rutas internos de este son similares a los de un productor.

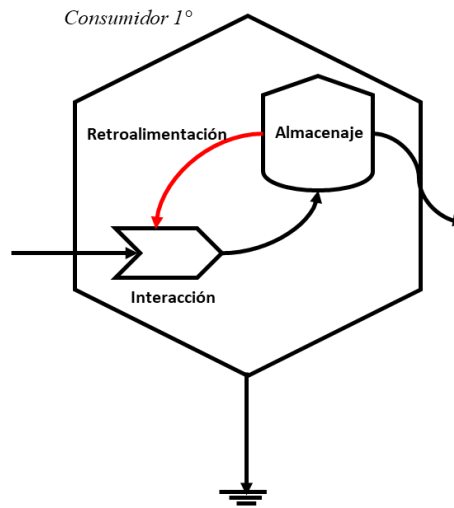


Figura II.3. Componentes internos de un consumidor. Se observa la presencia de un símbolo de almacenaje y otro de interacción. La flecha marcada en rojo representa la retroalimentación.

Los diagramas presentados en las figuras anteriores pueden ser integradas para mostrar cómo están conectadas algunas partes productoras y consumidoras del ecosistema costero. La Figura II.4. representa el uso de la energía, el reciclaje de materiales y el uso del depósito para ayudar a los procesos de producción del sistema. Únicamente los símbolos de **fuerza** y el **sumidero de calor** son diseñados fuera de los límites, debido a que la primera es abastecida por una fuente externa al sistema como fuente de energía, y en el **sumidero de calor** la energía es dispersada del sistema y no puede ser reutilizada. Debido a que parte de la energía solar retorna fuera del mar sin ser utilizada, la línea de la **radiación solar** es representada con otro flujo que sale del sistema. Los nutrientes liberados por los consumidores cuando estos mueren se muestran reciclados hacia la izquierda volviendo nuevamente al proceso de producción de otros productores

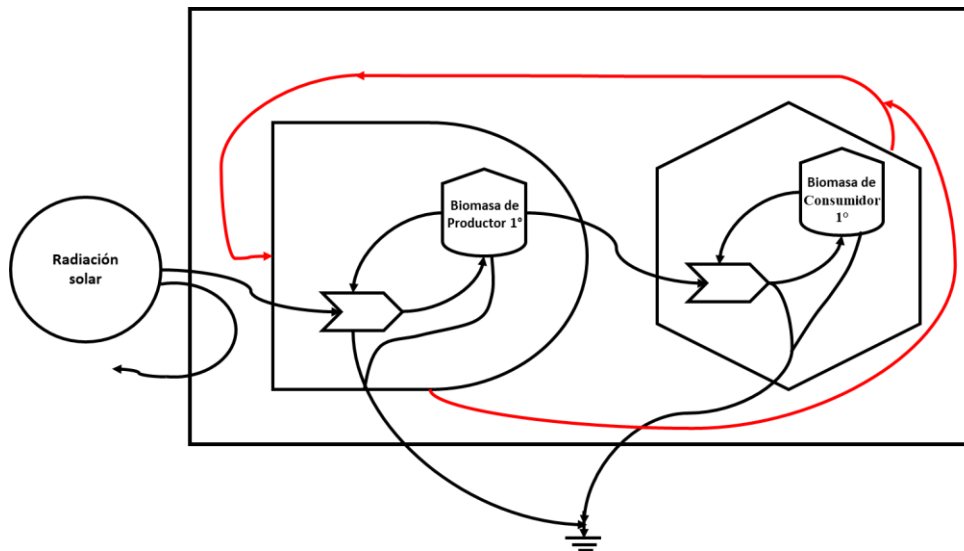


Figura II.4. Uso de la energía, el reciclaje de materiales y el uso de depósitos en la red trófica acuática.

En la Figura II.5 se muestra un ejercicio de la relación de energía media aprovechada por los organismos de la red trófica, de acuerdo con la **Ley del 10%** propuesta por Lindeman (1942). Se observa el comienzo de la producción primaria de productores, que transforma la energía solar a través de la fotosíntesis en energía almacenada en forma de compuestos de carbono. La energía generada se traslada por los niveles tróficos del ecosistema costero a medida que los organismos consumen miembros de niveles tróficos inferiores.

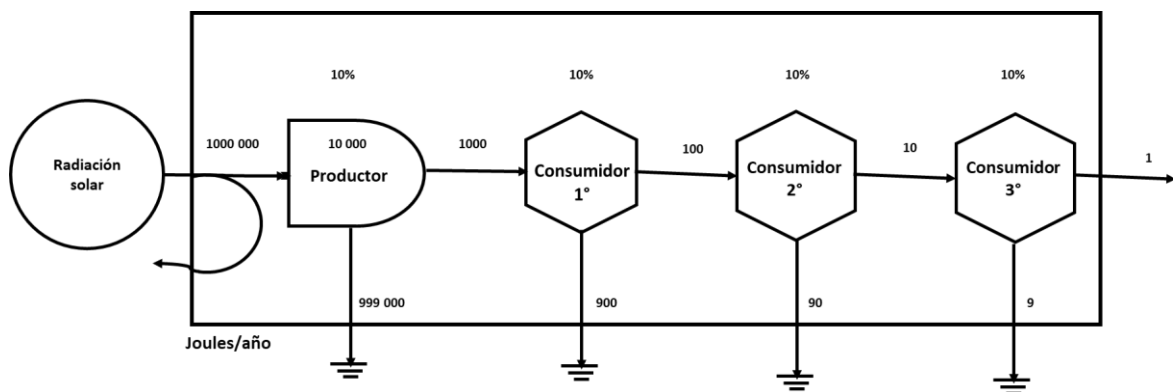


Figura II.5. Niveles de transformación sucesiva de energía en la red trófica acuática.

Se muestra que aproximadamente 1,000,000 de joules de la luz solar contribuyen a la fotosíntesis en el ecosistema de la RBLP. Parte de esta, es luz solar directa y la otra parte es energía solar que cae en el océano. Cerca de un 1% de esta

energía es transformada por los productores del sistema en biomasa vegetal. Por otro lado, aproximadamente 999,000 de joules se pierden como energía utilizada durante el proceso de producción. La eficiencia de uso de la energía solar es, por tanto:

$$10,000/1,000,000 = 1/100, \text{ es decir, } 1\%$$

La eficiencia para la fotosíntesis está entre 0, 1 y 2%. Estas eficiencias son bajas porque la luz solar es muy diluida, y son necesarios muchos pasos sucesivos y una extensiva maquinaria celular para concentrarla y obtener una energía de alta calidad.

A cada nivel sucesivo de la red trófica acuática, cerca del **10%** de la energía disponible para el nivel en cuestión, es convertida en biomasa. Esto también se aplica a productores, los cuales consumen 90% de su propia producción durante la respiración. Es decir:

- 1,000,000 de joules de energía solar sustentan la vegetación en un año.
- 10,000 joules se considera energía transformada (dentro del productor fotosintético).
- 1000 joules es convertida a nueva biomasa del productor, la cual es consumida por un consumidor de primer orden.
- 100 joules de nueva biomasa del consumidor de primer orden son producidos, la cual es consumida por el consumidor de segundo orden.
- 10 joules de nueva biomasa del consumidor secundario son producidos, la cual es consumida por el consumidor de tercer orden.
- 1 joule de nueva biomasa del consumidor es exportado.

Esto es, que para producir 1 joule del consumidor terciario (pez piscívoro) se necesitan 1,000,000 joules solar aproximadamente.

II.6. DISCUSIÓN

II.6.1. Modelo diagramático

El resultado de los modelos diagramáticos presentados en este capítulo sobre la dinámica de un ecosistema costero muestra que el todo en un sistema se vuelve más que la suma de sus componentes cuando hay interacciones. Fortaleció de forma práctica al conocimiento sobre las conexiones existentes entre las partes productoras y consumidoras de la red trófica, sobre el flujo de la energía, el reciclaje de materiales y el uso del almacenaje para condicionar los procesos de producción de las variables de estado. El lenguaje de circuitos de energía posibilitó la capacidad de expresar la primera y segunda ley termodinámica, además de la retroalimentación y, en última instancia, el refuerzo de máxima potencia. El desarrollo de los modelos también fortaleció la comprensión del sistema al representar, de manera gráfica, el conocimiento conceptual adquirido y estructurarlo conforme a los propósitos del modelo. La modelización es considerada por Odum (1983) un arte debido a la individualidad, la creatividad y la esencia del modelador. En este aspecto, se fomentó la creatividad del arte al analizar qué incluir en el sistema, qué hacer con la información obtenida, adecuar la esencia del sistema que se está modelando y representar esta esencia en una forma parsimoniosa.

El análisis de los diagramas del modelo permite justificar y corroborar lo siguiente:

II.6.2. Estructura del sistema y Calidad de la energía

La Figura II.1 muestra la estructura del ecosistema costero de la RBLP. Todas las fuentes extrínsecas importantes se colocaron por orden de calidad de la energía. Así, en primer lugar, se encuentra *Radiación solar* en el extremo inferior

izquierdo del diagrama, seguido de *Precipitación, Mareas y Temperatura*. Las variables de estado se ubicaron dentro de los límites del sistema, también en orden de calidad de la energía. Este procedimiento es congruente con lo propuesto por Odum (1983). Este diagrama muestra la **cadena de pastoreo** que inicia con el consumo de los productores primarios *Fitoplancton* y *Pastos marinos* por los consumidores primarios (*Peces herbívoros* y *Zooplancton*). La energía que sostiene el fitoplancton como productor se transforma a través del zooplancton y luego a través de peces pequeños a peces grandes. Esto mismo sucede con pastos marinos, en donde la energía se transforma a través de peces herbívoros, seguido de peces omnívoros y peces piscívoros. Los consumidores primarios son devorados por consumidores secundarios (*Crustáceos* y *Peces omnívoros*) que serán el alimento para el último eslabón de la trama trófica (*Consumidor terciario*). El productor *Manglar* no presenta a un consumidor directo en el sistema, por ello se conecta directamente al *Detritus* al proporcionar una gran cantidad de biomasa en descomposición. No todos los organismos mueren por consumo total de sus depredadores, algunos mueren de manera natural, por lo que todos los componentes también están conectados al detritus. Las flechas punteadas representan la vía de transferencia de los nutrientes del detritus que son captadas por peces herbívoros, peces consumidores 2° y crustáceos, es decir, la **cadena de detritus**. Cada uno de los elementos que se encuentran dentro del sistema cuentan con un disipador de calor de acuerdo con la **Segunda Ley de la Termodinámica**.

En cada paso de la red, una considerable cantidad de energía se emplea en la transformación, y únicamente una minoría se convierte en una calidad superior, más concentrada y en una forma que puede ejecutar acciones especiales cuando se retroalimenta. La **disminución** de la energía va acompañada de un **aumento de la calidad**. Los flujos de energía de baja calidad son abundantes y están muy dispersos, y las unidades individuales son pequeñas en tamaño. Las unidades de alta calidad, aunque menores en el flujo total de energía, están más concentrados. La disposición de cada uno de los componentes del sistema evidencia que la energía de la derecha es de alta calidad, ya que se emplean grandes cantidades de joules en el extremo izquierdo de la red trófica para producir escasos joules en la

derecha (Odum, 1983). En resumen, un gramo del pez piscívoro obtiene más energía para ser producida que un gramo de pastos marinos; por lo tanto, el piscívoro representa una energía de alta calidad. La calidad energética disminuye en la izquierda y se incrementa con cada avance a través de la red.

La producción primaria necesita una cierta cantidad de biomasa del productor para hacer el trabajo de fotosíntesis. En la Figura II.2., se muestra que en el símbolo de *almacenaje* se acumula biomasa del tejido de los productores. Se presenta una flecha en rojo que se desplaza del *almacenaje* a los procesos de interacción nuevamente. Esto indica que el depósito de biomasa está envuelto en la producción de más biomasa, lo que se conoce como **retroalimentación** (Odum, 1983). También los consumidores tienen un proceso de interacción y almacenamiento, como se muestra en la Figura II.3. El *almacenaje* es la biomasa del tejido del consumidor. Se muestran los hexágonos (consumidores), que poseen un bucle de retroalimentación junto con un disipador de calor, por los cuales, el calor se dispersa a medida que se degrada la energía potencial. La línea marcada en rojo refleja el flujo del almacenaje nuevamente a los procesos de interacción. Esto indica que el depósito de biomasa está envuelto en la producción de más biomasa.

II.6.3. Principio de Máxima Potencia (Lotka, 1922)

Los diagramas facilitaron la comprensión de que las **variables de estado** no sólo constituyen descriptores útiles del estado del sistema en un tiempo dado, sino que también cumplen un **papel funcional en el sistema (el almacenamiento)**. Esto representa una característica importante de su estructura. Los almacenamientos no son componentes pasivos de los sistemas, ya que es necesario un gasto energético para su mantenimiento (Odum, 1983). Esto se debe a que la concentración de materiales, energía o información en un segmento de un sistema suele disiparse en razón a la 2ª Ley de la Termodinámica.

El sistema de la trama trófica en la RBLP presenta nueve variables de estado (almacenamiento), lo que implica que su existencia le proporciona una ventaja

adaptativa que garantiza su supervivencia frente a otros sistemas. De acuerdo con el **Principio de Máxima Potencia** (Lotka, 1922; Sciubba, 2011), los sistemas que hacen fluir la energía a través de ellos con más rapidez triunfan en la competencia con otros sistemas por una misma fuente de energía; la presencia de varios almacenamientos en un sistema maximiza su potencia.

II.6.4. Longitud de las tramas tróficas

La Figura II.5. se ajusta a lo planteado por Lindeman, (1942). En esta situación, se observa que la transferencia de energía entre niveles tróficos resulta ineficaz, de modo que la producción neta en un nivel trófico es generalmente el 10% de la producción neta en el nivel trófico anterior. Debido a la muerte y la respiración celular, una cantidad significativa de energía se pierde en el ambiente en lugar de ser absorbida por los consumidores para su producción. Es importante tener en cuenta esta regla del 10% de transferencia de energía. Este patrón de transferencia parcial **limita la longitud de las tramas tróficas**; después de cierto número de niveles tróficos, por lo general entre tres y seis, la energía que fluye es muy poca para mantener una población de un nivel superior. Los sistemas pueden acumular o exportar diferentes cantidades de energía, es decir el flujo de energía se ve afectado por la longitud de la cadena trófica.

Al respecto, estos resultados son similares a los reportados en varios estudios de diferentes ecosistemas donde se ha evidenciado que las cadenas tróficas largas no son energéticamente eficientes (Giacomini y Petrere, 2010; Nielsen y Ulanowicz, 2000; Pimm, 1988) y, por lo tanto, las longitudes de las cadenas son cortas. Esto significa que, por distintos que sean los ecosistemas, existe por lo general un número acotado de niveles tróficos a través de los cuales puede fluir la energía (Dunne *et al.*, 2002).

II.6.5. Ciclo de Materia

La Figura II.4. muestra que los productores primarios reciclan los nutrientes en el sistema. Los nutrientes liberados por los consumidores (primarios,

secundarios y terciarios) al morir, se reciclan hacia la izquierda volviendo nuevamente al proceso de producción de los productores primarios (Odum, 1983).

II.6.6. Sistema termodinámico

La dispersión de energía que acompaña todos los almacenamientos y procesos se muestra con el símbolo de sumidero de calor en la Figura II.1., que es la pérdida de energía potencial en calor según lo requiere la **segunda ley de la termodinámica**. Esta ley puede expresarse como la **Ley de degradación de la energía**: la energía se vuelve menos capaz de realizar trabajo a medida que se dispersa en forma de calor. Los disipadores de calor acompañan a todos los procesos y almacenamientos (consumidores y productores). La energía dispersa no puede ser usada nuevamente (Odum, 1983). La energía está disponible para realizar trabajo solamente cuando está relativamente concentrada. Cuando la energía se disipa pierde su concentración y su capacidad de realizar trabajo útil, se encuentra dispersa.

Finalmente, para mejorar el modelo diagramático de la red trófica de la RBLP, se requiere llevar a cabo una simulación mediante las ecuaciones de diferencia que se generan al emplear la simbología de circuitos de energía, tal como lo sugiere Odum (1983), de tal manera que se puedan cotejar estos resultados con los que se obtuvieron en el software Stella.

II.7. CONCLUSIONES

- Muchos de los procesos naturales son complicados para expresarlos solamente con palabras o comprenderlos a partir de una serie de ecuaciones de diferencia. Por lo que es necesario, al analizar sistemas complejos, crear diagramas que organicen y simplifiquen los procesos que se están considerando.
- El modelo diagramático, empleando el lenguaje de circuitos de energía de Odum, permitió explicar y modelar la estructura y funcionamiento de

un sistema con fines didácticos para llevar dicho modelo a un software computacional.

- El desarrollo del modelo diagramático resultó ser un instrumento muy útil para entender las conexiones presentes entre las partes productoras y consumidoras de la red trófica, sobre el flujo de la energía, el reciclaje de materiales y la utilización del almacenaje como apoyo a los procesos de producción de las variables de estado.
- La ley del diez por ciento proporcionó una comprensión básica sobre el ciclo de las tramas tróficas. Además, mostró la ineficiencia de la captura de energía en cada nivel trófico sucesivo. La conclusión racional es que la eficiencia energética se conserva mejor en aquellas tramas con pocos niveles tróficos.

II.8. BIBLIOGRAFIA

- Alcívar Cuello, J. M. (2003). La metáfora cibernética y los ecosistemas. Argumentos de razón técnica, 6: 183-191 pp.
- Carabias, J., Meave, J. A., Valverde, T., Cano Santana, Z. (2009). Ecología y medio ambiente en el siglo XXI. Pearson Education. 68-84 pp.
- Dunne, J. A., Williams, R. J., Martínez, N. D. (2002). Food-web structure and network theory: The role of connectance and size. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99: 12917-12922 pp
- Giacomini, H. C., Petrere, M. (2010). A estrutura de teias tróficas. Boletim da Sociedade Brasileira de Limnologia 38 (1): 1-33 pp.
- Tomado de Acero, A., Caraballo, P. (2012). Análisis de las relaciones tróficas en un lago de inundación de la amazonia colombiana. Rev. Colombiana ciencia. Anim. 4 (1): 102-120 pp.

- Hall, C., Day Jr, J. W. (1977). Systems and Models: Terms and Basic Principles. In: Hall and Day Jr. Ecosystem Modelling. John Wiley and Sons. N.Y., 684 pp.
- Ilário, E., Pereira, A., Paixão, V. G. (2018). Diagramática: a arte do bem pensar para pensar o bem. *Revista Bioética*, 26(2): 198-206 pp.
- Lindeman, R. L. (1942). The trophic-dynamic aspect of ecology. *Bulletin of Mathematical Biology*, 53: 167-191 pp.
- Lotka, A. J. (1922). Contribution to the energetics of evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci*, 8: 147–51 pp.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ediciones Omega S.A. 1010 pp.
- Nielsen, S. N., Ulanowicz, R. E. (2000). On the consistency between thermodynamical and network approaches to ecosystems. *Ecological Modelling*, 132: 23-31 pp.
- Odum, E. P. (1968). Energy Flow in Ecosystems: A Historical Review. *Integrative and Comparative Biology*, 8: 11-18 pp.
- Odum, H. T. (1970). Pathways of energy flow in a south Florida estuary. Ph D. Dissertation. University of Miami, Florida, 162 pp.
- Odum, H. T. (1971). An energy circuit language for ecological and social systems, its physical basis, 139-211 pp. In: Patten, B. (ed.). *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. Vol. 2. New York. Academic Press.
- Odum, H. T. (1983). *Systems Ecology: and Introduction*. John Wiley. New York, 644 p.
- Odum H.T. (1988). Self-organization, transformity and information. *Science*, 242: 1132-1139 pp.
- Odum, H.T. (1995). Self-organization and maximum power. In *Maximum Power*, Ed. by C.A.S. Hall, University Press of Colorado, Niwot, 311-364 pp.
- Pimm, S. L. (1988). Energy flow and trophic structure. In: *Concepts of Ecosystem Ecology: A Comparative View*. New York, NY: Springer New York., 263-278 pp.

- Sciubba, E. (2011). What did Lotka really say? A critical reassessment of the “maximum power principle”. *Ecological Modelling*, 222(8), 1347-1353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.002>
- Shoemaker, C.A. (1977). *Mathematical Construction of Ecological Models*. in: Hall and Day Jr. 1977. *Ecosystem Modelling*. John Wiley and Sons. N.Y., 684 pp
- Trifonova, N., Kenny, A., Maxwell, D., Duplisea, D., Fernandes, J. Tucker, A. (2015). Spatio-temporal Bayesian network models with latent variables for revealing trophic dynamics and functional networks in fisheries ecology. *Ecological Informatics*, 30: 142-158 pp.
- Ulanowicz, R. E. (1986). *Growth and development ecosystems phenomenology*. Springer-Verlag. New York, 203 pp.

CAPITULO III.

Modelo computarizado

RESUMEN

Un aspecto de gran importancia para el conocimiento funcional de los ecosistemas acuáticos es el estudio de la trama trófica y las diversas interacciones depredador/presa entre los grupos funcionales que la constituyen. Por una parte, indican las relaciones entre productor y consumidor, lo que es especialmente valioso porque indican las relaciones ecológicas entre los organismos, dando como resultado una mejor comprensión de la dinámica general del ecosistema estudiado. Este capítulo muestra el modelo de simulación utilizando Stella versión 10.0.6. Se delimitó como escenario un ecosistema acuático costero, el cual está integrado por nueve grupos funcionales que considera la parte biológica donde se expresa la biomasa ($t/km^2/año$) de productores primarios: fitoplancton, pastos marinos, manglar de borde y detritus; consumidores primarios: un pez herbívoro consumidor 1° y zooplancton; consumidores secundarios: un crustáceo y un pez consumidor secundario; y un consumidor terciario: un pez piscívoro. Este modelo permite a los nuevos usuarios interactuar con él desarrollando sus propias hipótesis, teniendo en cuenta de que se basa en supuestos lo más cercanos posible a la realidad. Los resultados de la simulación indican que la respuesta de la variabilidad ambiental es congruente y similar con la información obtenida en la literatura especializada. El consumo directo o indirecto del detritus y su producción de biomasa a través de la trama trófica destacan su papel como productor primario del sistema. Se determinó que tanto la vía del pastoreo como la del detritus son utilizadas alternada y consecuentemente. Se concluye que la fuerza motriz, calorífica y energética por parte de las variables ambientales, controlan el ritmo de la producción de biomasa de los productores primarios, así como de la trama trófica en consecuencia. Al desarrollar el diagrama y las conexiones de los elementos que componen el sistema, Stella demostró ser muy versátil. Fue una herramienta

adaptable para presentar los resultados en una variedad de formas, y no solamente como una gráfica a través del tiempo.

ABSTRACT

An aspect of significant importance for the functional knowledge of aquatic ecosystems is the study of the food web and the various predator/prey interactions between the functional groups that constitute it. On the one hand, they indicate the relationships between producer and consumer, which is especially valuable because they indicate the ecological relationships between organisms, resulting in a better understanding of the general dynamics of the ecosystem studied. This chapter shows the simulation model using Stella version 10.0.6. A coastal aquatic ecosystem was defined as a scenario, which is made up of nine functional groups that consider the biological part where the biomass ($\text{t/km}^2/\text{year}$) of primary producers is expressed: phytoplankton, seagrass, mangrove edge and detritus; primary consumers: a herbivorous primary consumer fish and zooplankton; secondary consumers: a crustacean and a secondary consumer fish; and a tertiary consumer: a piscivorous fish. This model allows new users to interact with it by developing their own hypotheses, considering that it is based on assumptions as close to reality as possible. The simulation results indicate that the response of environmental variability is consistent and similar to the information obtained in the specialized literature. The direct or indirect consumption of detritus and its biomass production through the food web highlight its role as primary producer of the system. It was determined that both the grazing and detritus pathways are used alternately and consistently. It is concluded that the driving force, heat and energy from environmental variables, control the rate of biomass production of primary producers, as well as the food web as a result. By developing the diagram and the connections of the elements that make up the system, Stella proved to be very versatile. It was an adaptable tool to present the results in a variety of ways, not only as a graph over time.

III.1. INTRODUCCIÓN

En la década de los cincuenta, Jay Forrester desarrolló un lenguaje para programar procesos industriales que puede convertir un diagrama en una representación matemática precisa, similar al lenguaje de circuitos de energía de Odum (Fisher, 2018). Este lenguaje es la base del programa **Stella**, el cual permite a los usuarios ejecutar modelos creados como representaciones gráficas que pueden describirse mediante una serie de ecuaciones de diferencia de un sistema utilizando cuatro bloques de construcción fundamentales: stock, flujo, conector y convertidor. Se ha utilizado en el mundo académico como una herramienta de enseñanza y en una variedad de aplicaciones comerciales y de investigación. El programa ha recibido críticas positivas, siendo elogiado en particular por su facilidad de uso (Cervantes *et al*, 2009); Carter, 1998).

El modelado de simulación puede ser intimidante para los estudiantes con antecedentes matemáticos limitados. A través de un reconocimiento realizado a alumnos de la Licenciatura en Biología en el módulo de Análisis de Sistemas Ecológicos de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco durante el taller titulado: **Introducción al modelado de sistemas dinámicos mediante el software Stella** efectuado en mayo de 2023, se determinó que la mayoría pasan la mayor parte de su formación académica sin comprender en su totalidad ciertos procesos de sistemas ambientales, ecológicos, biológicos y ecológicos-sociales; sobre todo si se trata de sistemas muy complejos que poseen múltiples elementos e interrelaciones. El uso de algunos programas computacionales facilita esta labor. Stella permite introducir a los científicos sin formación ingenieril ni de matemáticas y al público general, en la elaboración de modelos. Sus funciones de interfaz ofrecen una variedad de formas de observar los resultados, así como funciones automáticas de exportación/importación de datos que permiten integrar simulaciones con otras aplicaciones.

Por otra parte, un aspecto de gran importancia para el conocimiento funcional de los ecosistemas acuáticos es el estudio de la trama trófica y las

diversas interacciones depredador/presa entre los grupos funcionales que la constituyen. Indican las relaciones entre productor y consumidor, lo que es especialmente valioso porque indican las relaciones ecológicas entre los organismos, dando como resultado una mejor comprensión de la dinámica general del ecosistema estudiado (Di Bitetti, 2008).

En este capítulo, el modelo conceptual del capítulo anterior es utilizado para efectuar el modelo de simulación computarizado, adecuándolo en el software Stella versión 10.0.6. Este modelo permite a los usuarios interactuar con él desarrollando sus propias hipótesis, teniendo en cuenta de que se basa en supuestos lo más cercanos posible a la realidad.

III.2. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo cuantitativo de la trama trófica del ecosistema costero, para simular el comportamiento de sus componentes y analizar la relación entre estructura, dinámica y funcionamiento del ecosistema

III.3. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar los valores de inicio de las variables de estado, de los coeficientes de transferencia y las funciones forzantes.
- Desarrollar el modelo de simulación en Stella que describa la dinámica del ecosistema de la RBLP con un enfoque ecosistémico
- Efectuar, con escenarios diferentes, ejemplos de inestabilidad del sistema.

III.4. MÉTODOS

III.4.1. Valores de inicio y ecuaciones de flujo.

Se cuantificaron los valores de inicio de las variables de estado y de los coeficientes de transferencia que fueron integrados al modelo. De la literatura, se obtuvieron las ecuaciones de las relaciones subyacentes y conexiones entre los componentes del sistema que se anexaron en Stella en el apartado *ecuaciones de flujo*. Entre esta literatura de apoyo que se empleó para tal efecto fue: DiToro *et al*, (1971); Shoemaker, (1977); Vega-Cendejas, (1998); Barreiro y Aguirre (1999); Constanza *et al*, (1999); Ayala-Pérez y Martínez-Romero (2011); Patonai y Fabián, (2022).

III.4.2. Modelo de simulación

Se desarrolló un modelo de simulación en Stella versión 10.0.6, utilizando como base el modelo diagramático del capítulo II. La integración del modelo y las pruebas de simulación se realizaron mediante el uso de variables de estado, flujos, conectores y convertidores que el software presenta como herramientas (Tabla III.1.). Cabe señalar que, tanto el modelo como algunos resultados de la simulación, son mostrados usando el reproductor ISEE PLAYER versión 3.2, que es un complemento gratuito de Stella que permite ver, ejecutar y compartir modelos con una mejor presentación visual.

Tabla III.1. Bloques de construcción presentes en STELLA

Símbolo	Descripción
	Stock: Símbolo genérico para cualquier componente que acumula o consume recursos. Una cantidad valorable que es almacenada y que describe el estado del sistema se denomina variable de estado .
	Flujo: Un flujo es la tasa de cambio de un stock. En este apartado se pueden ingresar las ecuaciones para el flujo. La influencia de un elemento sobre otro se puede cuantificar con números o relaciones matemáticas.



Convertidor: Modifica las tasas de cambio del componente al que está adjunto. Esto puede incluir flujos y otros convertidores. Los convertidores pueden tener asignada una constante o una ecuación.



Conector: Indica las relaciones entre los stocks, los flujos y los convertidores. Permite a la información fluir entre estos.

III.5. RESULTADOS

III.5.1. Variabilidad ambiental y ecuaciones polinómicas.

Las ecuaciones polinómicas de tercer grado que muestran el comportamiento climático en la RBLP se muestran en la Tabla III.2., las cuales fueron incluidas en el apartado *ecuación de convertidor* en Stella.

Tabla III.2. Ecuaciones polinómicas de las variables ambientales en el sistema RBLP. Mes= meses del año durante el periodo 2010-2021.

Variable	Ecuación polinómica
Radiación solar	$0.0116 * \text{Mes}^3 - 0.2654 * \text{Mes}^2 + 1.6172 * \text{Mes} + 3.5798$
Temperatura	$0.0106 * \text{Mes}^3 - 0.3935 * \text{Mes}^2 + 3.5673 * \text{Mes} + 20.073$
Precipitación	$-1.1917 * \text{Mes}^3 + 18.422 * \text{Mes}^2 - 54.518 * \text{Mes} + 74.932$
Mareas	$-0.0752 * \text{Mes}^3 + 1.7341 * \text{Mes}^2 - 10.045 * \text{Mes} + 31.275$

III.5.2. Valores de inicio y ecuaciones de flujo

Los valores de inicio de las variables de estado y los coeficientes de transferencia se muestran en la Tabla III.3. Las ecuaciones de flujo son aquellas que representan una entrada o salida de un almacenaje y cuyo efecto consiste en cambiar el estado de éste (Tabla III.4.).

Tabla III.3. Datos de inicio de cada variable: biomasa (B); cociente de transferencia (CT); tasa de consumo (TC) de biomasa; tasa de filtración (TF); tasa de muerte (M); tasa de depredación (TD)

Grupos funcionales	Biomasa	CT	TC	TF	M	TD
Fitoplancton	53.3	0.02			0.1	
Pastos marinos	53.3	0.01			0.1	
Manglar	40	0.02			0.1	
Detritus	10					
Zooplancton	9.2			0.33	0.1	
Crustáceos	44		0.09		0.1	
Herbívoros	16.6		0.1		0.1	
Consumidor 2°	14				0.1	0.4
Consumidor 3°	1.63				0.1	0.15

Tabla III.4. Ecuaciones de flujo: Cociente de transferencia (CT); tasa de consumo (TC) de biomasa; tasa de filtración (TF); tasa de muerte (M); tasa de depredación (TD).

Interacción	Abreviación	Ecuación
Producción de biomasa de fitoplancton	PB FIT	$(CT * FIT) +$ $(Precipitación * Temperatura * Mareas * Radiación Solar)$
Producción de biomasa de pastos marinos	PB PM	$(CT PM * PM) +$ $(Temperatura * Precipitación * Mareas * Radiación Solar)$
Producción de biomasa de manglar	PB MAN	$(CT M * MAN) +$ $(Temperatura * Precipitación * Mareas * Radiación Solar)$
Filtración de fitoplancton a zooplancton	Fit a Zoo	$FIT * TF Zoo$
Consumo de PM a peces consumidores primarios	PM a P1°	$TC P1° * PM$

Consumo de zooplancton a crustáceos	Zoo a Cr	Zoo*TC Cr
Depredación de crustáceos a peces consumidores secundarios	Cr a P2°	(CR/P2°) *TD P2°

III.5.3. Modelo de simulación

La Figura III.1. muestra el modelo diagramático, junto con un glosario que contiene las abreviaturas utilizadas (tabla III.5.).

Se delimitó como escenario un ecosistema acuático costero, el cual está integrado por nueve grupos funcionales que considera la parte biológica donde se expresa la **biomasa** (t/km²/año) de productores primarios: **fitoplancton, pastos marinos, manglar de borde y detritus**; consumidores primarios: **un pez herbívoro y zooplancton**; consumidores secundarios: **un crustáceo y un pez consumidor secundario**; y un consumidor terciario: un **pez piscívoro** que es el principal depredador. Estos grupos funcionales son de gran interés por ser componentes clave en la estructura y dinámica de la comunidad; ya que forman parte importante de la regulación de los flujos de biomasa en el sistema estuario-plataforma y realizan un papel fundamental en el sostenimiento de la biodiversidad y los recursos. Los **flujos de entrada** al ecosistema se refieren a la **producción de biomasa** de los productores primarios regulado por los **coeficientes de transferencia** (CT). Dichos coeficientes relacionan y moderan la tasa de transferencia de fuerza motriz, calorífica y energética de las variables ambientales a los flujos de entrada. Las **funciones forzantes** (mareas, temperatura, precipitación y radiación solar) representan la **variabilidad ambiental** del sistema.

Las variables de estado presentan **dos flujos de salida**: la **mortalidad natural** (flechas color azul marino, conectadas al detritus) y la **mortalidad por depredación** (flechas color rojo). Los productores primarios (excepto detritus) y sus consumidores mueren por causa natural o no fueron devoradas en su totalidad por su respectivo depredador, por lo que estas se encuentran conectadas a la

variable *detritus*, que contiene la materia orgánica en descomposición previamente preparada por microorganismos descomponedores para ser ingerida por los algunos organismos. En el grupo de peces (consumidores 1°, 2°, 3°), así como en detritus y crustáceos se agrega un tercer flujo de salida, la **exportación** (migración a otros ecosistemas adyacentes de algunos los organismos, o al movimiento del detritus fuera del sistema gracias al oleaje). De esta manera, el sistema tendrá entradas y salidas de materia y energía, siendo un sistema **abierto**. Los íconos marcados con línea punteada son una copia de los stocks, flujos y convertidores utilizados, permitiendo usar la misma herramienta en ubicaciones separadas en el diagrama, manteniendo a este más ordenado y atractivo visualmente. Los convertidores *precipitación*, *radiación solar*, *mareas* y *temperatura* están conectados a otro convertidor nombrado *Mes*, que permite observar los resultados de la simulación en periodo de tiempo mayor a diez años.

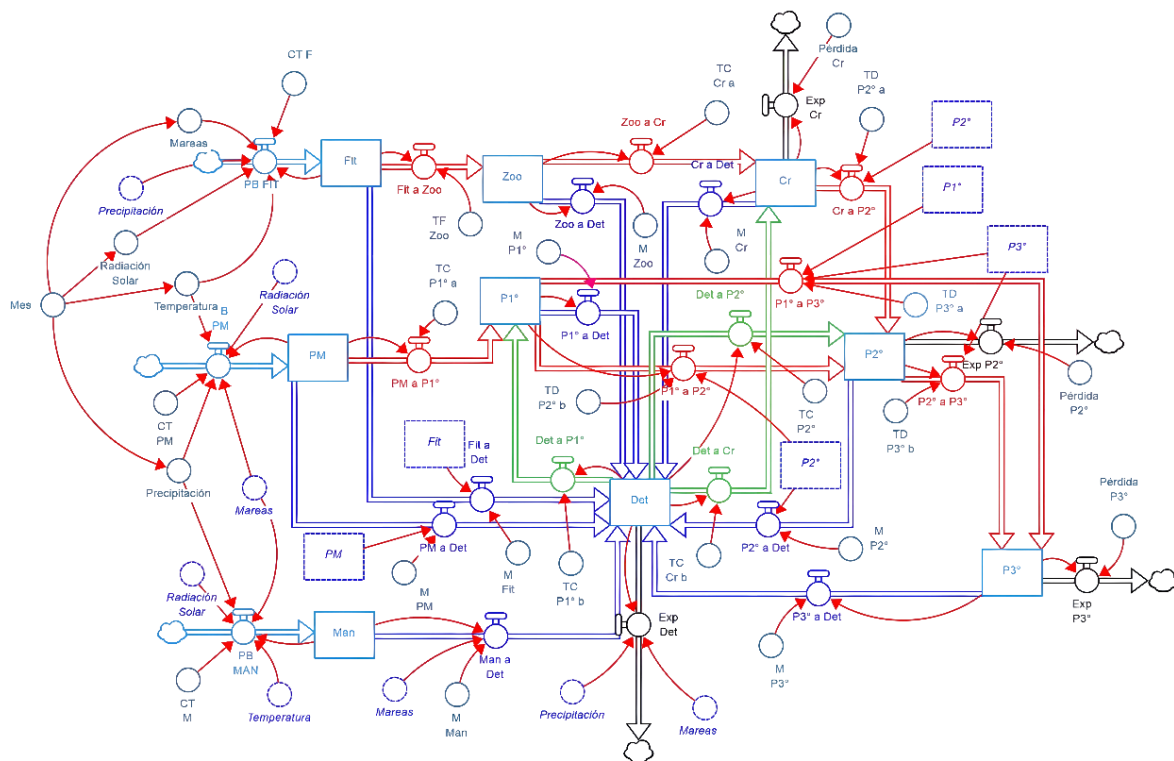


Figura III.1. Representación diagramática del modelo de simulación de una red trófica. Los flujos en color rojo muestran la cadena de pastoreo, mientras que los flujos en color verde exponen la cadena de detritus. Los flujos en color negro indican la exportación de materia fuera del sistema.

Tabla III.5. Glosario de las abreviaturas de los elementos estructurales utilizados en el diagrama.

VARIABLES DE ESTADO (STOCK)	
FIT	Fitoplancton
PM	Pastos Marinos
MAN	Manglar
DET	Detritus
ZOO	Zooplancton
P1°	Peces 1° (herbívoros)
CR	Crustáceos
P2°	Peces consumidores 2° (omnívoros)
P3°	Peces consumidores 3° (carnívoros)

CONVERTIDORES	
CT FIT	Coefficiente de transferencia Fitoplancton
CT PM	Coefficiente de transferencia Pastos Marinos
CT M	Coefficiente de transferencia Manglar
M FIT	Mortalidad Fitoplancton
M PM	Mortalidad Pastos Marinos
M MAN	Mortalidad Manglar
TF ZOO	Tasa de filtración zooplancton
M ZOO	Mortalidad zooplancton
TC ZOO	Tasa de consumo zooplancton
TC P1° a	Tasa de consumo Peces Herbívoros a
TC P1° b	Tasa de consumo Peces Herbívoros b
TC CR a	Tasa de consumo Crustáceos a

TC CR b	Tasa de consumo Crustáceos b
M CR	Mortalidad Crustáceos
EXP CR	Exportación Crustáceos
TD P2° a	Tasa de depredación Peces consumidores 2° a
TD P2° b	Tasa de depredación Peces consumidores 2° b
TC P2°	Tasa de consumo Peces consumidores 2°
M P2°	Mortalidad Peces consumidores 2°
TD P3° a	Tasa de depredación Peces consumidores 3° a
TD P3° b	Tasa de depredación Peces consumidores 3° b
M P3°	Mortalidad Peces consumidores 3°
FLUJOS	
PB FIT	Producción Biomasa Fitoplancton
PB PM	Producción Biomasa Pastos Marinos
PB MAN	Producción Biomasa Manglar
FIT a ZOO	Flujo de Fitoplancton a zooplancton
FIT a DET	Flujo de Fitoplancton a detritus
PM a P1°	Flujo de Pastos marinos a Peces consumidores 1°
PM a DET	Flujo de Pastos marinos a Detritus
MAN a DET	Flujo de Manglar a Detritus
ZOO a CR	Flujo de Zooplancton a Crustáceos
ZOO a DET	Flujo de Zooplancton a Detritus
CR a P2°	Flujo de Crustáceos a Peces consumidores 2°
CR a DET	Flujo de Pastos marinos a Peces consumidores 1°

EXP CR	Exportación de Crustáceos
P2° a P3°	Flujo de Peces consumidores 2°a Peces consumidores 3°
P2° a DET	Flujo de Peces consumidores 2°a Detritus
EXP P2°	Exportación de Peces consumidores 2°
P3° a DET	Flujo de Peces consumidores 3°a Detritus
EXP P3°	Exportación de Peces consumidores 3°
EXP DET	Exportación de Detritus

Los resultados de la simulación de la dinámica de la red trófica se muestran a continuación. En la figura III.2. se observa la respuesta de la variabilidad ambiental en un periodo de tiempo de un año (2010), la cual coincide con la información mostrada del Servicio Meteorológico Nacional y de la aplicación MARV09 expuestos en el capítulo I. Se muestra las tres épocas climáticas presentes: **secas** que abarca de noviembre a abril, **lluvias** que va de mayo a octubre, y los frentes fríos anticiclónicas (**nortes**) de octubre a febrero (Lara-Lara *et al*, 2008).

Las mareas altas generalmente no exceden los 35 mm de altitud en temporada de nortes, mientras que no rebasan los 15 mm por parte de las mareas bajas durante el periodo previo a lluvias. La radiación lumínica alcanza su máximo valor cerca de los 6.54 kwh durante la temporada de secas, disminuyendo durante el mes de septiembre. En cuanto a la temperatura, se presentan escasas variaciones a lo largo del año de (2 a 6 °C) debido a la localización en la que se sitúa la reserva (zona intertropical). Por el contrario, la precipitación presenta variaciones de hasta 181 mm, alcanzando un valor de 211 mm en temporada de lluvias.

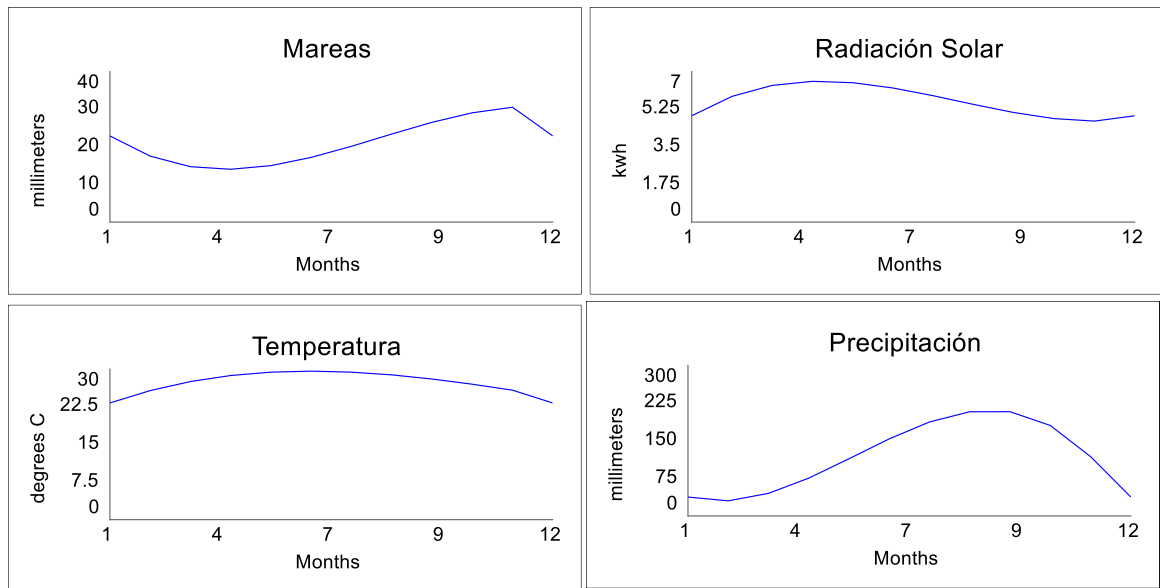


Figura III.2. Comportamiento temporal de la variabilidad ambiental (mareas, radiación solar, temperatura y precipitación) en un periodo de un año (2010).

Respecto a los productores primarios, la respuesta del modelo se representa en la figura III.3., donde se aprecia que la mayor producción de biomasa proveniente del fitoplancton, manglar y de los pastos marinos se incrementa en el mes de abril, previo a la época de lluvias. Durante este periodo, existe también un aumento en la temperatura y en la energía lumínica proveniente del sol, junto con el incremento en la actividad de las mareas.

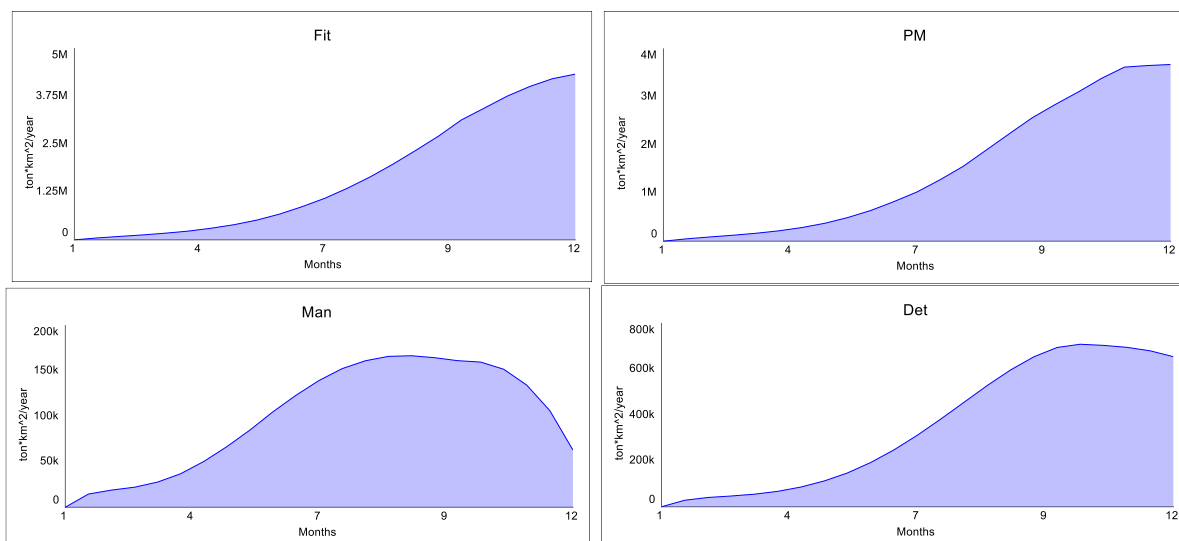


Figura III.3. Comportamiento temporal de los productores primarios (Fit=fitoplancton, PM= pastos marinos, Man= manglar de borde, Det=detritus) en un periodo de un año (2010).

La figura III.4. muestra la respuesta de la variabilidad ambiental en un periodo de tiempo de 144 meses correspondientes del 2010-2021. Se observan oscilaciones constantes que marcan las variaciones cíclicas de la estacionalidad en la RBLP.

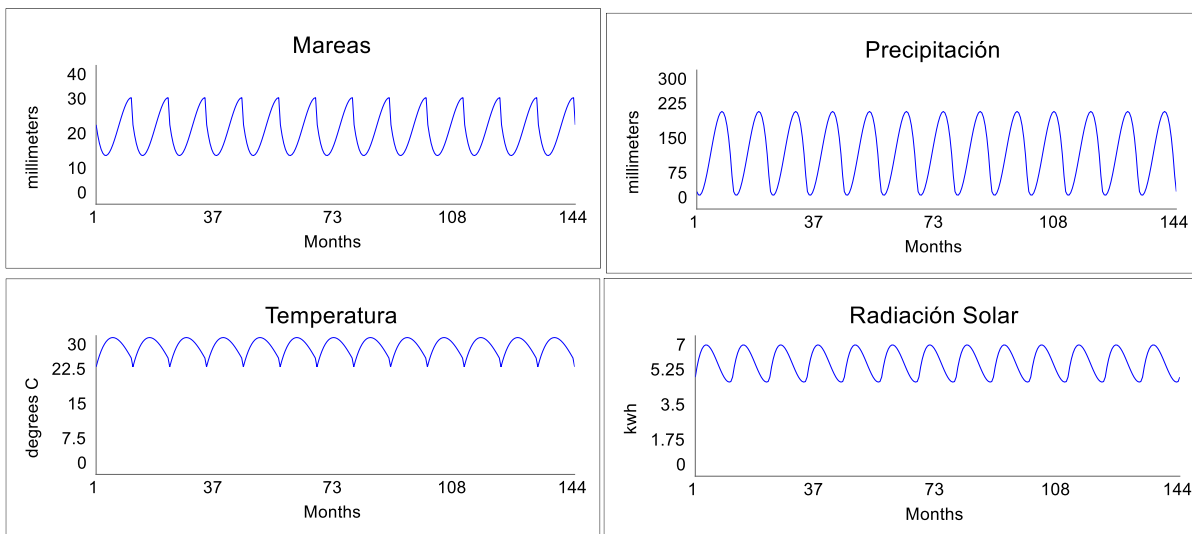


Figura III.4. Comportamiento temporal de la variabilidad ambiental (mareas, radiación solar, temperatura y precipitación) en un periodo de tiempo de 144 meses correspondientes del 2010-2021.

Dadas las condiciones de variabilidad ambiental en la reserva, se considera que estas condicionan el comportamiento de la biomasa de los organismos. En la figura III.5. se muestra la producción de biomasa de los productores primarios junto con el detritus, mientras que en la figura III.6. se observa las oscilaciones de biomasa para los consumidores (herbívoros, consumidores 2° y 3°) durante el periodo 2010-2021.

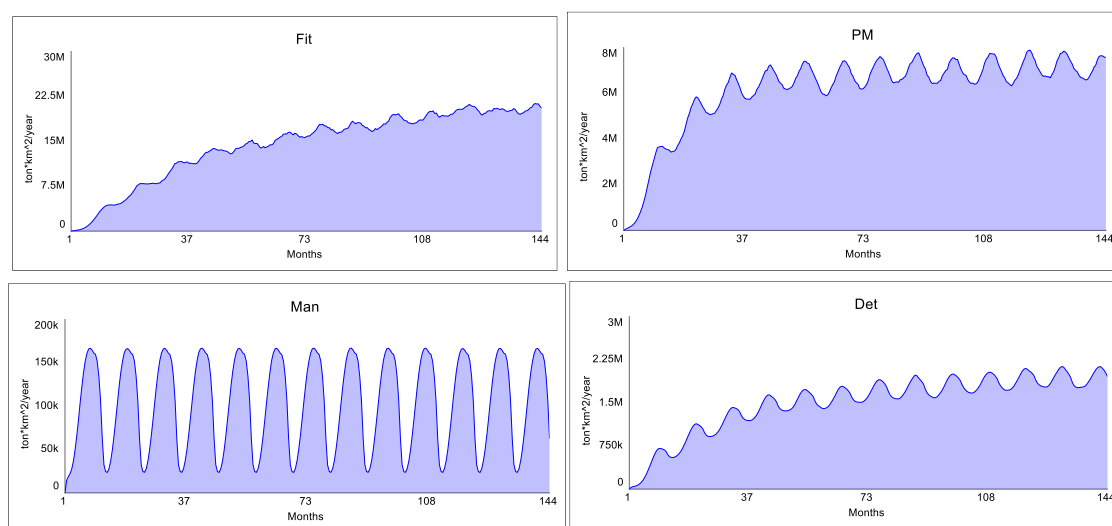
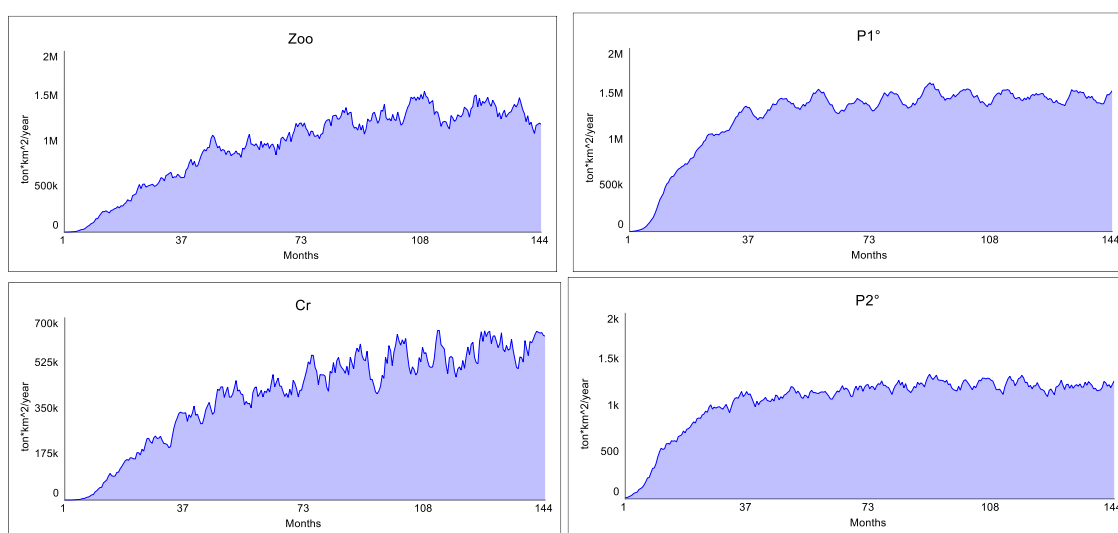


Figura III.5. Comportamiento temporal de los productores primarios (Fit=fítoplancton, PM= pastos marinos, Man= manglar de borde, Det=detritus) en un periodo de ciento cuarenta y cuatro meses 144 meses correspondientes del 2010-2021.



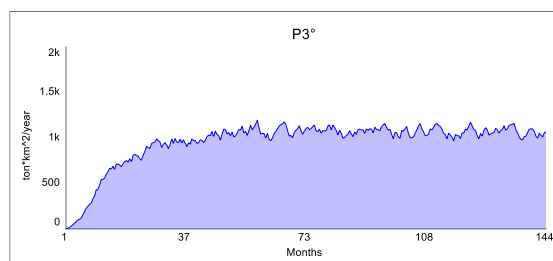


Figura III.6. Comportamiento temporal de los consumidores (Zoo= zooplancton, P1°= pez consumidor primario herbívoro, CR= crustáceos, P2°= peces omnívoros consumidores secundarios, P3°= peces carnívoros consumidores terciarios) en un periodo de ciento cuarenta y cuatro meses correspondientes del 2010-2021.

III.5.4. Diagrama de fase

La figura III.7. muestra básicamente el **diagrama de fase**. En el eje x se encuentran los pastos marinos (variable independiente), en el eje los peces consumidores 1° herbívoros (variable dependiente).

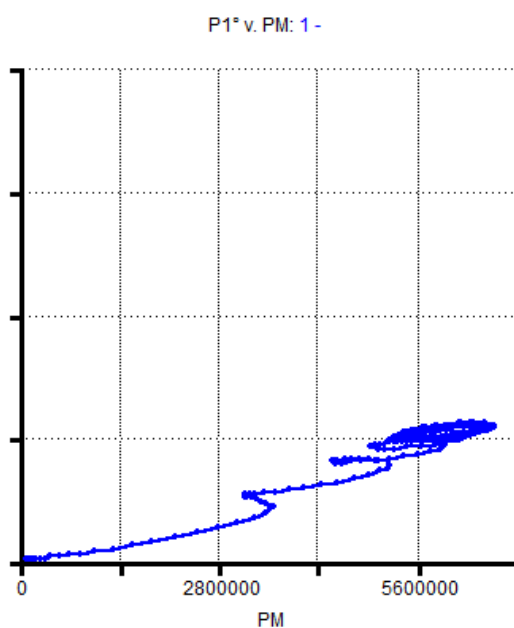


Figura III.7. Diagrama de fase mostrando el ciclo límite del sistema. PH=peces consumidores 1° herbívoros, PM=pastos marinos.

III.5.5. Aportación de biomasa al detritus

En la tabla III.6. se revela la aportación de materia orgánica en descomposición anual al detritus por parte de los organismos que componen la red

trófica. Se observa que los grupos funcionales que contribuyen mayormente al detritus son fitoplancton, pastos marinos y manglar de borde. El manglar es el mayor aportador de materia orgánica con 5,103,752 t/km²/año, seguido del fitoplancton con 2,952,781 t/km²/año y los pastos marinos con 2,563,500 t/km²/año. La alta biomasa de productores primarios se debe en particular a que los ecosistemas costeros están catalogados como los más productivos del mundo, capaces de soportar biomasa más grandes que los ecosistemas terrestres y oceánicos (Cruz *et al*, 2007).

Tabla III.6. Aportación de biomasa de los productores y consumidores al detritus durante un periodo de un año. Fit a Det= Fitoplancton a detritus, PM a Det= Pastos marinos a detritus, Man a Det= Manglar de borde a detritus, Zoo a Det= Zooplancton a detritus, P1° a Det= Peces consumidores primarios herbívoros a detritus, Cr a Det= Crustáceos a detritus, P2° a Det= Pez secundario a detritus, P3°= pez terciario a detritus.

12/03/2024		Aportación a det (Untitled Table)						
Months	Fit a Det	PM a Det	Man a Det	Zoo a Det	PH a Det	Cr a Det	P2° a Det	P3° a Det
Jan: Initial								
Jan	4,908	4,847	82,224	48	673	303	381	
Feb	13,536	13,114	83,518	299	3,429	1,180	1,571	1
Mar	22,750	21,663	98,767	735	8,089	2,711	3,646	2
Apr	37,590	35,434	160,020	1,411	14,385	4,448	6,066	4
May	62,337	58,430	241,202	2,498	24,628	7,451	10,171	5
Jun	100,576	93,825	367,800	4,243	40,616	12,013	16,384	7
July	153,717	142,547	526,476	6,922	64,821	18,909	25,752	9
Aug	219,050	201,451	680,475	10,743	99,053	28,780	39,185	12
Sep	289,084	262,843	782,532	15,736	143,058	41,581	56,710	14
Oct	352,731	315,811	788,874	21,666	193,753	56,356	77,127	18
Nov	397,252	348,249	669,409	28,014	245,230	71,277	98,003	21
Dec	411,826	350,394	424,880	34,020	289,554	83,934	116,025	23

El sistema de la RBLP posee cierta complejidad, ya que presenta 9 variables de estado. La relación existente es *variable de estado = compartimiento = símbolo de almacenamiento = una ecuación de diferencia*. Los valores de los parámetros y las relaciones funcionales se especificaron en los iconos de variables de estado, flujos y parámetros que presenta la interfaz gráfica de Stella. A través de este proceso se genera un conjunto de ecuaciones de diferencias de manera automática realizada por el programa, que se pueden ver directamente en la capa *Ecuación*.

Para ilustrar lo mencionado anteriormente, se presenta una sección de las ecuaciones del modelo en el sistema.

- INIT (nombre del grupo) indica la biomasa inicial (t/km²/año). Por ejemplo, para crustáceos queda establecido como *INIT Cr= 14 t/km²/año*.

- $Cr_a_P2^{\circ} = (CR/P2^{\circ}) * TD_P2^{\circ}$

Expresa una tasa de cambio, en donde la cantidad de biomasa que se transfiere del crustáceo a el pez consumidor secundario es una función de la relación crustáceo a pez consumidor secundario, multiplicado por la tasa de depredación de este último.

- $Cr(t) = Cr(t - dt) + (Zoo_a_Cr + Det_a_Cr - Cr_a_P2^{\circ} - Cr_a_Det - Exp_Cr) * dt$

Es la ecuación de diferencia que describe la dinámica de la población de crustáceos, el flujo de entrada:

$$Zoo_a_Cr = Zoo * TC_Cr; Det_a_Cr = DET * TC_Cr;$$

se resta los flujos de salida:

$$Cr_a_P2^{\circ} = (CR/P2^{\circ}) * TD_P2^{\circ}$$

$$Cr_a_Det = CR * M_Cr$$

$$Exp_Cr = CR * Pérdida_CR$$

en cada paso del tiempo (dt)

III.5.6. Situaciones de inestabilidad en el sistema de la RBLP

Finalmente, se muestra la respuesta a dos circunstancias en las que se presenta algún tipo de alteración en el sistema. El fin de este ejercicio es demostrar a los alumnos que se puede hacer varias hipótesis y comprobar los resultados ejecutándolos en Stella.

Primera situación. Para estudiar cómo la estructura y la dinámica del sistema se relacionan, se efectuó una simulación en la que el ecosistema enfrenta sequía durante 144 meses.

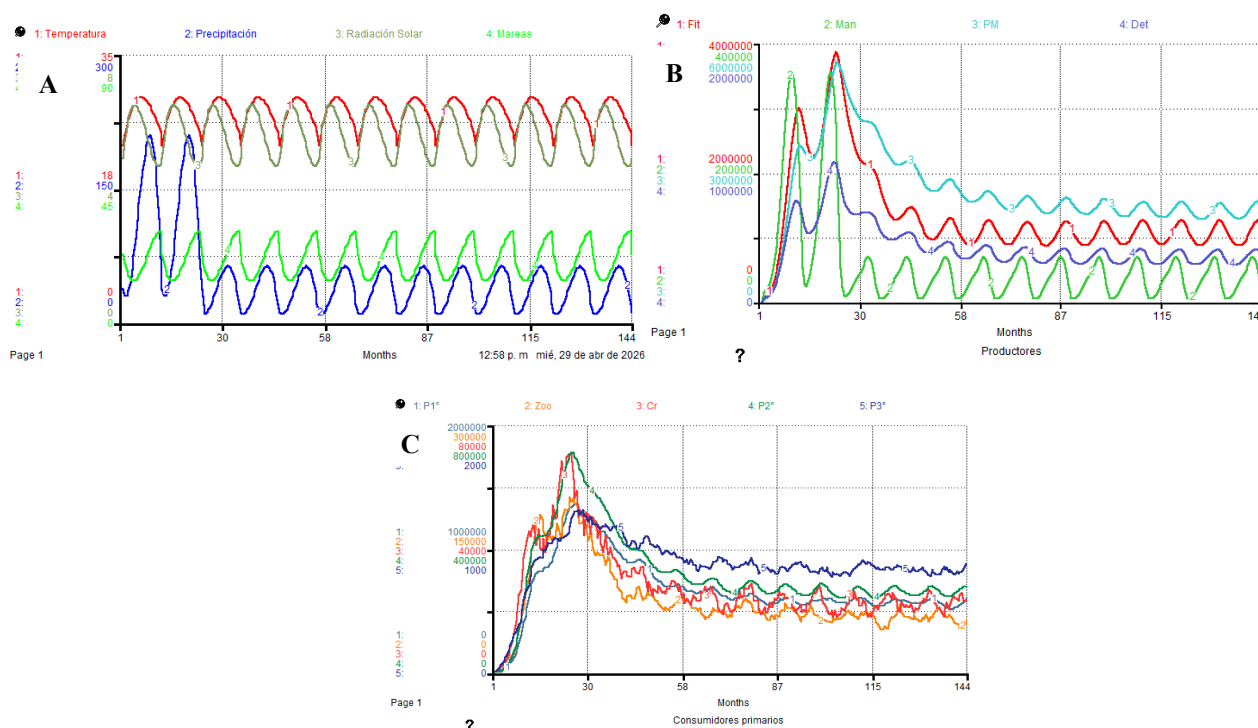


Figura III.8. Comportamiento de la biomasa de productores y consumidores durante un periodo de sequía durante 144 meses. Inciso A, muestra la dinámica de variabilidad ambiental. Inciso B se observa el comportamiento resultante de la biomasa de productores y consumidores (inciso C). Fit=fitoplancton, PM= pastos marinos, Man= manglar, Det=detritus, P1°= peces herbívoros, P2°= peces consumidores secundarios.

Segunda situación. *Thalassia testudinum*, una de las especies representativas de pastos marinos, se está suprimiendo de la trama trófica. ¿Qué pasará con los organismos que dependen de ella para alimentarse? En la Figura III.9 se presenta la biomasa de pastos marinos, pez 1° herbívoro, pez 2°, pez 3° y detritus (PM, P1°, P2°, P3°, Det, respectivamente). El **detritus** ejerce un impacto positivo en los grupos funcionales que se benefician de la biomasa de *T. testudinum* después de su eliminación, que ocurre aproximadamente un año después. Esto es especialmente notable en los peces consumidores secundarios que se alimentan de la materia orgánica en descomposición, así como en su depredador más cercano,

el pez consumidor terciario. Después de 144 meses, el sistema no colapsa en su totalidad.

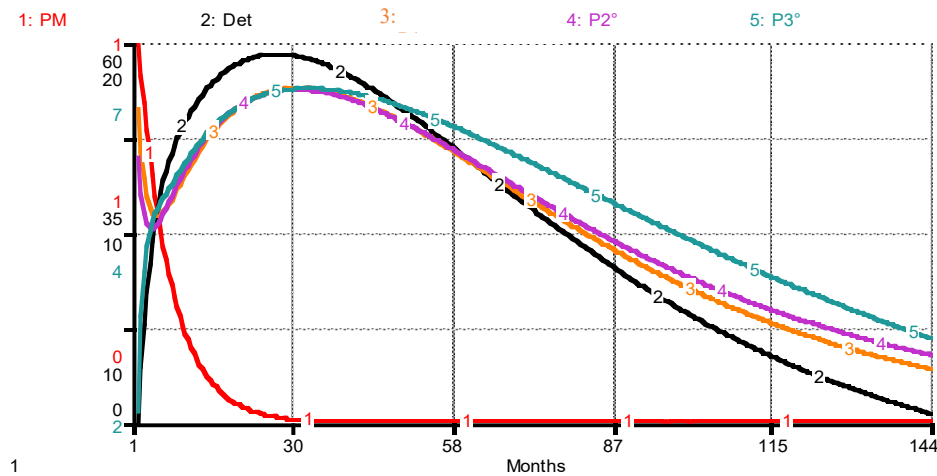


Figura III.9. Comportamiento de la biomasa en la cadena de detritus y de pastoreo en ausencia de los pastos marinos durante un periodo de tiempo de 144 meses. PM= Pastos marinos, P1°= Pez consumidor primario, P2°= Pez consumidor secundario, P3°= Pez consumidor terciario, Det= Detritus.

III.6. DISCUSIÓN

En este capítulo, se llevó a cabo la cuantificación del modelo en Stella utilizando tanto los valores de inicio como las ecuaciones pertinentes. Este modelo tiene como objetivo aportar al conocimiento de la estructura y funcionalidad de este ecosistema, que, pese a su elevada productividad y valor ecológico, posee escasos estudios que analicen sus características y funcionamiento.

Dada la interacción entre los elementos estructurales dentro del sistema, se consideran flujos de biomasa y energía. La aplicación de la teoría general de sistemas y la utilización de Stella para entender problemáticas complejas permiten justificar lo siguiente:

III.6.1. Modelo de simulación

A través del software Stella, se modeló de forma esquemática la trama trófica acuática, destacando la manera en la que los componentes del sistema están vinculados entre sí. Se analizaron los resultados de la simulación, destacando la

importancia del **detritus** como productor primario del sistema. Este componente constituye una reserva energética crucial para la mayoría de los invertebrados bentónicos, que, a su vez, son presas para gran parte de los peces consumidores secundarios y terciarios (Cruz, 2004; Criales *et al*, 2006). Entre los trabajos que sustentan esta relevancia ecológica se encuentran: Santos y Uribe, (1997); Rabalais *et al*, (1999); Ayala-Pérez *et al*, (2008); Agraz-Hernández *et al*, (2012); Pérez-Espinosa *et al*, (2019). Se determinó que tanto la vía del pastoreo como la del detritus son utilizadas alternada y consecuentemente. Ambas son de gran importancia ecológica para las primeras etapas de crecimiento de las especies.

III.6.2. Variabilidad ambiental

La variabilidad ambiental en la región de Los Petenes está condicionada principalmente por la temporalidad climática, los procesos oceanográficos como el sistema de mareas, los procesos climático-meteorológicos y por la condición geográfica que implica la extensión de la plataforma continental, caracterizada por su baja profundidad (Ayala-Pérez *et al*, 2014; Castillo-Rivera *et al*, 2005; Lara-Lara *et al*, 2008).

De acuerdo con la simulación, durante un periodo de 12 meses, la producción de biomasa de los productores primarios aumenta durante las temporadas de lluvias (Figura III.3). Los productos de la fotosíntesis son distribuidos en los tejidos de estas especies para producir órganos o ser **almacenados** como recursos gracias a la temporada de secas (Cervantes-Maldonado y Quintero, 2016). Durante la época de nortes, las mareas presentan una mayor actividad, lo que implica un mayor desplazamiento y traslado de nutrientes entre ecosistemas cercanos dentro y fuera de la RBLP. Esto coincide con lo que reporta la CONANP (2006), en el que se menciona que las mareas son uno de los principales mecanismos de aporte de nutrientes y agua salada en Los Petenes. Además, la baja pendiente en la plataforma continental y los fuertes vientos que lo acompañan, favorecen las inundaciones constantes, principalmente durante el otoño e invierno. Como consecuencia, la aportación de materia orgánica

y nutrientes es abundante, lo que garantiza un amplio suministro de alimento para los consumidores y favorece el aumento de biomasa de los organismos que se alimentan de ella. Estas consideraciones tienen como base las observaciones de campo sobre las cadenas tróficas basadas en el detritus y en el pastoreo en zonas costeras de autores como Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez (1999), Landínez-García *et al.* (2009), Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega (2010) y Day *et al.* (2012). Por su parte, se determina que la comunidad de peces controla las tramas alimenticias como consumidores y presas para otros organismos, coadyuvando al ciclo de nutrientes y conformando los hábitats biofísicos a través de ingeniería ecológica (Holmlund y Hammer, 1999). Constituyen una forma de almacenamiento de energía dentro del ecosistema y actúan como un agente regulador de la energía mediante sus movimientos, que pueden ser cíclicos o irregulares, dentro y fuera del sistema (Criales *et al.*, 2006).

La contribución de la consulta especializada permitió simular en Stella un periodo de ciento cuarenta y cuatro meses (Figura III.4), en el que se estableció que las fluctuaciones cíclicas de la estacionalidad en el comportamiento ambiental tienen similitudes con el comportamiento de la biomasa, tanto en el sector de los productores como en el de los consumidores (Figura III.5 y III.6, respectivamente). Con todo lo anterior, se observa que la fuerza motriz, calorífica y energética por parte de variabilidad ambiental controla el ritmo de la producción de biomasa de los productores primarios, así como de la trama trófica en consecuencia.

III.6.3. Diagrama de fase

La Figura III.7 muestra cómo el flujo de materia y energía del ecosistema de la RBLP sigue una ruta periódica. En el diagrama se observa que los puntos convergen, lo que significa que el sistema tiende a la **estabilidad**. Si el sistema se encuentra oscilando, y existe una pequeña perturbación que lo saca de este ciclo, habrá **inestabilidad** en el sistema. Este comportamiento define un **ciclo límite**, cuya naturaleza atractora garantiza la estabilidad asintótica del sistema ante perturbaciones.

III.6.4. Aportación de biomasa hacia el detritus

El Cuadro III.5 muestra los grupos funcionales que aportan biomasa en descomposición hacia el detritus anualmente (Cuadro III.5). Estos son: manglar de borde (5,103,752 t/km²/año), fitoplancton (2,952,781 t/km²/año) y pastos marinos (2,563,500 t/km²/año). Los resultados de la aportación de biomasa del manglar de borde al detritus coinciden con los datos reportados por Agraz-Hernández *et al*, (2012) en un ecosistema similar en el Golfo de México y el Caribe, donde se presenta que el aporte de hojarasca de *Rhizophora mangle* (una especie representativa en el sistema de Los Petenes) tiende a incrementarse durante la época de lluvias (de mayo a octubre), como se muestra en los resultados obtenidos en Stella (Figura III.10).

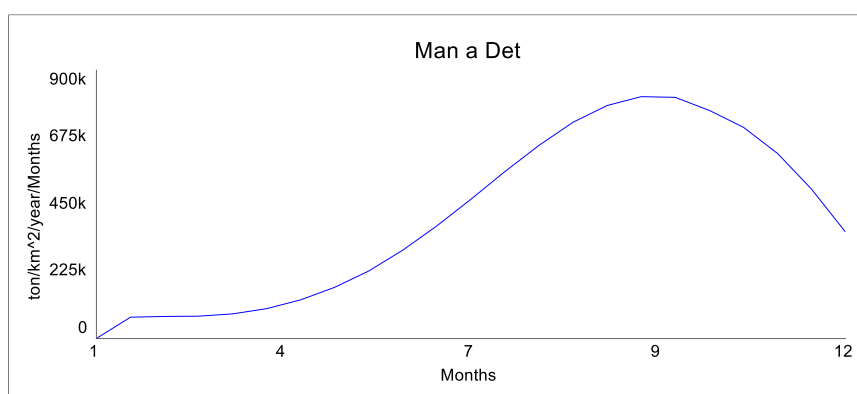


Figura III.10. Aportación de biomasa en forma de hojarasca de *Rhizophora mangle* al detritus durante un año en la RBLP.

En el caso de los pastos marinos, los resultados de la simulación concuerdan con los datos proporcionados por Gallegos-Martínez *et al*, (2019) para esta misma reserva (RBLP). De acuerdo con los autores, se reporta que la mayor concentración de biomasa total de *T. testudinum* se presentó durante la temporada de lluvias, en donde los valores de biomasa total alcanzaron su máximo valor, como se observa en la Figura III.11.

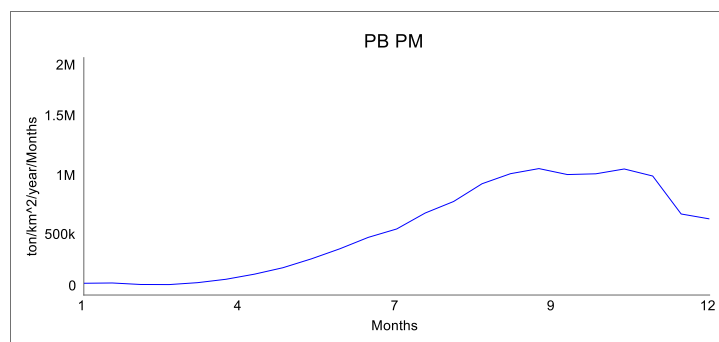


Figura III.11. Producción de biomasa total de *T. testudinum* durante un año en la RBLP.

III.6.5. Situaciones de inestabilidad en el sistema de la RBLP

La estructura del modelo de simulación permite analizar determinadas conductas de las variables de estado en diversas circunstancias. La figura III.8 (inciso A) se muestra como ejemplo, en donde las precipitaciones en la RBLP se reducen significativamente. Para la dinámica de los productores, durante los primeros 30 meses, se observan picos de crecimiento de la biomasa seguidos de caídas drásticas (figura III.8, inciso B). El **fitoplancton** y el **manglar de borde** muestran una vulnerabilidad extrema; de hecho, el manglar toca el valor cero en múltiples puntos, indicando periodos de mortandad casi total. Tras el mes 58, el sistema entra en un ciclo de oscilaciones constantes pero con una biomasa mucho menor a la capacidad de carga inicial. La sequía restringe el crecimiento, forzando al sistema a mantener una estructura más limitada para sobrevivir. En cuanto a la dinámica de los consumidores (figura III.8, inciso C), replican la dinámica de los productores. Tras el mes 30, la biomasa de las poblaciones cae drásticamente. La dinámica se vuelve más predecible pero menos vigorosa. La estructura ahora está definida por la escasez: menos productores para sostener a los consumidores, lo que resulta en poblaciones más pequeñas y vulnerables a cualquier otra perturbación externa.

En el segundo caso hipotético de inestabilidad del ecosistema, se buscó destacar las consecuencias de eliminar un eslabón en la trama trófica. Al suprimir a *Thalassia testudinum*, se inicia un colapso en cadena debido a su rol como uno de los productores primarios y base del ecosistema (figura III.9). El detritus

muestra un pico inicial importante, esto ocurre porque al morir los pastos marinos, se convierte masivamente en materia orgánica en descomposición. Sin embargo, una vez que ese acabe esa fuente, los organismos detritívoros también se quedan sin sustento.

En ambas situaciones de inestabilidad mostradas se puede observar que el sistema no colapsa de manera inmediata, lo que pone de relieve la relevancia del detritus como una especie trófica esencial porque desempeña funciones críticas en la organización y el mantenimiento de los ecosistemas (Polis y Strong 1996; Crawley 1997). Odum (1969), Rodríguez (2000) y Paruelo y Batista (2003) enfatizaron su importancia en el soporte de las redes tróficas, lo que condujo a un marco ecosistémico que divide las interacciones tróficas y el flujo de energía en las redes alimentarias hacia una vía de pastoreo, donde la energía se origina a partir de productores primarios y detritus. Wetzel (1983), Odum y Biever (1984) resaltaron que la mayor parte de la energía en muchas redes alimentarias fluye a través de vías detríticas. El **detritus** actúa como grupo regulador y permite que los flujos de niveles tróficos inferiores regulen los procesos en los niveles tróficos superiores en la red, lo que contribuye a la estabilidad del ecosistema (el cual se conoce como control de abajo hacia arriba, *bottom-up*), gracias a la alta disponibilidad del detritus como fuente de energía primaria (Zetina-Rejón *et al.*, 2003). El control *bottom-up* se refiere a ecosistemas en los que el suministro de nutrientes, la productividad y el tipo de productores primarios (plantas y fitoplancton) controlan la estructura del ecosistema. Si no hay suficientes recursos o productores en el ecosistema, no queda suficiente energía para el resto de los organismos de la trama trófica debido a la biomagnificación y la eficiencia ecológica (Lynam *et al.*, 2017). De acuerdo con Pérez España y Arreguín Sánchez (1999) existe una estrecha relación de la estabilidad del sistema con la capacidad de utilización del detritus. Afectan la estructura trófica y la dinámica de las comunidades, tienen el potencial de sustentar una mayor diversidad de especies y una mayor biomasa de depredadores y cadenas tróficas más largas que las que sustentarían los autótrofos vivos por sí solos.

El modelo de simulación de la RBLP, mediante sus flujos energéticos, proporcionó datos útiles para comprender y entender el sistema desde una perspectiva ecosistémica. Sin embargo, aún es posible mejorar su estructura. Es importante mencionar que, en el medio natural, la variabilidad ambiental y los factores como la tasa de muerte, tasa de consumo y tasa de depredación son raramente constantes fijas. Dependerá de una variedad de factores. Así, es posible incluir un **proceso estocástico** al modelo para representar magnitudes aleatorias que varían con el tiempo. Con esto, la simulación se representaría aún más cercana a la realidad. Por otro lado, resulta apropiado incluir algunas actividades antrópicas como la pesca o la explotación de otro recurso, de este modo es posible observar los impactos que tendrán en el sistema, dado que se reconoce que los seres humanos, con su diversidad de orígenes culturales, son un componente esencial e integral de los ecosistemas.

Finalmente, al crear el diagrama y las conexiones de los elementos que componen el sistema, Stella demostró ser muy versátil. Fue una herramienta adaptable para presentar los resultados en una variedad de formas, no solo como una gráfica a través del tiempo. La complejidad de los procedimientos matemáticos para este tipo de modelos aumenta. Sin embargo, el software lo realizó de manera automática y con gran rapidez.

No obstante, el programa presenta algunos inconvenientes.

1. El idioma. Aunque esto no es un obstáculo que impide el aprendizaje del programa y la creación de modelos básicos, resulta bastante difícil el uso de ciertas herramientas, en particular las más sofisticadas. El lenguaje es muy especializado, ya que se centra principalmente en la ingeniería. Esto se puede observar al utilizar y examinar la opción *builtins* (funciones integradas).
2. Aunque el programa ofrece asistencia, algunos botones de la barra de herramientas de la capa *Interface* no tienen funciones claras, por lo que no se pueden explotar sus propiedades.

3. Stella es una herramienta costosa que no está al alcance de muchos estudiantes. Aunque ofrece la posibilidad de su uso en línea, es bastante restringido y solo permite la creación de modelos sencillos de no más de tres variables de estado.

III.7. CONCLUSIONES

- Una manera de entender la complejidad de los ecosistemas acuáticos ha sido a través de la elaboración de modelos, los cuales se definen como descripciones consistentes que enfatizan ciertos aspectos del sistema investigado para comprender su función
- El desarrollo del modelo respaldado por Stella implicó tres niveles: Estructura general del modelo, diagrama de flujo y ecuaciones específicas de resta diferencial
- En las escalas de tiempo más inmediatas, el detritus afecta la estructura trófica y la dinámica de las comunidades, tiene el potencial de sustentar una mayor diversidad de especies y sustentar una mayor biomasa de depredadores y cadenas tróficas más largas que las que sustentarían los autótrofos vivos por sí solos.
- El detritus actúa como grupo regulador que amortigua los impactos tróficos en la comunidad de la RBLP, favoreciendo que los flujos de la parte inferior regulen los procesos de la superior en la red trófica.
- Este ecosistema costero se mantiene de la energía y nutrientes importados (desde las fronteras continental y marina). Sus interacciones se ven fuertemente influenciadas por la variabilidad ambiental.

III.7. BIBLIOGRAFIA

- Agraz Hernández, C. M., Osti Sáenz, J., Chan Keb, C. A., Chan Canul, E., Gómez Ramírez, D., Requena Pavón, G., Reyes Castellanos J. E. (2012). Programa regional para la caracterización y el monitoreo de ecosistemas de manglar del Golfo de México y Caribe Mexicano: Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México. Informe Final SNIB-CONABIO. Proyecto FN010. México, D.F.
- Ayala Pérez, L. A., Ramos Miranda, J., Flores Hernández, D., Vega Rodríguez, B. I., Moreno Medina, U. C. (2008). Biological and ecological characterization of the catfish *Cathorops melanopus* (Gunther 1864) off the coast of Campeche, Mexico. *Cienc. Mar.* 34: 453-465 pp.
- Ayala Pérez, L. A., Martínez Romero, G. E. (2011). Peces Costeros tropicales: Modelo de simulación para una laguna costera del sur del Golfo de México. Editorial Académica Española. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Alemania. 201 p.
- Barreiro Güemes, M. T., Aguirre León, A. (1999). Distribución espacio-temporal de la biomasa fitopláctica en el sistema lagunar Pom-Atasta, Campeche, México. *Revista De Biología Tropical*, 47(S1): 27–35 pp.
- Ayala Pérez, L. A., Vasco Villa, O., Sosa López, A. (2014). Evaluación de las asociaciones de peces dominantes influenciados por el ciclo nictemeral y la variación temporal en la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche, México. *Ciencia UAT*, 9(1): 33-43 pp.
- Carter, J. (1998). Two Visual Programming Languages for Simulation Modeling: Stella 5.0 and Modelmaker 3.0. *Bulletin of the Ecological Society of America*. 79 (4): 237–239 pp.
- Castillo Rivera, M., Montiel M., Sanvicente Añorve L., Zárate R. (2005). Spatial, seasonal and diel distribution patterns of two species of mojaras (Pisces: Gerreidae) in a Mexican tropical coastal lagoon. *Journal of Applied Ichthyology* 21: 498-503 pp.

- Cervantes Maldonado, A., Quintero, E. (2016). La importancia de conservar las praderas de pastos marinos. CONABIO. Biodiversitas, 128:12-16 pp
- CONANP. (2006). Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biosfera Los Petenes Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.
- Costanza, R. (1999). The Ecological, Economic, and Social Importance of the Oceans. *Ecological Economics*, 31: 199-213 pp.
- Crawley, M. J. (1997). *Plant Ecology*. Blackwell Science, University Press, Cambridge.
- Criales-Hernández, M. I., García, C. B., Wolff, M. (2006). Flujos de biomasa y estructura de un ecosistema de surgencia tropical en La Guajira, Caribe colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 54(4), 1257-1282.
- Cruz-Escalona, V. H., Zetina-Rejón, M. J., Arreguín-Sánchez, F. (2007). Modelación trófica y flujos de energía del ecosistema costero de Seybaplaya, Campeche, México. *Ciencias Marinas*, 33(1), 1-16.
- Day, J. W. Jr., Kemp, W. M., Yáñez Arancibia, A., Crump, B. C. (eds) (2012) *Estuarine ecology*, 2nd edn. Wiley-Blackwell, Hoboken, 568 p.
- Di Bitetti, M. S. (2008). Depredadores topos y cascadas tróficas en ambientes terrestres. *Ciencia Hoy*, 18(108), 32-41. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/61422>
- DiToro, D. M., O'Connor, D. J., Thomann, R.V. (1971). A dynamic model of the phytoplankton populations in the Sacramento-San Joaquin Delta. *Adv. Chem. Ser.*, 106: 131-180 pp.
- Fisher, D. M. (2018). Reflections on Teaching System Dynamics Modeling to Secondary School Students for over 20 Years. *Systems*, 6 (12).
- Gallegos Martínez, M. E., Ramírez Romero, P., Hernández Cárdenas, G., Herrera Moro Chao, I. R., Pérez Espinosa, I., Ocampo Álvarez, H., Arellano López, I., Márquez Labastida, G., Valdez Cruz, F., Hernández Elizalde, E., García Pacheco, R., Ordoñez Gasca, F. G. (2019). Informe final: Fortalecimiento de la línea base del golfo de México: Indicadores del

estado de salud de las comunidades de pastos marinos en la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, México.

- Holmlund, C. M., Hammer, M. (1999), Ecosystem services generated by fish populations. *Ecological Economics*. 29 (2): 253-268 pp.
- Landínez García, R. M., Ospina Guerrero, S. P., Rodríguez Castro, D. J., Arango, R., Márquez, E. (2009). Análisis genético de *Lutjanus synagris* en poblaciones del Caribe Colombiano. *Ciencias marinas*, 35(4), 321-331.
- Lara Domínguez, A. L., Yáñez Arancibia, A. (1999). Productividad secundaria, utilización del hábitat y estructura trófica. In: Yáñez Arancibia A., Lara Domínguez A. L. (eds.), *Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Instituto de Ecología, México; UICN/HORMA, Costa Rica; NOAA/NMFS, Silver Springs, MD, USA, pp. 153–166.
- Lara Lara, J. R., Arenas Fuentes, V., Bazán Guzmán, C., Díaz Castañeda V., Escobar Briones E., García Abad M. de la C., Gaxiola Castro G., Robles Jarero G., Sosa Ávalos R., Soto González L. A., Tapia García M., Valdez Holguín J. E. (2008). Los ecosistemas marinos. *En: Soberón, J., G. Halffter y J. Llorente-Bousquets. Capital Natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO. México.
- Lynam, C. P., Llope, M., Möllmann, C., Helaouët, P., Bayliss-Brown, G. A., Stenseth, N. C. (2017). Interaction between top-down and bottom-up control in marine food webs. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*, 114(8):1952-1957 pp.
- Odum, E.P. (1969). The strategy of ecosystem development. *Science*, 164: 262–279 pp.
- Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of ecology*. W. B. Saunders Co. Philadelphia. 574 p.
- Odum, E. P., Biever, L. J. (1984). Resource quality, mutualism, and energy partitioning in food chains. *Am. Nat.*, 124: 360–376 pp.
- Odum, H. T. (1983). *Systems Ecology: and Introduction*. John Wiley. New York. 644 p.

- Paruelo, J. M., Batista, W. (2003). El flujo de energía en los ecosistemas. En *Fundamentos de Ecología: Su enseñanza con un enfoque novedoso*. 97-112 pp.
- Patonai, K., Fábán, V.A. (2022). Comparison of three modelling frameworks for aquatic ecosystems: practical aspects and applicability. *Community Ecology*, 23: 439–451 pp.
- Pérez España, H., Arreguín Sánchez F. (1999) A measure of ecosystem maturity *Ecol. Model.*, 119: 79-85 pp.
- Pérez Espinosa, I., Gallegos Martínez, M. E., Ressler, R., Valderrama Landeros, L. H., Hernández Cárdenas, G. (2019). Distribución espacial de la vegetación acuática sumergida en los Petenes, Campeche. *Terra Digitalis*, 3, (2).
- Polis, G. A., Strong, D. R. (1996). Food web complexity and community dynamics. *Am. Nat.*, 147: 813–846 pp.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., Justic, D. D., Wiseman Q. W. J. Jr. (1999). Characterization of Hypoxia: Topic 1 Report of Integrated Assessment of Hypoxia in the Gulf of México. Silver Spring (MD): NOAA Coastal Ocean Office. Decision Analysis Series (15).
- Rodríguez, S. R. (2000). Transferencia de recursos alimentarios entre diferentes ambientes del ecosistema marino. *Revista Chilena de Historia Natural*, 73(1), 199-207.
- Santos, J., Uribe, J.A. (1997). Composición y abundancia de camarón rosado en aguas estuarino-costeras de Champotón e Isla Arena, Campeche, durante 1994. CRIP Lerma, Campeche, Informe Técnico del INP.
- Shoemaker, C. A. (1977). Mathematical Construction of Ecological Models. in: Hall and Day Jr. 1977. *Ecosystem Modelling*. John Wiley and Sons. N.Y. 684 pp
- Vega Cendejas, M. E. (1998). Trama trófica de la comunidad nectónica asociada al ecosistema de manglar en el litoral norte de Yucatán. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Villalobos Zapata, G. J., Mendoza Vega, J. (Coord.), (2010). La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México, 730 p.
- Wetzel, R. G. (1983). Limnology, 2nd ed. Saunders College Publishing, Philadelphia, PA.
- Zetina Rejón, M. J., Arreguín Sánchez, F., Chávez, E. A. (2003). Trophic structure and flows of energy in the Huizache-Caimanero lagoon complex on the Pacific coast of Mexico. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57: 1-13 pp.

CAPITULO IV.

Metodología activa y la dinámica de sistemas como herramienta de aprendizaje.

RESUMEN

Es factible combinar metodologías activas de aprendizaje con la dinámica de sistemas para orientar a los estudiantes de ciencias biológicas en la instrucción de la modelización de sistemas. Las metodologías activas son procesos interactivos basados en la comunicación profesor-estudiante, estudiante-estudiante, estudiante-material didáctico y estudiante-medio que potencia la implicación responsable de este último y conlleva la satisfacción y enriquecimiento de docentes y estudiantes. Así, se podrá aprovechar el potencial que proporciona la perspectiva sistémica y la formalización del conocimiento para avanzar cualitativamente en la comprensión del funcionamiento de los sistemas ecológicos con el fin de capacitar a los nuevos investigadores, científicos y tomadores de decisiones, en la búsqueda de nuevas alternativas para enfrentar a los problemas socioambientales existentes. Se presenta una descripción metodológica que hace uso del modelo de simulación de la RBLP como material didáctico en conjunto con la metodología activa de aprendizaje y de pensamiento sistémico, con la finalidad de asistir a los alumnos de la Licenciatura en Biología a la modelización de sistemas a través del taller ***“Introducción al modelado de sistemas ecológicos mediante el software Stella”***. En este taller, se trabajó con una serie de ejercicios: un modelo de crecimiento poblacional de peces, crecimiento poblacional denso-dependiente, un modelo presa-depredador y el modelo de simulación de la trama trófica en la RBLP, en donde los estudiantes tuvieron la oportunidad de interactuar y experimentar con él. Se aplicó una encuesta Likert de diez preguntas a todo el grupo para evaluar las capacidades y el entendimiento del tema del instructor, el entendimiento y aprendizaje del modelo de la RBLP y los ejercicios efectuados, además de la aportación al aprendizaje de los estudiantes en el módulo de Análisis de sistemas ecológicos. La metodología participativa mostró grandes ventajas, favoreció el

intercambio de conocimientos y experiencias entre los asistentes y el instructor, estimuló el trabajo colectivo, promovió la aplicación práctica de lo que se aprende. Stella representó una herramienta importante en el aprendizaje de los asistentes, descubrieron las relaciones entre las variables en un sistema mediante el uso de diagramas, gráficos y animaciones que se pueden encontrar en el programa. El aprendizaje que obtuvieron los alumnos del módulo pudo brindarles una comprensión general de los principales conceptos utilizados en los sistemas, la capacidad de desarrollar y ejecutar modelos de simulación mediante el programa Stella y la motivación para continuar activamente su educación en modelización de sistemas ecológicos. Los resultados obtenidos muestran que hay un aumento en aprendizaje pre y post empírico.

ABSTRACT

It is feasible to combine active learning methodologies with system dynamics to guide biological sciences students in the instruction of systems modeling. Active methodologies are interactive processes based on teacher-student, student-student, student-didactic material and student-environment communication that enhances the responsible involvement of the latter and leads to the satisfaction and enrichment of teachers and students. Thus, the potential provided by the systemic perspective and the formalization of knowledge can be taken advantage of to qualitatively advance in the understanding of the functioning of ecological systems in order to train new researchers, scientists and decision makers, in the search for new alternatives to face existing socio-environmental problems. A methodological description is presented that makes use of the RBLP simulation model as teaching material together with the active learning methodology and systemic thinking, with the purpose of assisting students of the Bachelor of Biology in the modeling of systems through the workshop *"Introduction to the modeling of ecological systems using the Stella software"*. In this workshop, a series of exercises were worked on: a fish population growth model, density-dependent population growth, a predator-prey model and the simulation model of the food web in the RBLP, where the students had the

opportunity to interact and experiment with it. A ten-question Likert survey was applied to the entire group to evaluate the instructor's abilities and understanding of the topic, the understanding and learning of the RBLP model and the exercises carried out, in addition to the contribution to the students' learning in the Ecological Systems Analysis module. The participatory methodology showed great advantages, it favored the exchange of knowledge and experiences between the attendees and the instructor, it stimulated collective work, and it promoted the practical application of what was learned. Stella represented an important tool in the learning of the attendees, they discovered the relationships between the variables in a system through the use of diagrams, graphs and animations that can be found in the program. The learning that students obtained from the module was able to provide them with a general understanding of the main concepts used in systems, the ability to develop and run simulation models using the Stella program, and the motivation to actively continue their education in ecological systems modeling. The results obtained show that there is an increase in pre- and post-empirical learning.

IV.1. INTRODUCCIÓN

La falta de entendimiento del comportamiento sistémico dinámico por parte de quienes tienen la responsabilidad de crear políticas que buscan cambiar o disminuir los efectos secundarios no deseados de los ecosistemas, lleva a tomar decisiones que, en el mejor de los casos, son ineficaces; frecuentemente son contraproducentes y, en ocasiones, desastrosas (Grant, 1998). El problema radica en no reconocer las relaciones causales de los sistemas complejos en los que se trabaja (Forrester, 1994). En sistemas muy simples es probable que se identifique correctamente la causa. Sin embargo, en sistemas complejos a menudo esto no es así. Para afrontar esta problemática, la dinámica de sistemas, que se refiere al proceso de conceptualizar, cuantificar, evaluar y emplear un modelo de simulación, debe ser incorporada en la educación universitaria con el fin de mejorar la comprensión de los problemas a tratar y desarrollar correctamente los proyectos de

investigación. Esto permitirá ampliar el diseño de enfoques y políticas exitosas para tratar los problemas desde una perspectiva integral y sistemática (Forrester, 2009). Como resultado, todas las personas preparadas tendrán una mayor comprensión fundamental de los componentes y su interacción en los sistemas.

La **dinámica de sistemas** es una variante del **enfoque sistémico**, el cual surge de la necesidad de resolver problemas complejos, de un cambio en el pensamiento científico y del avance en campos como la cibernética (Pérez, 1999; Mats-Olov y Gunnar, 2004). Debido a su gran flexibilidad ha sido usado en campos de estudio muy diversos como teoría de la organización (Pérez y Vallejo, 2017), sociología (Richmond, 2008), biología (Flood y Jackson, 2000), ingeniería de sistemas (Sherwood, 2002), ingeniería de software (Presman, 1992), ciencia política (Easton, 2001) y psicología (Hoos, 1983), entre otros. La diferencia entre el **pensamiento reduccionista**, hasta entonces dominante, y el **sistémico** es que este último tiene una perspectiva **holística**; es decir, analiza las unidades del sistema como partes de un todo, en vez de estudiarlas como componentes independientes y aislados (Kay, 2006).

La utilización de la dinámica de sistemas en estudios universitarios en distintos países presenta grandes beneficios. Los estudiantes han demostrado la capacidad para analizar el comportamiento dinámico utilizando gráficos a lo largo del tiempo, diagramas de bucle causal y modelos de sistemas dinámicos (Fisher, 2017). Así mismo, han podido demostrar una comprensión del control de retroalimentación, la dinámica no lineal y los retrasos mediante el diseño y la construcción de modelos (Fisher, 2017; Fisher, 2011). Todo este trabajo ha estado ocurriendo durante más de un cuarto de siglo, con el objetivo de enseñar a los estudiantes a construir modelos (NCTM, 2000).

Como se mencionó en el capítulo anterior, **Stella** ha sido utilizado por varios profesores e investigadores en una amplia variedad de áreas de estudio. Se ha empleado en escuelas secundarias para preparar a los estudiantes al **pensamiento sistémico** (Mandinach Cline, 1992) facilitando así la enseñanza de modelización

de sistemas (Reeve, 1992; González, 2019). La cobertura es más completa si el uso de Stella se presenta como parte de una serie de ejercicios en laboratorio en donde participen todos los estudiantes. Darles experiencia en la realización de simulaciones les otorga práctica en el pensamiento conceptual (Blankenship y Tumlinson, 1995).

Es posible combinar **metodologías activas de aprendizaje** en conjunto con la **dinámica de sistemas** para guiar a los nuevos usuarios en la enseñanza de la modelización de sistemas ecológicos. El concepto **metodologías activas** es definido por López-Noguero (2005) como **procesos interactivos** basados en la comunicación profesor-estudiante, estudiante-estudiante, estudiante-material didáctico y estudiante-medio que potencia la implicación responsable de este último y conlleva la satisfacción y enriquecimiento de docentes y estudiantes. De esta manera, las actividades centradas en los alumnos ponen más énfasis en que ellos acepten la responsabilidad de su propio aprendizaje, en lugar de ser únicamente receptáculos de información (Fisher, 2018). Hay más tecnología en las aulas y los estudiantes son cada vez más hábiles en el uso de múltiples herramientas tecnológicas. Así, se podrá aprovechar el potencial que proporciona la perspectiva sistémica y la formalización del conocimiento para avanzar cualitativamente en la comprensión del funcionamiento de los sistemas ecológicos con el fin de capacitar a los nuevos investigadores, científicos y tomadores de decisiones, en la búsqueda de nuevas alternativas para enfrentar a los problemas socioambientales existentes.

Se presenta en este capítulo una descripción metodológica que utiliza el modelo de simulación de la RBLP como material didáctico. Se emplea para ello la metodología activa de aprendizaje y el pensamiento sistémico, con el fin de orientar a los alumnos de la Licenciatura en Biología hacia la modelización de sistemas. Esta labor se ha implementado de la siguiente manera:

- Material didáctico:
 - Trama trófica acuática en la RBLP.

- Manual que contiene algunas funcionalidades de Stella, así como la función de las herramientas, bloques de construcción y capas para construir modelos. También se presenta una revisión de los conceptos básicos de la modelización, así como una descripción del pensamiento sistémico.
- Taller teórico-práctico. Se abordan temas introductorios sobre la dinámica de sistemas en conjunto con los estudiantes, utilizando el material didáctico. Así mismo, se presentan algunos ejercicios de crecimiento poblacional, crecimiento poblacional denso-dependiente y un modelo presa-depredador.

Con ello, se busca que los alumnos adquieran una mayor motivación intrínseca para comprender el tema en comparación con el aprendizaje tradicional. Con la metodología activa y participativa se otorga a los estudiantes un aumento de motivación gracias a las habilidades comunicativas entre ellos junto con el instructor, favoreciendo el intercambio de conocimientos y experiencias, estimulando también el trabajo colectivo, enganchando al alumno a aprender haciendo (Fisher, 2018).

IV.2. OBJETIVO GENERAL

Coadyuvar, mediante metodologías activas y el pensamiento sistémico, al aprendizaje y comprensión de los alumnos de Licenciatura en Biología al módulo Análisis de sistemas ecológicos, así como a la modelización de sistemas complejos, haciendo uso del material didáctico realizado para este proyecto (trama trófica acuática).

IV.3. OBJETIVOS PARTICULARES

- Fomentar las capacidades de los estudiantes para entender la estructura y la función de los ecosistemas, utilizando el enfoque sistémico, elaborando modelos de simulación e identificando el control retroalimentativo a través del programa Stella.
- Examinar los comportamientos dinámicos de los sistemas que se organizan en el taller y la simulación de la RBLP, empleando el método activo de participación.

IV.4. MÉTODOS

IV.4.1. Manual operativo

En este estudio se desarrolló un manual (Figura IV.1), que consta de cuatro capítulos (Figura IV.2.). El contenido se mostró como un curso de autoaprendizaje, cuya lectura se aconseja utilizando el programa Stella en la pantalla de una computadora y realizando cada uno de los pasos presentados. A continuación se detallan los temas de estudio:



Figura IV.1. Manual operativo de autoaprendizaje.



CONTENIDO

Capítulo I

I. Conceptos y aspectos generales	
I.1 ¿Qué es un modelo de simulación?	4
I.2 Concepto de Sistema	4
I.3 Enfoque Reduccionista vs Enfoque Holístico	5
I.4 ¿Modelos simples o complejos?	5
I.5 Dos enfoques de modelado	6
I.6 Sistemas cibernéticos	6
I.7 Energía, trabajo y potencia	8
I.8 Leyes de la termodinámica	8
I.9 Metodología para desarrollar un modelo	9

Capítulo II

II. Construcción de modelos en STELLA	
II.1 Capas	11
II.1.1 Capas Mapa y Modelo	12
II.1.2 Capa Interfaz	15
II.1.3 Capa Ecuación	42
II.2 Barra de herramientas de ejecución	16
II.3 Menú Run	18

Capítulo III

III. Ejercicios	
III.1. Crecimiento poblacional de peces	20
III.2 Crecimiento poblacional denso-dependiente	32
III.3 Modelo presa-depredador	35
III.4 Un poco de matemáticas	42

Capítulo IV

IV. Modelo de simulación de la dinámica ecológica de la Reserva de la Biósfera Los Petenes (RBLP)	44
IV.1 Introducción	47
IV.1.1 Indicaciones para simular el modelo	50
IV.2 Comentarios finales	55

V. Bibliografía	56
-----------------	----

Figura IV.2. Contenido teórico práctico del manual operativo, distribuido en cuatro capítulos.

- a) **Capítulo 1.** Para el primer capítulo se emplearon temas introductorios sobre la dinámica de sistemas. Esta información es básicamente el material presentado de los capítulos iniciales de esta tesis, agregando además, datos y metodologías complementarios acerca de la modelización de sistemas con el apoyo de bibliografía especializada.
- b) **Capítulo 2 y 3.** En los dos capítulos subsiguientes, se presentan una serie de instrucciones de naturaleza práctica, donde se muestran algunas características del programa Stella, tales como la interfaz laboral, capas, barras de herramientas, botones, entre otros.

Además, cuenta con una serie de actividades que los usuarios pueden seguir como ejercicios de práctica.

- c) **Capítulo 4.** En este capítulo, se detalló el procedimiento empleado para elaborar el modelo de simulación de la trama trófica acuática en la RBLP, junto con las directrices para que los usuarios lo empleen durante y posteriormente al taller.

IV.4.2. Taller teórico-práctico

Antes de comenzar con la modelización de sistemas, es necesario presentar a los estudiantes el software y los conceptos básicos de la construcción de modelos. Para ello, se llevó a cabo el taller denominado ***“Introducción al modelado de sistemas ecológicos mediante el software Stella”*** basado en reflexiones realizadas por Fisher, (2018) sobre la enseñanza de modelización de sistemas durante más de 20 años en educación secundaria en Estados Unidos, que contiene metodologías activas de participación, comunicación y material didáctico. El estudio fue presentado a un total de 20 estudiantes y al profesor del módulo *Análisis de sistemas ecológicos* en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco durante los días 18, 19 y 22 de mayo del 2023 con una duración de 6 horas (Figura IV.3.). Sin embargo, la metodología fue adaptada a los tiempos y formas de la institución académica, por lo que se eliminó parte del contenido original.

INTRODUCCIÓN AL MODELADO DE SISTEMAS ECOLÓGICOS MEDIANTE EL SOFTWARE STELLA

Biól. José Manuel Martínez Montes
Maestría en Ecología Aplicada
18, 19 y 22 de mayo de 2023

La modelación de la dinámica de sistemas ha cobrado fuerza en las últimas décadas, es necesaria para entender procesos naturales, pues su complejidad es generalmente abrumadora. Lo interesante de este estudio, consiste en analizar la estructura de un sistema como un todo unificado, más que simplemente acotarlo (Holístico). La modelación es un proceso de aprendizaje, totalmente repetitivo (iterativo y heurístico), que en cada paso se debe construir, revisar, comparar y cambiar el modelo, hasta llegar a una versión final. En cada ciclo se entiende mejor la realidad en estudio.

Es necesario conocer la utilidad de los modelos como herramienta de aprendizaje, antes de su potencial como herramienta de predicción o pronóstico.

Objetivo General

Presentar las funcionalidades del software STELLA, como un recurso para mejorar procesos de enseñanza-aprendizaje construyendo un modelo ecológico basado en la Reserva de la Biosfera Los Petenes (RBLP).

Objetivos Particulares

1. Establecer el uso e importancia del software STELLA.
2. Conocer la importancia que representa la Reserva de la Biósfera Los Petenes como ecosistema costero.
3. Desarrollar ejercicios de modelación de un ecosistema costero para su interpretación
4. Conocer los alcances que ofrece STELLA para generar hipótesis sobre el comportamiento de sistemas ambientales complejos

Actividades para el Cumplimiento de los Objetivos

1. Se describirán las características principales del software STELLA, sus antecedentes como herramienta de simulación y sus bondades para el análisis de sistemas complejos.
2. Se revisará con base en literatura, la estructura y función de la RBLP y se discutirán diversos procesos ecológicos que definen su importancia como ecosistema costero
3. Se desarrollará un ejemplo de un modelo presa-depredador en un ecosistema acuático, interpretando los resultados.
5. Se efectuará un modelo de simulación que represente la red trófica en la Reserva de la Biósfera Los Petenes.

Contenido

DÍA 18 DE MAYO DE 2023

1. INTRODUCCIÓN
2. ENFOQUE REDUCCIONISTA VS HOLÍSTICO
3. ¿QUE METODOLOGÍA UTILIZAMOS PARA DESARROLLAR MODELOS DE SIMULACIÓN?
4. STELLA, ASPECTOS GENERALES Y EL ENTORNO DE TRABAJO

DÍA 19 DE MAYO DE 2023

5. MODELO DE CRECIMIENTO POBLACIONAL DENSO-DEPENDIENTE
6. MODELO PRESA-DEPREDADOR
7. DESCRIPCIÓN DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA LOS PETENES

DÍA 22 DE MAYO DE 2023

8. ELEMENTOS ESTRUCTURALES REPRESENTATIVOS
9. MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA TRAMA TRÓFICA EN LA RBLP
10. CONCLUSIÓN

Figura IV.3. Programa del taller “Introducción al modelado de sistemas ecológicos mediante el software Stella”

El taller contó con un apartado teórico compuesto por una presentación, donde se realizaron distintas preguntas a los alumnos para propiciar su participación y observar su nivel de conocimiento. Para mostrar el entorno de trabajo de Stella, navegar entre las diferentes capas y el uso de cada una de ellas, se llevó a cabo una serie de ejercicios sugeridos por la **Systems Education Experiences (SEE)** de la **Baliga Laboratory at Institute for systems biology** en Estados Unidos, que incluyen: un modelo de crecimiento poblacional de peces, crecimiento poblacional denso-dependiente y un modelo presa-depredador. Con un cierto nivel de conocimiento adquirido del tema, finalmente fue mostrado el modelo de simulación de la **trama trófica en la RBLP**, en donde los estudiantes tuvieron la oportunidad de interactuar y experimentar con él.

IV.4.3. Material didáctico. Modelo de simulación de la Reserva de la Biósfera Los Petenes

Se ha descrito en el capítulo anterior, la validación del modelo basado en la consideración de los aspectos de su estructura y el comportamiento, cuyo objetivo

es contribuir al aprendizaje de estudiantes al análisis de sistemas ecológicos, lo que lo hace potencialmente útil. Para mejorar la interacción entre los estudiantes con el material didáctico, se facilitó el archivo del modelo, que cuenta con una interfaz gráfica con instrucciones puntuadas que guían al usuario a experimentar con él de manera más sencilla. Esta consiste en un panel simulando un laboratorio virtual con botones, perillas, gráficas y tablas (Figura IV.5).

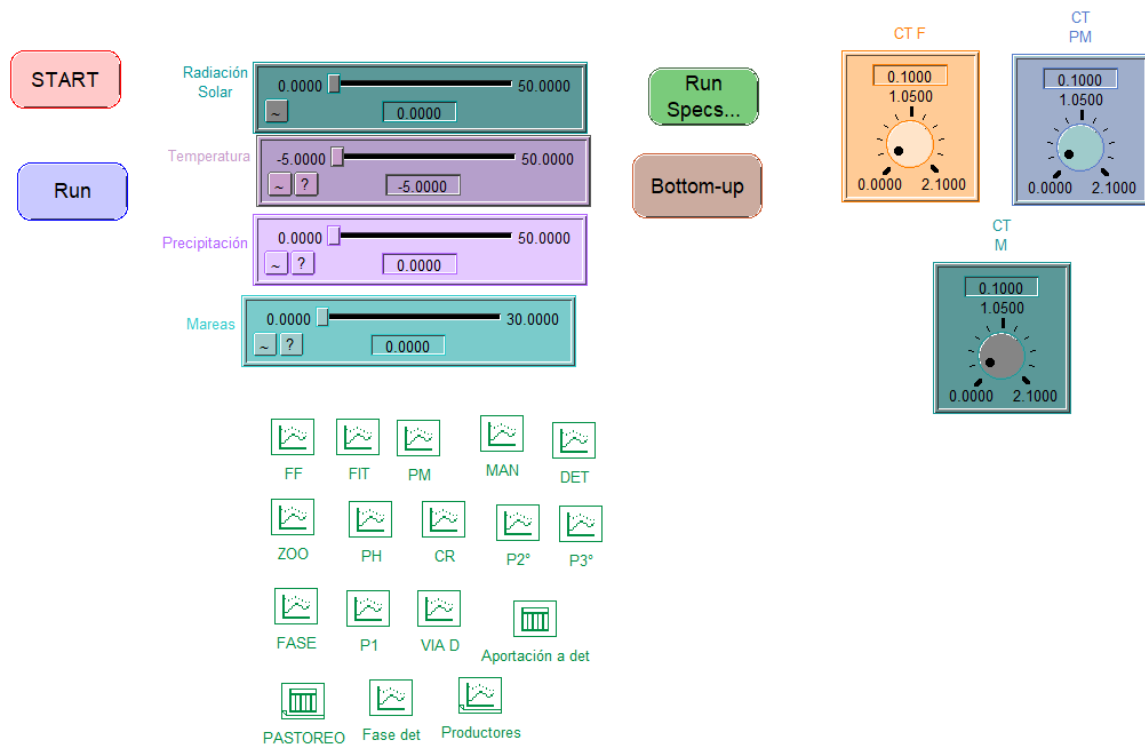


Figura IV.5. Interfaz gráfica de un laboratorio virtual en Stella, con herramientas como perillas, botones y controles deslizantes, para interactuar con las simulaciones del modelo.

Estas herramientas poseen las siguientes funciones:

- **Start.** Se inicia el desarrollo del sistema y las conexiones de forma automática a modo de una historia, lo que permitirá visualizar de forma gradual a los componentes involucrados en la trama trófica.
- **Run.** Se ejecuta la simulación con la posibilidad de ser detenida en cualquier momento.

- **Run specs.** Se configura la longitud de la simulación que se desea establecer, los métodos de integración, unidades de tiempo y la velocidad con la que se ejecuta.
- **Bottom up.** Se explica el papel fundamental que presenta el detritus en ecosistemas costeros.
- Se anexaron también algunos dispositivos de control que permiten cambiar los valores de inicio de las funciones forzantes y las variables de estado.

Se incluyeron gráficos de los resultados de la simulación de la dinámica de la red trófica, las interacciones entre presa-depredador, y la respuesta a las dos situaciones en las que existe algún tipo de perturbación en el sistema, que se muestran en los resultados del capítulo III.

IV.4.4. Evaluaciones del contenido, material didáctico y del modelo de simulación

Se aplicó una encuesta Likert de diez preguntas a todo el grupo (incluido el profesor en turno) para evaluar las capacidades y el entendimiento del tema por parte del instructor, el entendimiento y aprendizaje del modelo y los ejercicios efectuados, además de la aportación al aprendizaje de los estudiantes en el módulo de Análisis de sistemas ecológicos.

IV.5. RESULTADOS

IV.5.1. Taller teórico-práctico, manual operativo y material didáctico

Los estudiantes y el profesor del módulo recibieron el manual y el material didáctico una semana antes del comenzar el taller. El manual contenía un enlace para poder instalar la versión de prueba de Stella en las computadoras personales. Todos habían visto algunos temas sobre modelización de sistemas, por lo que tenían, como mínimo, un conocimiento básico. A pesar de ello, muchos no

presentaban experiencia previa en la construcción de modelos de simulación, y ninguno había utilizado Stella.

Durante el taller, progresaron en las lecciones a su propio ritmo. El aprendizaje se apoyó en la interacción y colaboración efectuada por ellos, el instructor utilizó demostraciones y preguntas capciosas para fomentar su interés y colaboración. Cada una de las sesiones tuvieron una duración de tres horas, en donde los alumnos disponían de sus respectivas computadoras para trabajar. A continuación, se detallan algunos aspectos particulares acerca de la organización y evolución del taller.

▪ **18 de mayo de 2023.**

En el primer día se dio comienzo con la sección teórica. Este segmento sirvió para repasar algunos temas que ya habían visto y reforzar su aprendizaje. Modelo de simulación, sistemas, estructura del sistema y los subsistemas fueron algunos de los conceptos fundamentales que se abordaron. Además, se discutieron generalidades importantes como los tipos de enfoques para desarrollar modelos; diferencias importantes entre sistemas simples y complejos; ecosistemas como sistemas cibernéticos; energía, trabajo potencia; leyes de la termodinámica en los ecosistemas y las metodologías propuestas para modelos de simulación.

Antes de comenzar a practicar, aprendieron a navegar por el entorno de trabajo de Stella (Figura IV.6 y IV.7). Se impartió una lección en la que crearon un modelo genérico a partir de una explicación muy simple. En esta tarea, aprendieron a colocar, nombrar y definir íconos de modelado; generar y leer datos numéricos a partir de gráficos; mejorar la precisión de las variables y revisar la configuración de los modelos.



Figura IV.6. y IV.7. Estudiantes e instructor efectuando los ejercicios para colocar, nombrar y definir íconos de modelado.

▪ **19 de mayo de 2023**

Se trabajó con tres ejercicios, los cuales aumentaban de complejidad a medida que se avanzaba. Los estudiantes anticiparon el comportamiento de los modelos, capturaron los resultados gráficos tratando de explicar cualquier discrepancia entre el resultado producido y el comportamiento anticipado del modelo. A continuación se explica a detalle:

a) Crecimiento poblacional de peces

Se incitó a los alumnos a comunicarse y colaborar en conjunto, pero cada explicación tenía que ser única. Se comenzó con una concepción de las partes importantes del sistema y cómo se interconectan. Este modelo representó una población de peces en crecimiento con recursos ilimitados (Figura IV.8).

Para todos los ejercicios realizados en el curso y antes de llevar a cabo las simulaciones, se les pidió que se dibujara en un papel en blanco un **gráfico de comportamiento a lo largo del tiempo**. La intención de este ejercicio era evaluar los resultados de la manera en que se esperaba que cambiara la población de peces sin depredadores durante un periodo de cincuenta meses. Representaron sus hipótesis fundamentales sobre el funcionamiento del sistema en tiempo real. Una vez efectuado, se procedió a analizar y discutir el resultado de la simulación con la de todos los participantes.

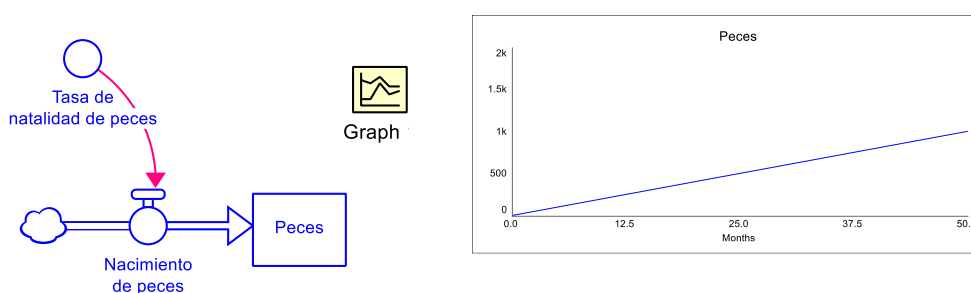


Figura IV.8. Modelo que representa una población de peces con recursos ilimitados, se enfatiza las conexiones.

Un problema con el modelo anterior fue que la población de peces no influía aún en la tasa de nacimiento. De esta manera, los estudiantes ajustaron el sistema para obtener un **crecimiento exponencial** (Figura IV.9).

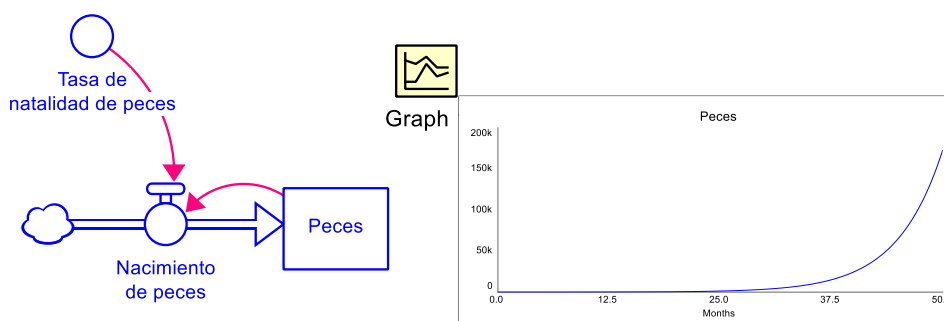


Figura IV.9. Crecimiento exponencial en el que existe una relación directa entre la población de peces y sus nacimientos.

b) Crecimiento denso-dependiente en población de peces

Se continuó trabajando con el modelo anterior. Los estudiantes lograron identificar elementos esenciales faltantes para el sistema, como la **tasa de mortalidad**, ya que los peces no viven eternamente, y la **capacidad de carga** que la población tiene que afrontar en el océano. Cuando los peces se encuentran con esos límites, la tasa de mortalidad aumenta. Entre los alumnos y el instructor efectuaron los ajustes necesarios para obtener el modelo que se muestra en la Figura IV.10.

Algunas preguntas como: ¿por qué tiene sentido la forma de las conexiones entre stocks y convertidores?; ¿qué pasará con la variable de capacidad de carga cuando la población de peces llegue a cierta cantidad, como, por ejemplo, 1000?; ¿qué significará esto para la tasa de mortalidad?; ¿disminuirá o aumentará la población?, fueron realizadas para explicar la importancia de las interacciones, conexiones y de la dinámica del sistema. Para algunos participantes les resultó complicado realizar estos ajustes de manera correcta, a pesar de que sus ideas fueron adecuadas.

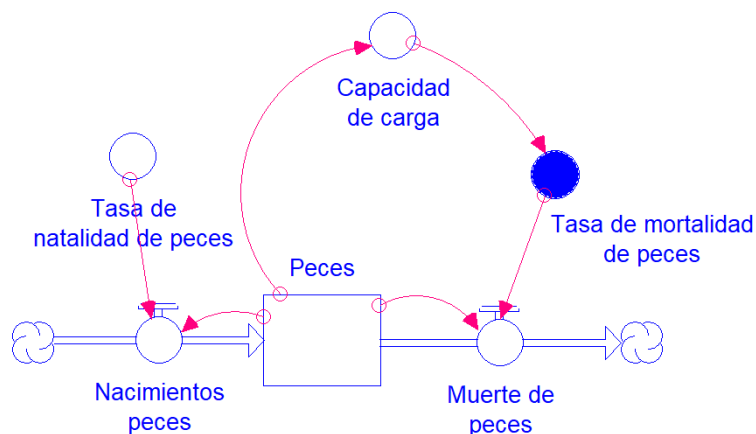


Figura IV.10. Modelo de una población de peces, se muestran las conexiones de la población con la capacidad de carga y la tasa de mortalidad.

Este modelo produjo un gráfico que se conoce como una "S" sigmoidal o **curva logística**. Debido a que el modelo es simple, la curva es suave (Figura IV.11). Con ello, se determinó que los peces crecen a un ritmo acelerado durante un corto período de tiempo, posteriormente, la población se estabiliza cerca de la capacidad de carga ambiental, que en este ejemplo equivale a 1000.

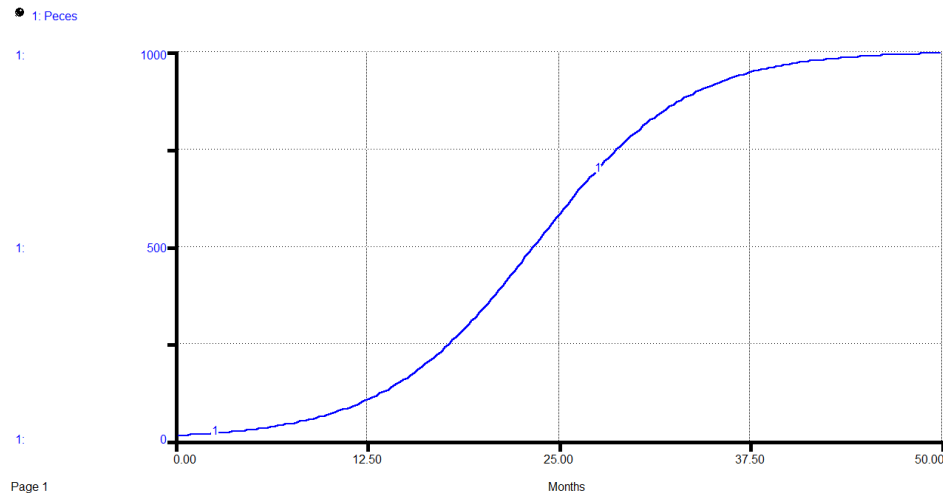


Figura IV.11. Curva logística obtenida mediante la simulación del modelo de crecimiento poblacional de peces durante un lapso de 50 meses.

c) Modelo presa-depredador

Se utilizó de nuevo el modelo previo para incorporar más componentes al sistema y crear un modelo presa-depredador. Un principio fundamental de la dinámica de sistemas fue reforzado en este ejercicio: los **bucles de retroalimentación**, que son también responsables de la dinámica de los modelos porque controlan los cambios en los sistemas con el tiempo. Los estudiantes no solo practicaron construyendo y ajustando este modelo de manera iterativa, también pudieron usar la retroalimentación presente en el modelo para describir su comportamiento.

Hasta este punto, se ha conseguido un modelo simple de una población de peces en crecimiento. Sin embargo, entre todos los participantes se pudo determinar que existen muy pocas poblaciones de forma aislada, por lo que se agregó a un **depredador** (tiburones), para describir las interacciones de la

población de depredadores con la **población de presas** (Figura IV.12). El número de peces que mueren depende de dos variables: la **población de tiburones** y la **población de peces**. Más depredadores significan que se capturan más presas y las poblaciones altas de presas generalmente facilitarán que un depredador las encuentre y capture, aumentando las muertes. Del modelo anterior, se especificó que ningún depredador tiene éxito el 100% de las veces; alguna presa siempre escapará. La relación entre los intentos y los éxitos define la **eficiencia** del depredador: cuanto mayor es la eficiencia, más frecuente es el éxito. Los participantes fueron capaces de efectuar las modificaciones necesarias, dado que la población de tiburones influye en el flujo de mortalidad de los peces. La población de peces y la eficiencia de los depredadores afectan los nacimientos de tiburones, vinculándolos.

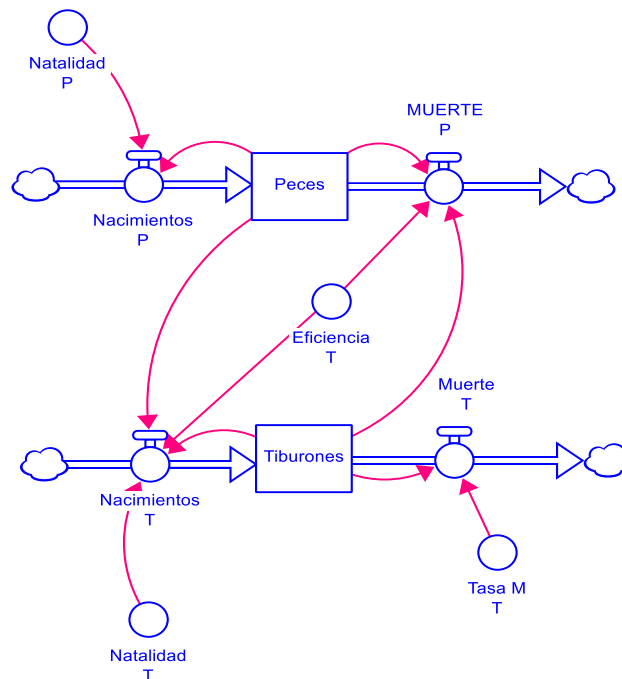


Figura IV.12. Modelo presa-depredador de una población de peces y tiburones.

En la Figura IV.13 se muestra el resultado de la simulación. Se comparó con los resultados de los gráficos realizados por los alumnos que trataron de anticipar el resultado.

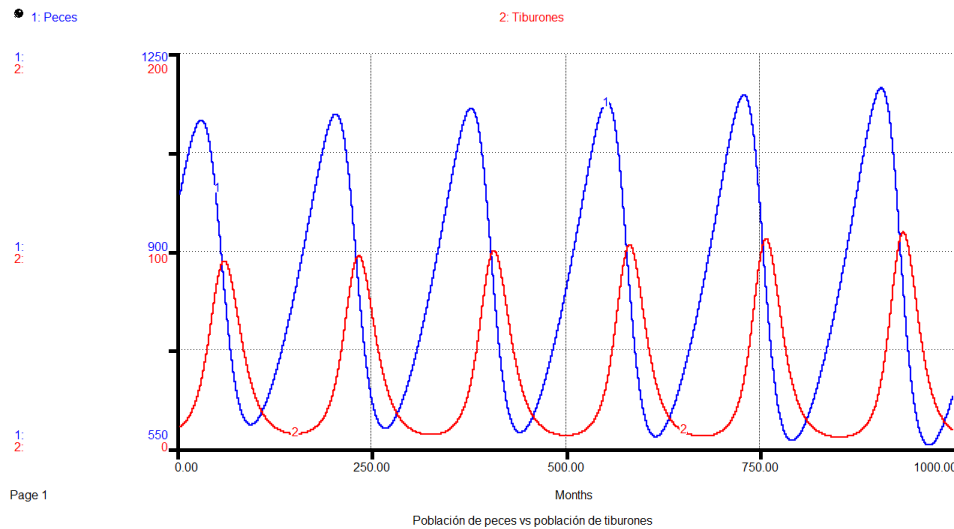


Figura IV.13. Dinámica del sistema presa (azul)-depredador (rojo) en un periodo de tiempo de 1000 meses.

Para explicar mejor la retroalimentación positiva y negativa presente en el sistema, se desarrolló un **diagrama de fase**. En la Figura IV.14 se observa la población de presas como variable independiente y los depredadores como variable dependiente, que cambia en respuesta según las entradas (nacimientos) menos las salidas (muertes). Se interpretó el diagrama de fase y se determinó que la **retroalimentación negativa** es el resultado de las interacciones entre el depredador y la presa. La presa aumenta los depredadores, y los depredadores disminuyen la presa. Esta simple interacción permite que el sistema se autorregule. Cuando los depredadores disminuyen las presas, el pequeño número de estas conduce a la disminución de los depredadores. Con esto, la presa aumenta (**retroalimentación positiva**) y el ciclo continúa.

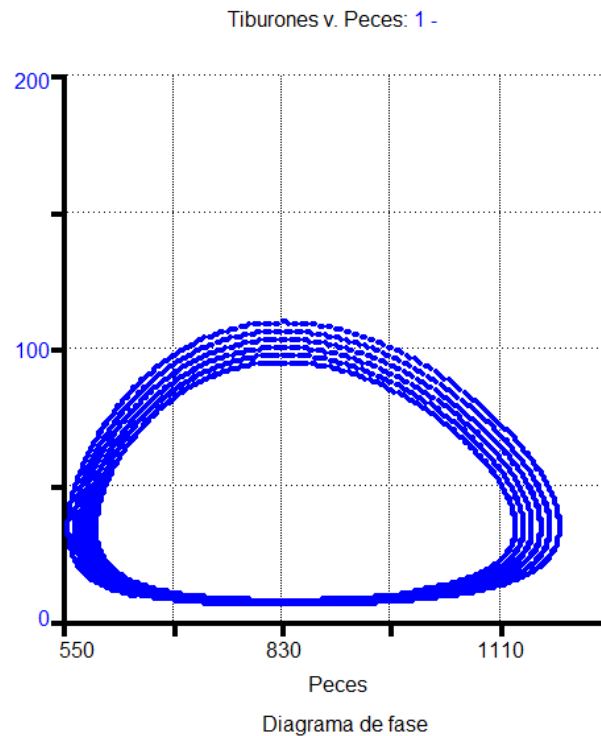


Figura IV.14. Diagrama de fase de la interacción de la población de peces con los tiburones. Se destaca la retroalimentación negativa y positiva, permitiendo la autorregulación del sistema.

- 22 de mayo de 2023

d) Modelo de simulación de la dinámica ecológica de la reserva de la Biósfera Los Petenes (RBLP)

El último día estuvo enfocado en la presentación e interacción del modelo de simulación de la trama trófica en la RBLP (Figura IV.15). Se efectuó una breve presentación en donde se explicó fundamentalmente la metodología desarrollada para la elaboración del modelo, es decir, el trabajo expuesto de los capítulos anteriores de este estudio. Una vez que los alumnos interactuaron con el sistema, hubo una sección de preguntas acerca del mismo. En conjunto (estudiantes-instructor) se debatió el papel que representan las leyes de la termodinámica en sistemas ecológicos, la importancia del detritus como productor primario y la retroalimentación en el sistema.

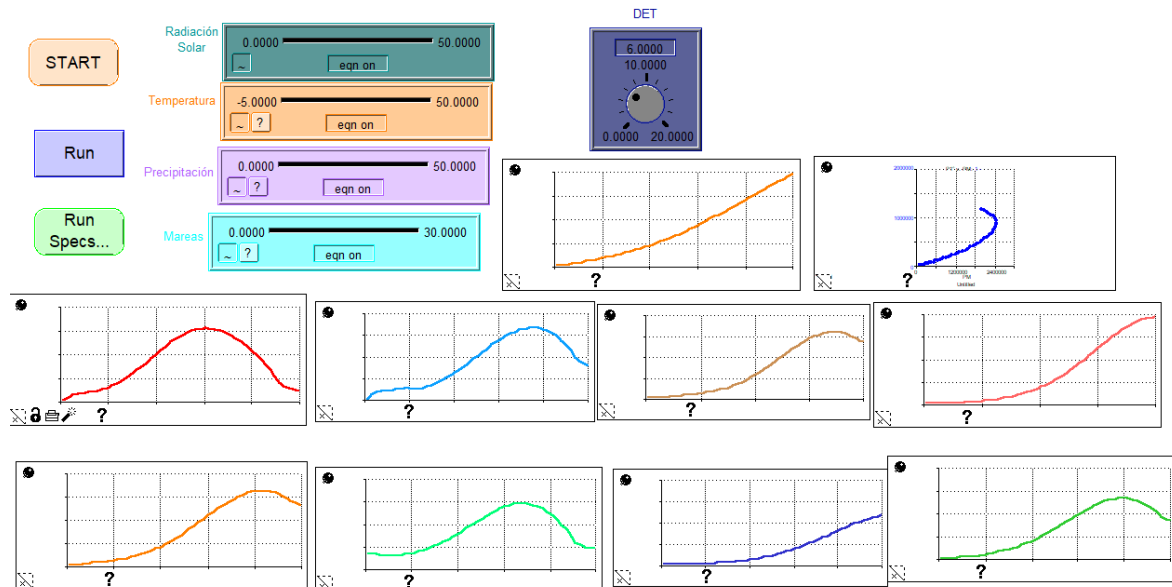


Figura IV.15. Panel del laboratorio virtual en Stella en donde los estudiantes interactuaron con el modelo, cambiando algunos valores de inicio, activando y desactivando las ecuaciones de la variabilidad ambiental.

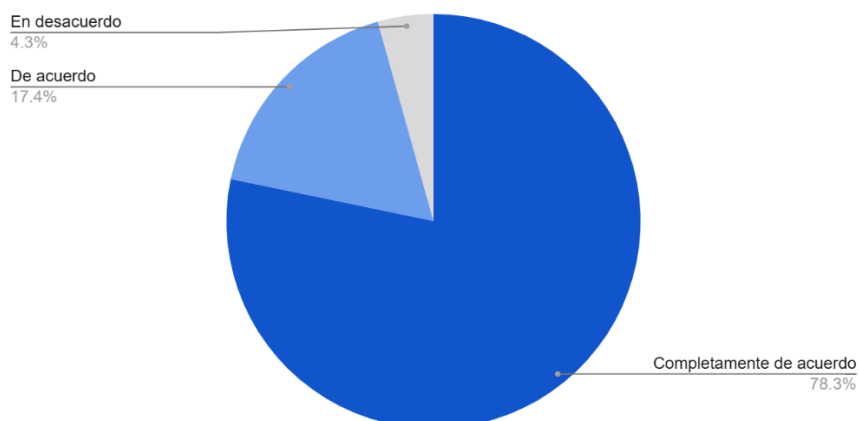
Finalmente, se efectuó una sección de comentarios, dudas y sugerencias sobre el curso como retroalimentación para el instructor.

IV.5.2. Evaluación del curso, material didáctico y del modelo de simulación

Una vez concluido el taller, se distribuyó el formulario a los participantes y al profesor del módulo. Las respuestas se presentan a continuación:

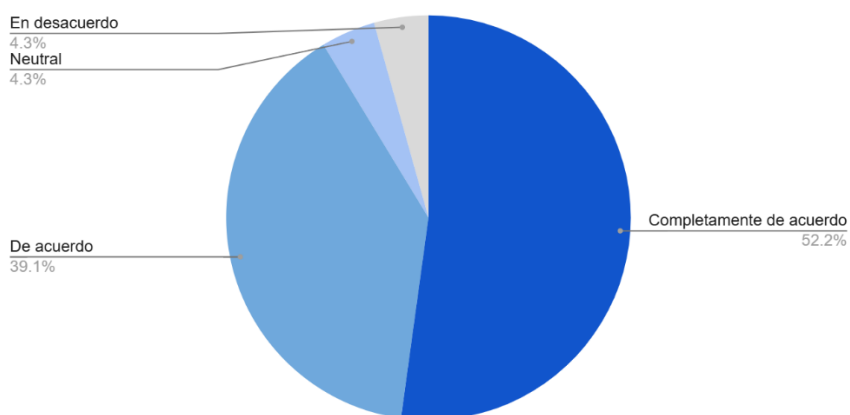
Habilidad y capacidad de respuesta del instructor.

El instructor brindó explicaciones o demostraciones eficaces.



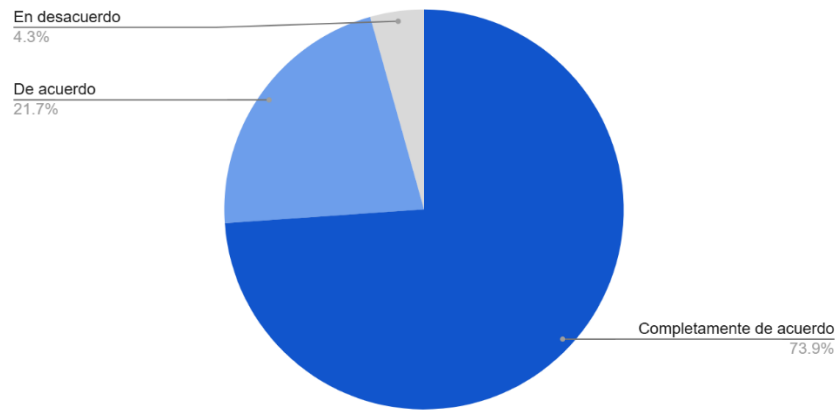
- La gran mayoría de los encuestados estuvieron conformes. Si se suma *De acuerdo* y *Completamente de acuerdo*, se obtiene un **95.7% de aprobación**, lo cual es un indicador de éxito en las explicaciones del instructor.

Las presentaciones fueron claras y estuvieron organizadas



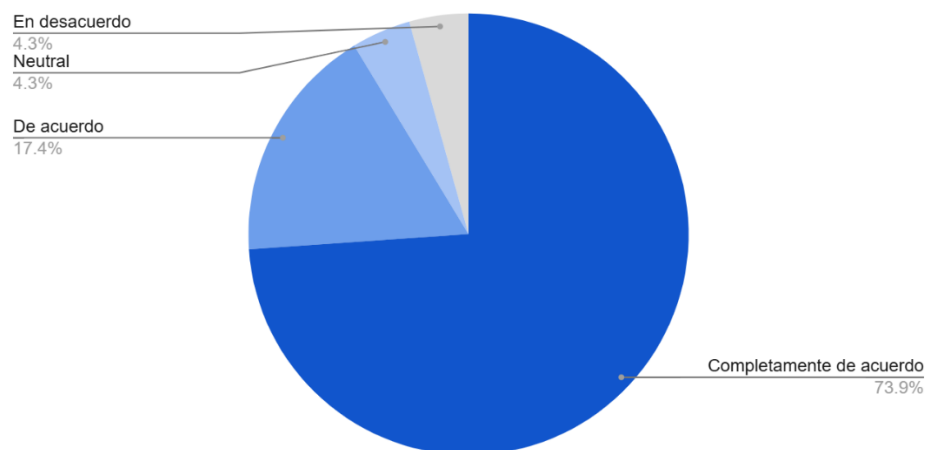
- La mayoría de los encuestados se mostraron satisfechos con la organización y claridad de los datos proporcionados. Sin embargo, se observa un porcentaje bajo de un pequeño grupo que no encontró las presentaciones ni especialmente claras ni confusas, por lo que es importante mejorar la claridad de las exposiciones por parte del instructor.

El instructor estimuló el interés de los alumnos.



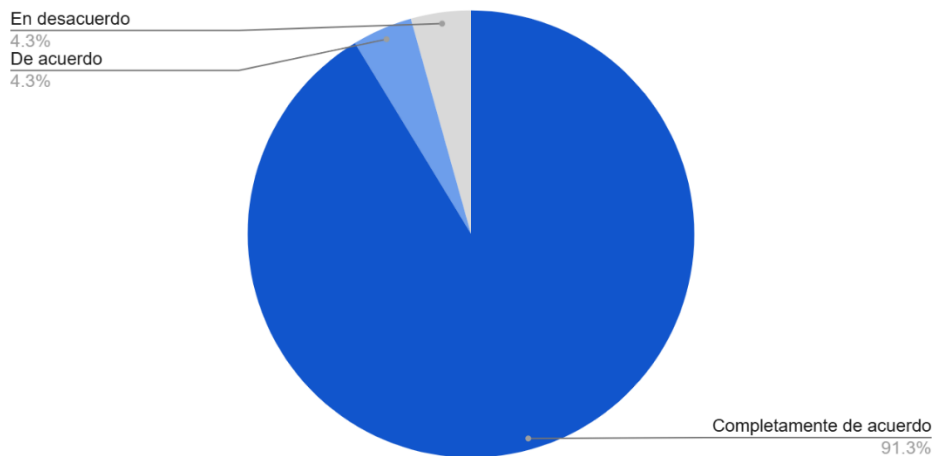
- Esta gráfica muestra la capacidad del instructor para estimular el interés. Una de sus fortalezas no es solo explicar, sino **conectar e inspirar** a los alumnos. Solo un pequeño grupo (4.3%) no se sintió motivado.

El instructor utilizó el tiempo de las clases de forma eficaz.



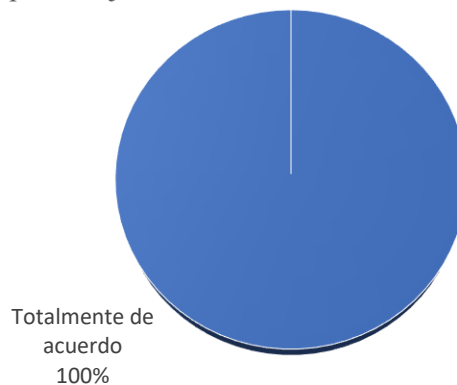
- El instructor demostró ser eficiente en la utilización del tiempo del taller, aunque se disminuyó el temario para adaptarse a los horarios del módulo trimestral. El 8.6% que se divide entre *Neutral* y *En desacuerdo* es mínimo, lo que podría indicar que para un par de alumnos el ritmo fue muy rápido o que se dedicó tiempo a temas que no consideraron prioritarios.

El instructor estuvo disponible y brindó ayuda.



- Esta gráfica evalúa la disponibilidad y apoyo del instructor. Demostró estar capacitado y preparado con el dominio de los temas presentados. Solo un **4.3%** se mostró en desacuerdo. En cualquier evaluación docente, tener a más de 9 de cada 10 personas en el nivel máximo es un logro sobresaliente. Contribuyó positivamente a la dinámica del curso al apoyar a los asistentes resolviendo dudas y comentarios.

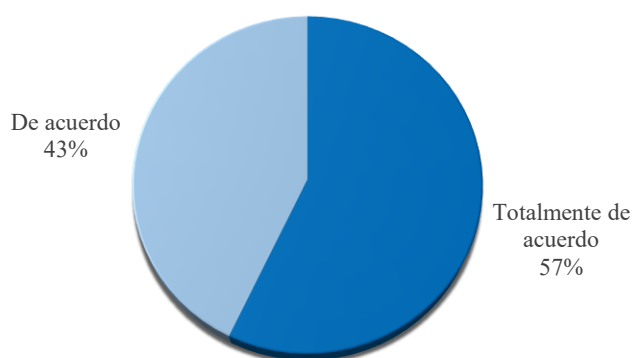
Los trabajos que realicé en esta actividad resultaron importantes para mi aprendizaje



- Los trabajos realizados durante el curso, junto con el material didáctico y el manual operativo, fueron importantes y útiles para mejorar el aprendizaje de acuerdo con el **100%** de los

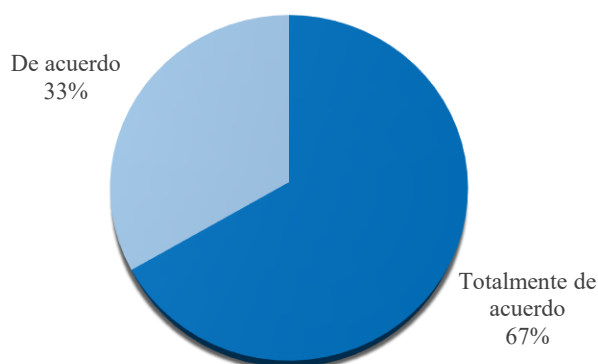
estudiantes. Esto confirma que el diseño de las actividades prácticas fue el adecuado. Los alumnos sintieron que cada tarea asignada aportó valor real a su aprendizaje.

El manual operativo, que se entregó antes del curso, facilitó la comprensión sobre el software Stella.



- El hecho de que el manual se entregara antes del curso y haya facilitado la comprensión sugiere que los alumnos llegaron a la sesión con una base sólida, optimizando el tiempo de clase. Aunque el **57%** le dio la calificación máxima, el **43%** restante también estuvo *De acuerdo*, lo que posiciona al manual operativo como una herramienta clave de soporte.

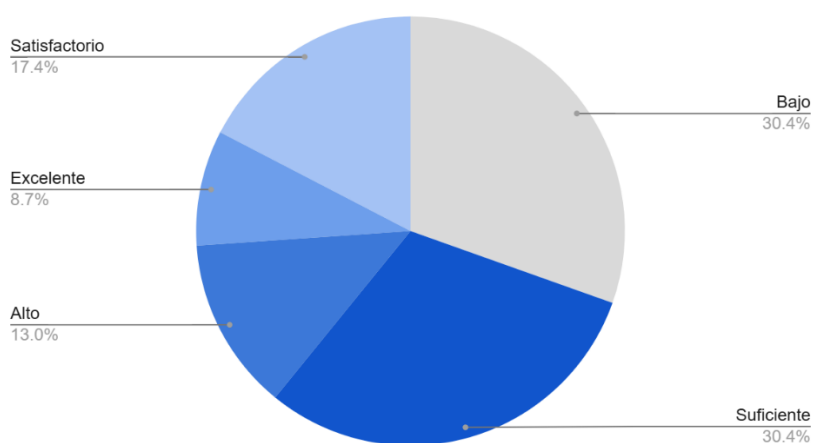
Los modelos que el instructor presentó me resultaron útiles y fáciles de comprender, lo que me permitió mejorar mi comprensión de los procesos de sistemas ecológicos con más facilidad



- Lograr que temas complejos como los modelos presa-depredador sean calificados como fáciles de comprender por la totalidad del grupo habla muy bien de la capacidad de síntesis y claridad del instructor. Sin embargo, hallaron algo complicado el modelo de la red trófica de la RBLP.

Contribución al aprendizaje

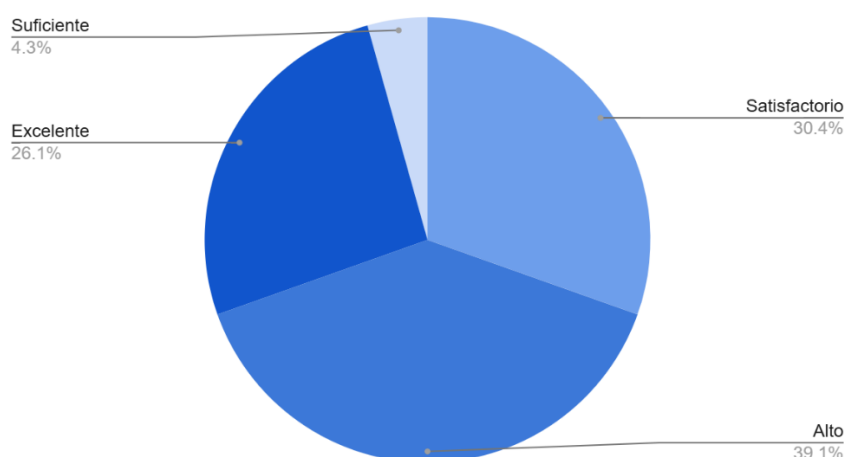
Nivel de habilidades o conocimientos al inicio del curso.



- Esta gráfica es fundamental porque muestra el contexto del grupo antes de llevarse a cabo el taller. El **30.4%** de los alumnos inició con

un nivel *Bajo*. Esto explica por qué las gráficas anteriores sobre la ayuda y disponibilidad del instructor salieron altas; los alumnos realmente necesitaban apoyo y él se los brindó. El **60.8%** del grupo no presentaba conocimientos suficientes del tema. Solo un pequeño **8.7%** se consideraba *Excelente*. Estos datos evidencian que el instructor enfrentó un gran desafío al tener que igualar a casi dos tercios del grupo.

Nivel de habilidades o conocimientos al final del curso.



- La gráfica muestra el resultado final y el impacto real del instructor en el aprendizaje. Si se compara con la gráfica anterior, el nivel *Excelente* aumentó de un **8.7%** a un **26.1%**. El **30.4%** que inició en nivel *Bajo* fue suprimido. El nivel mínimo es *Suficiente* y solo representa un **4.3%**. Cerca del **70%** del grupo terminó con un nivel entre *Alto* y *Excelente*. Esto confirma que el instructor no solo fue organizado, sino que fue **efectivo** en transmitir el conocimiento.

IV.6. DISCUSIÓN

La implementación de la dinámica de sistemas en la creación de modelos de simulación en Stella, la metodología de participación activa y el uso del material didáctico utilizados durante el taller, posibilitaron analizar la respuesta de los

estudiantes de Licenciatura en Biología a un entorno de aprendizaje que ha demostrado brindar un terreno fértil para mejorar la comprensión y la retención de las ideas durante su aprendizaje al módulo de Análisis de Sistemas Ecológicos.

Se describe el diseño e implementación del taller “*Introducción al modelado de sistemas ecológicos mediante el software Stella*”, que culmina con la presentación del modelo de la trama trófica acuática de la RBLP. Finalmente, se expone el tema de la evaluación. De acuerdo con los resultados obtenidos, se justifica la hipótesis inicial del proyecto y se argumenta los siguientes puntos.

IV.6.1. Evaluación del taller, manual operativo y material didáctico. Contribución al aprendizaje de los asistentes.

Investigadores y profesores implementaron el enfoque de dinámica de sistemas en sus clases o estudios experimentales, obteniendo resultados positivos. En esta investigación se determinó que los resultados son similares a los hallazgos generales de la literatura (Alessi, 2000, Lyneis y Fox-Melanson, 2001, Shaffer, 2006).

El taller, de carácter introductorio, se orientó en los análisis metodológicos realizados por Fisher (2018) y Bruner (1966) respecto a la enseñanza sobre dinámica de sistemas. Es importante señalar que no existe un enfoque único para usar en el aula que garantice el aprendizaje del alumno. El instructor debe cuestionarse qué desea hacer y qué objetivo conseguir con su dinámica: si prefiere el autoritarismo o el diálogo, la pasividad o la participación de los alumnos; si prefiere fomentar la memorización o la reflexión, estimularlos a acumular conocimientos o a ser conscientes y críticos. En este contexto, se decidió utilizar metodologías de comunicación activa para alcanzar los objetivos del proyecto, así como la participación de asistentes-instructor-material didáctico.

Para simplificar la labor de manejar un programa como Stella, que solo dispone del idioma inglés, el manual operativo incluye algunas de sus

funcionalidades, detallando el sentido de los comandos en español. Así, se busca que el idioma no represente un obstáculo que dificulte su aprendizaje.

En las actividades se aplicaron dos de los tres modos de aprendizaje que describe Bruner (1966): **icónico** y **simbólico**. En el modo **icónico**, los estudiantes usan imágenes, dibujos, diagramas o gráficos para representar ideas o situaciones concretas. Por ello, se les pidió elaborar gráficos de comportamiento a lo largo del tiempo con el objetivo de predecir el resultado al final de la simulación. De esta manera, desarrollaron la capacidad de anticipar modelos mentales mediante el comportamiento de un sistema y de observar cómo su actividad representa algún concepto que el instructor trató de transmitir.

El otro modo de representación es el **simbólico**. Se utilizan los conceptos abstractos de números, palabras, u otros símbolos para permitir que el estudiante organice su pensamiento. Los símbolos son los stocks, flujos, convertidores y conectores que los estudiantes utilizaron para representar los modelos. De esta manera, conectaron los elementos, definieron los componentes y, finalmente, ejecutaron el modelo para producir un gráfico que debería mostrar el mismo tipo de comportamiento que se evidenció en los gráficos de comportamiento a lo largo del tiempo, elaborados en hojas de papel. Gracias a estos modos de aprendizaje, la respuesta de los asistentes al taller fue satisfactoria y positiva.

De acuerdo con Fisher (2018), el uso de modelos de simulación refuerza la comprensión de los estudiantes sobre el comportamiento típico de sistémicas estudiados, lo cual se pudo observar con los asistentes. Durante los ejercicios, combinaron y aprendieron estructuras de funciones para producir un comportamiento lineal, exponencial, logístico o sinusoidal en sistemas simples y complejos, tal es el caso del modelo presa-depredador. El proceso de construcción de modelos fue una parte esencial de este proceso de comprensión. Forrester (2009) destaca la importancia de poner a prueba la percepción sobre la estructura y comportamiento de un sistema. El pensamiento sistémico les proporcionó una representación que es sencilla de usar para construir modelos.

La participación activa mostró grandes ventajas, favoreció el intercambio de conocimientos y experiencias entre los asistentes y el instructor, estimuló el trabajo colectivo, promovió la aplicación práctica de lo que se aprende, enlazándolos a la satisfacción del conocimiento. La metodología participativa promueve el compromiso activo en sus procesos de aprendizaje (Fernández-Domínguez, 2006). Son más estimulantes aquellas clases que privilegian la comunicación, el aprendizaje cooperativo, la curiosidad, la creatividad y la flexibilidad; que están abiertas a la experimentación, que apuestan por la autonomía del alumno y que conjuran su miedo a hablar en público o a experimentar nuevas propuestas, lo cual fue manifestado en las respuestas positivas de los asistentes.

En cuanto a la versatilidad de Stella en la enseñanza-aprendizaje, Swart (1990) sostiene que contribuye a que el proceso de comprensión sea más atractivo porque los estudiantes pueden descubrir las relaciones entre las variables en un sistema mediante el uso de diagramas, gráficos y animaciones que se pueden encontrar en el programa. Así, recuerdan lo que ven porque en su mayoría aprendieron observando y trabajando con gráficos por computadora. Además, las simulaciones promueven su pensamiento crítico y evaluativo. Esto se debe a que se anima a los estudiantes a pensar más allá y generar un pensamiento de análisis sistémico. A través de los ejercicios realizados, se exhortó su participación, promoviendo su aprendizaje constructivista. Así mismo, las simulaciones son menos complejas que las situaciones reales. Los usuarios no necesariamente deben ver la interacción entre presa y depredador durante varios días de manera presencial (Swart, 1990). Por el contrario, con Stella solo se requiere realizar la simulación con la posibilidad de realizar pausas, lo que en la vida real no es posible. Con esto, los estudiantes tienen tiempo para evaluar la situación, y su aprendizaje se torna más efectivo.

El propósito de la simulación en la enseñanza es dar un aprendizaje profundo. Al utilizar la simulación, los estudiantes se involucran en un estudio que potencia la comprensión en comparación con aquél que sólo promueve que sean

únicamente receptáculos de información sin comprender el contenido. Grant (1997) señala que no se puede lograr una comprensión de los principios subyacentes de la dinámica de sistemas mediante conferencias y discusiones, ni mediante la exposición pasiva.

La evaluación del modelo de simulación de la trama trófica en la RBLP fue favorable. Los asistentes no habían empleado un sistema que mostrara nueve variables de estado, ni un modelo que incorporara factores ambientales que afectan su dinámica, lo que atrajo su interés. En un principio, encontraron difícil interpretar las conexiones del modelo y diferenciar los flujos de biomasa. Sin embargo, las instrucciones del panel interactivo facilitaron la manipulación del modelo porque explicaron el desarrollo del sistema con animaciones que cuentan el programa, lo que mejoró finalmente su comprensión. Se efectuaron simulaciones que permitieron a los usuarios observar cómo cambia, bajo diferentes parámetros, los resultados del modelo.

El aprendizaje que obtuvieron los alumnos del módulo pudo brindarles una comprensión general de los principales conceptos utilizados en los sistemas, la capacidad de desarrollar y ejecutar modelos de simulación mediante Stella y la motivación para continuar activamente su educación en modelización de sistemas ecológicos. Los hallazgos revelan que existe un incremento en el aprendizaje pre y post empírico.

A pesar de los resultados positivos, es importante enfatizar las limitaciones del proyecto y aquellos aspectos a mejorar. El primero de ellos es la **organización del taller**. El tiempo que se brindó para llevarlo a cabo se tuvo que modificar a lo planteado originalmente por los autores, reduciéndolo de dos semanas con 5 horas por sesión a sólo tres días con 3 horas de duración, lo que significa que se dejaron fuera dinámicas importantes. Una de ellas se trataba de exposiciones de modelos genéricos por parte de los asistentes, de resolución de problemas ambientales en equipo por medio de modelos de simulación y una pre y post evaluación del taller más completo. Definitivamente el número de participantes y el tiempo disponible

para el taller limitaron los resultados generados. Desarrollar modelos de simulación requiere de tiempo, la paciencia es una condición para todos los usuarios a la hora de construir modelos de dinámica de sistemas (Forrester, 1996; Alessi, 2005).

Segundo, se debe mejorar la **calidad de las presentaciones**, ya que varios alumnos comentaron sobre lo poco visibles de las imágenes y del tamaño de texto. Otro punto para tener en cuenta fue la precaución al instalar las versiones de Stella para los diferentes sistemas operativos de las computadoras de los alumnos, ya que no eran las mismas versiones de Stella para los sistemas Mac que para Windows, por lo que algunos estudiantes trabajaron en versiones anteriores del software que otros, resultando en un desfase al momento de realizar los ejercicios, perdiendo varios minutos del taller.

El **modelo de la trama trófica acuática de la RBLP** es el tercer punto que debe tenerse en cuenta. Aunque este ecosistema presentó una estructura de interpretación sencilla sin caer en la simplificación, los participantes necesitaron más tiempo para interactuar con todo lo preparado para tal efecto y comprenderlo en su totalidad. La desventaja es que tuvieron menos tiempo para reflexionar en el desarrollo, la estructura y función.

El último punto es la **evaluación de aprendizaje** de los estudiantes. Los instructores que efectuaron talleres sobre la modelización de sistemas dinámicos en nivel preuniversitario utilizaron una combinación de pruebas, presentaciones orales, modelos de estudiantes y su observación para emitir un juicio evaluativo. Para este proyecto, solo se desarrollaron diez preguntas para determinar el aprendizaje y la calidad de la información presentada, lo que limita la comparación de los resultados obtenidos con aquellos generados por los autores.

Todos los que han participado en la enseñanza de modelización de sistemas han informado lo difícil que es, aunque los beneficios son grandes (Forrester, 1996; Lyneis, 2000; Alessi, 2005). Es crucial continuar con la impartición de talleres a más alumnos interesados, no solamente dirigido a un solo grupo, para obtener una visión completa de los resultados. También es posible supervisar proyectos de un

trimestre que requieran que los estudiantes desarrollen y utilicen un modelo de simulación para abordar preguntas específicas sobre un sistema con el que están familiarizados. Los instructores deben ser pacientes para que los estudiantes construyan mejores modelos con el tiempo. Esto conlleva al desafío de transmitir este conocimiento sobre la modelización de sistemas de manera clara, frecuente y amplia. Estos talleres representan un esfuerzo para brindar capacitación inicial a aquellos estudiantes que, en última instancia, ayudarán a promover, y participar en grupos interdisciplinarios orientados a la modelización de sistemas y que pueden continuar revitalizando la educación superior (Neill, 1995), como educadores, ecólogos, administradores de recursos naturales o en el ámbito profesional.

Finalmente, este proyecto de investigación fue realizado por un nuevo usuario para nuevos estudiantes sobre modelización de sistemas, ambas partes aprendieron este método de enseñanza con relativo éxito. Por lo tanto, la dinámica de sistemas, las metodologías activas y el programa Stella proporcionan el beneficio de mejorar el aprendizaje en ecosistemas complejos como los presentes en la Reserva de la Biósfera Los Petenes y aplicar este conocimiento a situaciones reales sobre problemáticas socioambientales existentes.

IV.7. CONCLUSIONES

- Un ambiente de aprendizaje ideal en la modelización de sistemas dinámicos incluye material de apoyo, discusión entre los asistentes y el instructor sobre temas de interés, investigación efectuada por estudiantes y el desarrollo y exploración de modelos de simulación efectuados en computadora para verificar el vínculo entre el comportamiento del modelo y las observaciones experimentales.
- Stella es una herramienta didáctica que resulta fácil de entender y de utilizar. Es una herramienta ideal en el aprendizaje, y se incrementa si se complementa con otros programas de simulación como Ecopath with Ecosim
- Desde la perspectiva del enfoque sistémico, hay una observación relevante de recalcar que es sencilla pero profunda: la causa y el

efecto no están necesariamente vinculados en el tiempo y el espacio. La desconexión temporal y espacial entre causa y efecto es un pilar del pensamiento sistémico que desafía la lógica lineal tradicional. Aunque esta afirmación parece trivial, una breve reflexión sobre las prácticas actuales en educación, investigación y gestión lleva a la conclusión de que sus implicaciones no son ampliamente aceptadas.

- La perspectiva sistémica ofrece grandes beneficios en el contexto de los problemas actuales en educación ambiental, investigación y manejo de recursos naturales. Los nuevos estudiantes de modelado ecológico pueden ayudar a promover esta perspectiva y continuar en su progreso
- El desarrollo de teorías explicativas y predictivas es un problema al que se enfrentan los biólogos. Es comúnmente criticado que no poseen el mismo alcance que los físicos en la creación de dichas teorías, y podría deberse a que los sistemas biológicos son más complejos que los físicos (Grant, 1997). Una posible explicación es que la mayoría de los biólogos carecen de una visión sistémica, la cual permite reconocer relaciones causales en sistemas complejos, proporcionando así una perspectiva de oportunidades en educación ambiental, investigación ecológica y manejo de recursos naturales. Por ello, los cambios y nuevas necesidades de la sociedad actual requieren que las instituciones académicas potencien las capacidades del estudiante y las actitudes sociales: aprender haciendo y a desarrollar la curiosidad a los problemas ambientales, analizarlos sistemáticamente y a idear soluciones alternativas.

IV.7. BIBLIOGRAFIA

- Alessi, S. M. (2000). Designing Educational Support In System-Dynamics-Based Interactive Learning Environments. *Simulation & Gaming*, 31(2): 178-196 pp.
- Alessi, S. M. (2005). The Application of System Dynamics Modeling in Elementary and Secondary School Curricula. Recuperado el 20 de enero de 2024. Website: <http://web.archive.org/web/20060304015136/http://www.c5.cl/ieinvestiga/actas/ribie2000/charlas/alessi.htm>
- Blankenship, V., Tumlinson, J., Sims, M. (1995). A STELLA-II teaching simulation of the dynamics of action model. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 27: 244-250 pp.
- Bruner, J. S. (1966). *Toward a Theory of Instruction*; Harvard University Press: Cambridge, MA, U.S.A, 1–21 pp. ISBN 978-0-674-89701-3
- Easton, D. (2001). Categorías para el análisis sistémico de la política. In A. Batlle (ed.), *Diez textos básicos de ciencia política*. 2da. Edición. Barcelona.
- Fernández Domínguez, M. R. (2006). Reseña de "Metodología participativa en la enseñanza universitaria" de Fernando López Noguero. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 20(3): 313-316 pp.
- Fisher, D. M. (2011). Everybody thinking differently: K–12 is a leverage point. *Syst. Dyn. Rev.* 27: 394–411 pp.
- Fisher, D. M. (2017). The next 25 years in pre-college education: A move toward global understanding of complex systems. In *Proceedings of the International System Dynamics Conference*, Cambridge, MA, USA, 16–20 pp.
- Fisher, D. M. (2018). Reflections on Teaching System Dynamics Modeling to Secondary School Students for over 20 Years. *Systems*, 6(12).

- Flood, R., Jackson, M. (2000). *Creative Problem Solving*. Wiley, Chichester, England.
- Forrester, J. W. (1994). Learning through system dynamics as preparation for the 21st century. *Creat. Learn. Exch.* 3 (3): 1–8 pp.
- Forrester, J. W. (1996). *System Dynamics and K-12 Teachers*. Lecture at the University of Virginia School of Education.
- Forrester, J. W. (2009). *Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st century*. Presented at the K-12 Systems Thinking and Dynamic Modeling Conference, Concord Academy, Concord, MA, USA, 27–29 pp.
- Grant, W. E., Pedersen, E. K., Marín, S. L. (1997). *Ecology and Natural Resource Management: Systems Analysis and Simulation*. Wiley, New York, 373 pp.
- Grant, W. E. (1998) Ecology and natural resource management: reflections from a systems perspective. *Ecological Modelling*, 108(1–3):67–76 pp.
- Hoos, I. R. (1983). Systems Analysis in Public Policy: A critique. *systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions*, 3: 532-533 pp.
- Kay, A. (2006). *The dynamics of public policy: theory and evidence*. Cheltenham, U. K.
- López Noguero, F. (2005). *Metodología participativa en la enseñanza universitaria*. Narcea.
- Lyneis, D. A., Fox-Melanson D. (2001). The Challenges of Infusing System Dynamics into a K-8 Curriculum. *International System Dynamics Society Conference*, Atlanta, Georgia.
- Mandinach, E. B., Cline, H. (1992). Systems, science, and schools. *System Dynamics Review*, 9: 195-206 pp.
- Mats Olov, O., Gunnar, S. (2004). *Systems Approaches and Their Application. Examples from Sweden*. Dordrecht: Springer Netherlands.

- National Council of Teachers of Mathematics (NCTM). (2000). Principles and Standards for School Mathematics; NCTM: Reston, V. A., U. S. A; ISBN 978-0873534840
- Neill, W. H. (1995). An immodest proposal for systemic change in higher education. *Ecological Modelling*, March, 1–5 pp.
- Pérez, A. R. (1999). Kuhn y el Cambio Científico. México. Fondo de Cultura Económica, México, 274 pp.
- Pérez Mayo, A. R., Vallejo Trujillo, L. S. (Coords.). (2017). Organización y la teoría organizacional: Una visión transdisciplinaria entre cuerpos académicos. Bonilla Artigas Editores.
- Presman, R. (1992). Software Engineering. A Practitioner's Approach. USA.
- Reeve, J. M. (1992). Understanding motivation and emotion. Fort Worth, TX: Holt, Rinehart Winston.
- Richmond, B. (2008). An introduction to systems thinking with STELLA. Isee systems.
- Shaffer, C. S. (2006). Toward a System Dynamics Model of Teaching Computer Programming Via Distance Education. Unpublished PhD dissertation. The Pennsylvania State University.
- Sherwood, D. (2002). Seeing the Forest for the Trees: A Manager's Guide to Applying Systems Thinking. Nicholas Brealey Publishing. London.
- Systems Education Experiences (SEE), Baliga Laboratory at Institute for systems biology, USA. Recuperado el 20 de abril de 2023. Website: <https://see.isbscience.org/>
- Swart, J. (1990). A system dynamics approach to predator-prey modeling. *System Dynamics Review*, 6(1): 94-99 pp.

ANEXOS

- Constancia del taller “Introducción al modelado de sistemas dinámicos mediante el software Stella©”

