



Universidad Autónoma de Tlaxcala

**Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta
Posgrado en Ciencias Biológicas**

La simulación informática como método
predictivo en ecología

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

Benjamín Piña Altamirano

Director: Dr. Martín Alejandro Serrano Meneses

Tlaxcala, Tlax.

Febrero, 2013



Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta
Posgrado en Ciencias Biológicas

La simulación informática como método predictivo
en ecología

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO (A) EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

Benjamín Piña Altamirano

Comité Tutorial

Director: Dr. Martín Alejandro Serrano Meneses

Tutores:

Dr. Carlos Alberto Lara Rodríguez

M. en C. Fernando Ángeles Uribe



Universidad Autónoma de Tlaxcala
Posgrado del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta



COORDINACIÓN DE LA MAESTRÍA
CENTRO TLAXCALA DE BIOLOGÍA DE LA CONDUCTA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
P R E S E N T E

Los abajo firmantes, miembros del jurado evaluador del Proyecto de tesis que **Benjamín Piña Altamirano** realiza para la obtención del grado de Maestro en Ciencias Biológicas, expresamos que, habiendo revisado la versión final del documento de tesis, damos la aprobación para que ésta sea impresa y defendida en el examen correspondiente. El título que llevará es **“La simulación informática como método predictivo en ecología”**.

Sin otro particular, aprovechamos para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
TLAXCALA, TLAX., FEBRERO 20 DE 2013


DR. MARTÍN ALEJANDRO SERRANO MENESES


DR. CARLOS ALBERTO LARA RODRÍGUEZ


DR. AMANDO BAUTISTA ORTEGA


DR. CARLOS ALBERTO CHÁVEZ ZICHINELLI


DR. ROGELIO MACÍAS ORDÓÑEZ


M. EN C. FERNANDO ÁNGELES URIBE



Sistema Institucional de Gestión de la Calidad Certificado Bajo la Norma:
ISO 9001:2000-NMX-CC-9001-IMNC-2000



Km. 1.5 Carretera Tlaxcala-Puebla CP 90070 Tel/Fax: 01(246)462-15-57 e-mail: posgradoctbcuat@gmail.com
Tlaxcala, Tlax.

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias Biológicas del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

A mi director de tesis, Martín Serrano, por el apoyo académico y personal brindado durante el desarrollo de mi maestría. Otro agradecimiento más efusivo por todas las atenciones ofrecidas durante mis visitas a Tlaxcala, que superan por mucho lo que se espera de un asesor de tesis. Gracias por la confianza y comprensión otorgada a mi favor, pese a lo especial y complicado de mi caso. Gracias por ser un amigo, antes que un guía académico.

A mi tutor Carlos Lara, por sus valiosas aportaciones y sugerencias a favor de mi proyecto.

A mi tutor Fernando Ángeles, por compartir el espíritu visionario de quienes defendemos a la vida artificial como el medio para comprender la vida en un sentido universal.

A mis sinodales Amando Bautista y Carlos Chávez.

A Rogelio Macías, por el apoyo brindado en la primera etapa de mi maestría, pero principalmente por todo el historial de trabajo conjunto desde mi tesis de licenciatura a la fecha. Gracias por haber impulsado un proyecto tan osado como *Galatea*, que a la vista de muchos resultaba imposible. Gracias por aportarme más allá de lo debido, tanto en lo académico como en lo personal.

A Margarita Martínez Gómez, por su confianza, apoyo y tolerancia. Gracias por la valiosa oportunidad de cursar este posgrado, con las facilidades gestionadas por ella. Tal confianza y facilidades van mucho más allá de lo que cualquier estudiante podría esperar. Gracias también por su loable labor a favor del estudio multidisciplinario de la conducta.

A Fernando Aguilar y mis compañeras de generación Adriana y Nora, por su hospitalidad durante mis estancias en Tlaxcala.

DEDICATORIAS

Antes que nada, y por encima de todo, a mis queridos padres, Beto y Cuca, a quienes debo gran parte de lo que soy. No me alcanzará la vida para pagarles lo que han hecho por mí, y sobre todo, lo que han hecho de mí.

A mis hermanos, Armando, Javier, Rubén, Iván, Noé y Primavera, y por medio de ellos a toda mi familia, que ha sido y seguirá siendo mi máxima bendición.

A todos aquellos en el mundo, que de una u otra manera hacen que un mundo mejor sea posible.

Con todo mi corazón a mi hermano Rubén.

Siempre recordaré tu valor y fortaleza.

Gracias por ser ejemplo de vida, aun ante los umbrales de la muerte.

Jugué a ser dios, y creé la vida en mi computadora.

T. S. Ray (1994)

Resumen

En el presente trabajo se valida el Sistema Simulador de Estrategias Reproductivas *Galatea*, como una herramienta predictiva en Ecología Conductual. *Galatea* consiste en un sistema simulador basado en agentes que incorpora tácticas de forrajeo, combate y cortejo.

La validación consistió en seleccionar dos artículos en la literatura especializada en Ecología Conductual e intentar replicar los resultados empleando a *Galatea*. El criterio para seleccionar tales fuentes se basó en qué tan trasladable a *Galatea* eran los modelos presentados. En los dos casos fue posible replicar satisfactoriamente los resultados reportados.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que el Sistema *Galatea* ha sido validado y encuentra aplicación útil en la exploración de una amplia variedad de problemas en ecología conductual.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Teoría de modelaje	9
1.2 Modelos analíticos clásicos y simulaciones informáticas	10
1.3 La Vida Artificial	11
1.3.2 Filosofía y justificación de la Vida Artificial	12
1.4 Sistemas basados en agentes	12
1.5 Sistema Galatea	14
1.5.1 Estructura de entornos en Galatea	14
1.6 Verificación y validación de sistemas de simulación	15
2. ANTECEDENTES	16
2.1 EL SISTEMA GALATEA	16
2.1.1 Conceptos generales	16
2.1.1.1 Ciclo	16
2.1.1.2 El método Montecarlo	17
2.1.1.3 Funciones	19
2.1.1.4 Estructura de entornos	20
2.1.1.5 Agentes	21
3. JUSTIFICACIÓN	41
4. HIPÓTESIS	41
5. OBJETIVOS	41
5.1 Objetivo general	41
5.2 Objetivos particulares	41
6. METODOLOGÍA	42
6.1 Éxito reproductivo en escarabajos saproxylicos	42
6.1.1 Réplica con Galatea	43
6.2 Dispersión en metapoblaciones	51
6.2.1 Réplica con Galatea	51
7. RESULTADOS	61
7.1 Éxito reproductivo en escarabajos saproxylicos	61
7.2 Dispersión en meta poblaciones	64
8. DISCUSIÓN	69

8.1 Éxito reproductivo en escarabajos saproxylícos.....	69
8.2 Dispersión en metapoblaciones	70
9. CONCLUSIONES.....	72
10. PERSPECTIVAS	73
11. REFERENCIAS	75
13. ANEXOS	78
Anexo 1: El mito de Pigmalión y Galatea	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Teoría de modelaje

Kokko (2007) expone ampliamente la filosofía del modelaje. Establece que un modelo es una versión idealizada del mundo real. Para la autora, el “arte del modelaje” consiste en saber qué aspectos de la realidad se pueden sacrificar, y cuáles son cruciales para retenerlos. La necesidad de los modelos radica en que los procesos que ocurren en la realidad son tan complejos, que se requiere de una versión simplificada de los mismos a fin de poder estudiarlos y comprenderlos.

Los modelos incluyen unas variables de estado que describen el estado del sistema a lo largo del tiempo (por ejemplo, el número de individuos de una población, N), y unas ecuaciones o reglas numéricas que indican de qué manera se interrelacionan las variables de estado (p.ej $dN/dt = rN$), así como parámetros para configurar la dinámica (por ejemplo, r , tasa de crecimiento poblacional). En los modelos analíticos estas “reglas” se expresan mediante ecuaciones y en los modelos numéricos, de simulación, o computacionales, la relación entre variables se materializa en un código informático (Zavala y cols. 2006).

La comprobación de hipótesis evolutivas sobre los efectos de factores ecológicos clave en sistemas vivos suele ser complicada y, en algunos casos, inaccesible, dados los tiempos generacionales de los organismos y la dificultad de replicar los procesos en diferentes poblaciones. Factores a evaluar, como la densidad de población, la disponibilidad de recursos y la proporción de sexos, son difícilmente manipulables en condiciones de campo, por lo que las respuestas a ciertas preguntas en relación a estos factores requerirían de muchos años de observaciones. La simulación con modelos basados en agentes es una herramienta que representa una alternativa novedosa y prometedora como generadora de hipótesis o escenarios posibles (Peck 2004).

Los modelos de simulación son sistemas experimentales con toda propiedad, y pueden ser analizados empleando exactamente las mismas técnicas estadísticas que se usan para explorar sistemas del mundo real. La complejidad de las simulaciones las acerca más a la realidad que los modelos analíticos simples, pero con una poderosa ventaja sobre el mundo real: el modelador tiene total control sobre el sistema (Peck 2004). Una simulación facilita la

labor del modelador, al permitirle trabajar con una cantidad indefinida de variables, sobre todo cuando no se tiene idea clara de cuál es el efecto global de tales variables, pero sí sus efectos locales o a corto plazo (Kokko 2007).

1.2 Modelos analíticos clásicos y simulaciones informáticas

Los modelos básicos empleados en la Ecología Matemática clásica, como por ejemplo los modelos de Lotka-Volterra, únicamente describen características promedio de los individuos o poblaciones, y asumen un ciclo de vida extremadamente simple. No toman en cuenta detalles del ciclo de vida del organismo modelado, sólo su nacimiento, muerte y número de hijos. El desarrollo, metabolismo, conducta u obtención de recursos, entre otros factores, no son tomados explícitamente en cuenta (Uchmanski y Grimm 1996). Adicionalmente, es frecuente asumir que todos los individuos de una población interactúan con la misma probabilidad independientemente de la abundancia, frecuencia o posición espacial de los individuos de una determinada especie (Zavala y cols. 2006).

Tal como afirma Peck (2004), los modelos de simulación son sistemas experimentales con toda propiedad, y pueden ser analizados empleando exactamente las mismas técnicas estadísticas que se usan para explorar sistemas del mundo real. Peck (2004) asevera, además, que la complejidad de las simulaciones las acerca más a la realidad que los modelos analíticos simples, pero con una poderosa ventaja sobre el mundo real: el modelador tiene total control sobre el sistema. Otras ventajas son que el sistema se puede manipular de formas tales que en la naturaleza serían imposibles, muy costosas o éticamente incorrectas.

Autores como Berryman (1991) encuentran a estos modelos como demasiado caros de construir, demasiado complejos de entender y llenos de redundancias. En contraparte, cada vez hay una mejor aceptación y comprensión de que las simulaciones pueden jugar un papel importante en el entendimiento de ciencias complejas tales como la Ecología y la Biología Evolutiva (Byers 1991; Lenski y cols. 1999; Peck 2004; Strand y cols. 2002). Se ha planteado también la utilidad de las simulaciones para la evaluación y manejo de recursos naturales (Bousquet y LePage 2004; Cropper 2000).

Un aspecto importante al resaltar las diferencias entre los modelos analíticos clásicos y las simulaciones informáticas, es que los primeros son deterministas (Kokko 2007), en tanto

que las simulaciones suelen ser matemáticamente irreductibles, lo que implica que no existe un método analítico que pueda predecir el resultado final de la simulación, dadas X condiciones iniciales. En general, las simulaciones suelen arrojar un conjunto de resultados, a partir de condiciones idénticas, de manera no determinista, pero tampoco de manera totalmente estocástica (Emmeche 1994; Kokko 2007). Esta condición hace que las simulaciones sean modelos más cercanos a la vida real que los modelos matemáticos clásicos (Peck 2004).

Otro punto a considerar en favor de los modelos de simulación, en contraparte a los modelos analíticos, es lo que se refiere al “teorema de Gödel” (Franzén 2005). La discusión en torno a tal teorema es amplia, y rebasa los propósitos de esta tesis. A manera de resumen, se dirá que dicho teorema plantea la incompletud¹ e inconsistencia² de ciertos tipos de sistemas formales (entre ellos, las matemáticas mismas), lo que resulta en que hay ciertas proposiciones, que a pesar de ser verdaderas, no son demostrables mediante las matemáticas.

1.3 La Vida Artificial

La Vida Artificial (VA) es un esfuerzo interdisciplinario por emular los procesos y comportamientos de los seres vivos basado en las propiedades de las interacciones de los agentes que los integran. Es un intento de crear algo semejante a la vida, mediante la combinación de símbolos (datos) y procesos de símbolos (programas) independientemente del soporte físico de estos símbolos y procesos (Adami 1998; Emmeche 1994).

En Septiembre de 1987, 160 científicos en informática, física, biología, filósofos, antropólogos, entre otros, se reunieron en la Primera Conferencia Internacional sobre VA (*a-life*; Langton 1989). En dicha conferencia se establecieron los conceptos y principios de esta nueva disciplina, estableciendo que el intento de construir VA es también un esfuerzo por encontrar la lógica de las máquinas biológicas. Esta búsqueda es científica y legítima, sin importar si el método es el análisis de los seres vivientes o la síntesis de nuevos entes (Emmeche 1994).

¹ Un sistema formal no está completo cuando contiene teoremas que no son demostrables ni refutables.

² Un sistema formal es inconsistente cuando no se puede probar a sí mismo mediante sus propios axiomas.

1.3.2 Filosofía y justificación de la VA

Idealmente la biología debería ser el estudio de todas las formas de vida, sin embargo, la realidad es que la biología solamente estudia una forma de vida: la vida terrestre basada en el carbono (Levy 1992; Ray 1992). Otra limitación importante de las ciencias biológicas es que no existe una definición formal de “vida”, o por lo menos, una que represente un concepto unificador aceptado por todos los involucrados en su estudio, y que no admita excepciones. Además, al basarse en el método analítico, el objeto de estudio termina siendo algo que no está vivo (Emmeche 1994).

Las soluciones propuestas para los problemas planteados en el párrafo anterior se resumen en dos alternativas: 1) encontrar vida diferente a la terrestre, o bien 2) sintetizar nuevas formas de vida (Emmeche 1994). Al tener vidas alternativas para comparar, la biología podrá establecer que características son comunes a todas las formas de vida, y cuáles se aplican solamente al caso de la vida terrestre (Ray 1992). El movimiento de la VA sostiene que solamente sintetizando vida podremos comprender finalmente qué es la vida (Levy 1992).

El postulado principal de la VA es que la forma lógica de un organismo puede separarse de sus bases materiales de construcción: su “vitalidad” es una propiedad de la forma, no de los materiales (Emmeche 1994).

Así pues, la VA es la referencia que comprueba que todo sistema basado en reproducción, herencia, mutación y selección, se regirá por las mismas leyes, sin importar si se trata de organismos terrestres, extraterrestres, u “organismo digitales” que habitan en el universo del software (Adami 1998; Lensky y cols., 1999-2003; Levy 1992; Koza y cols. 1992; Ray 1992). Lo anterior implica que la VA es, de momento, la única alternativa para hablar de “biología universal”.

1.4 Sistemas basados en agentes

Un agente (Brown 2006; Janssen y Ostrom 2006) es una entidad discreta que está definida en términos de sus atributos y su comportamiento. Los atributos del agente pueden ser magnitudes continuas, como el peso o la edad, o categorías discretas, como el sexo. El agente toma decisiones en base a la percepción de su medio interno, y su medio externo, considerando que el medio incluye a otros agentes. Las decisiones del agente se traducen en

acciones que modifican al entorno y al agente mismo. Las acciones del agente están temporalizadas en intervalos de tiempo discretos (ciclos).

Macal y North (2006) definen un sistema basado en individuos es un modelo de población o ecosistema que no establece ninguna propiedad de la población. En cambio, describe todas las acciones de los organismos y sus interacciones con el entorno y otros individuos. La estructura de la población es emergente. Dado que la población se construye a partir de los individuos, las diferencias entre éstos y la heterogeneidad espacial pueden ser fácilmente tomadas en cuenta. Además, Macal y North (2006) hacen un análisis a fondo del concepto de agente, dejando ver que no hay consenso general, pero se permiten destacar algunas características comunes. Destacan que el agente debe ser discreto, contenerse a sí mismo, tener la capacidad de decidir de manera autónoma a partir de reglas de decisión, y tener memoria. De igual manera, resaltan que los sistemas de agentes tienen la propiedad de modelar fenómenos complejos, atendiendo solamente al comportamiento de los elementos del sistema. De esa propiedad es que se justifica el creciente uso y aceptación de este tipo de herramientas, ya que hay fenómenos que por su complejidad se dificulta abordarlos desde otro enfoque.

En general, los modelos basados en agentes que involucran reproducción no pueden equipararse a un algoritmo genético, puesto que no existe ninguna “función de adecuación”. La adecuación de cada individuo la determina su aptitud para sobrevivir, encontrar pareja, ser aceptado por ésta, fertilizar sus gametos y favorecer la sobrevivencia de su descendencia. Esta forma de adecuación, en la que el diseñador no interfiere en absoluto en el resultado, es consecuencia de la dinámica interna del sistema y propia de modelos basados en agentes. A esta adecuación se le denomina “adecuación emergente” o “adecuación endógena” (Strand y cols. 2002).

Una de las partes más complicadas y laboriosas en la elaboración de un sistema de agentes es la calibración del mismo, debido a la gran cantidad de pruebas a diferentes niveles que se requieren (Brown 2006).

1.5 Sistema *Galatea*

El Sistema Simulador de Estrategias Reproductivas *Galatea* (Piña-Altamirano 2006) es un complejo sistema basado en agentes, desarrollado enteramente por el autor del presente proyecto de investigación, en base a un diseño conjunto con el Dr. Rogelio Macías Ordóñez (Instituto de Ecología, A. C.). Tal sistema incorpora genética mendeliana, fisiología, morfología, reproducción, tácticas de combate y tácticas reproductivas.

1.5.1 Estructura de entornos en *Galatea*

Un entorno es todo aquello con lo que el agente puede interactuar. Se compone de elementos estáticos y dinámicos, así como de agentes. El entorno en *Galatea* emula al entorno de los organismos reales.

Sustrato: es un componente estático del entorno; esto es, durante todo el desarrollo de la simulación no cambiarán sus propiedades. Un sustrato simple se caracteriza por un nombre y un color.

Escenario: es un arreglo bidimensional de elementos de sustrato. Posee una longitud Norte-Sur y una longitud Este-Oeste, las cuales definen el área del escenario, que en todos los casos será rectangular.

Elemento dinámico: es aquel componente del entorno que cambia sus propiedades a lo largo de la ejecución de la simulación, en función del tiempo o en función de la interacción con algún agente. Su ubicación dentro del entorno es fija. Los elementos dinámicos son: fuentes de agua, fuentes de carbohidratos, fuentes de lípidos, fuentes de proteínas y sitios de oviposición.

Agente: es el integrante activo del entorno. El agente percibe su entorno vecino y toma decisiones según sus percepciones. El agente modifica su propio estado a cada tiempo según su estado actual y el estado del entorno. Así mismo el agente modifica su entorno según sus acciones, considerando que el entorno incluye a otros agentes y elementos dinámicos. Un agente es entonces, el elemento que emula a los organismos reales.

1.6 Verificación y validación de sistemas de simulación

Verificación: consiste en comprobar que el método desarrollado cumple con los requisitos de diseño autoimpuestos por el modelador (Izquierdo y cols. 2008; Kleijnen 1995; Sargent 2010). Cuando se trata de modelos de simulación, la verificación consiste esencialmente en depurar el programa informático desarrollado.

Validación: hace referencia explícita al sistema real que se está simulando. Validar un modelo consiste en valorar su utilidad dentro del contexto de aplicación, de acuerdo con los criterios para los cuales el modelo fue diseñado (Izquierdo y cols. 2008; Kleijnen 1995; Sargent 2010).

Según Sargent (2010) una técnica de validación consiste en comparar un modelo con otros modelos previamente validados. Otra vía es mediante la comprobación del poder predictivo del modelo. En base a lo anterior, si un modelo generado por *Galatea* se compara contra modelo validado anteriormente mediante su poder predictivo, tal validación implicaría la demostración del poder predictivo de *Galatea*.

Sargent (2010) también propone que la evaluación subjetiva de gráficas generadas por el modelo constituye evidencia suficiente para validar al modelo (método gráfico). Tal validación se complementa con el análisis realizado por un evaluador que no tiene conocimiento previo de que está trabajando sobre datos generados a partir de un modelo. Si tal evaluador no es capaz de distinguir datos reales de datos provenientes del modelo, se considera superada la prueba de validación. Lo anterior se conoce como prueba de Turing.

2. ANTECEDENTES

2.1 EL SISTEMA GALATEA

El presente trabajo emplea como método experimental el Sistema Simulador de Estrategias Reproductivas *Galatea*©³. El nombre *Galatea* fue tomado de un personaje de la mitología Griega, que representa el intento del ser humano de generar sistemas vivos “ideales” (ver Anexo 1), una mujer en el caso del mito de Pigmalión y *Galatea*, una población de estudio en el caso abordado en esta tesis. Este deseo ciertamente culmina si se logra dar vida al intento; Pigmalión lo logra con el favor de los dioses, el intento que expone este trabajo lo logra a través de la VA en sistema cibernéticos.

El sistema se desarrolló según los conceptos de la Programación Orientada a Objetos y la Teoría de Agentes. Para el desarrollo de las aplicaciones que integran el sistema se utilizó el Entorno Integrado de Desarrollo Delphi™ versión 7, de la empresa Borland Software Corporation®. Posteriormente, con la finalidad de permitir la ejecución del sistema en distintas plataformas y arquitecturas computacionales, el sistema se migró al Entorno Integrado de Desarrollo Lazarus, tal entorno presenta la ventaja de ser libre y permitir la compilación para las plataformas Windows™, Linux y MacOS™, y potencialmente para el novedoso sistema Android™, derivado de Linux, y presente en gran cantidad de dispositivos de alta movilidad.

2.1.1 Conceptos generales

2.1.1.1 Ciclo

En el Sistema *Galatea* el concepto de ciclo es esencial, por lo que se definirá dicho concepto antes de explicarlo con más detalle en el apartado de dinámica de simulaciones. El simulador actúa a intervalos discretos de tiempo denominados ciclos. La duración del ciclo depende del tiempo que tarda el sistema en recorrer a todos los agentes, proveerlos de percepciones, recibir las acciones de éstos y actualizar el entorno. Con pocos agentes y suficientes recursos de

³Derechos reservados a favor de Benjamín Piña Altamirano.
Registro Instituto Nacional del Derecho de Autor: 03-2005-021813165900-01

cómputo, cada ciclo dura una pequeña fracción de segundo. En este contexto, la palabra ciclo no debe confundirse con el término ciclo de vida, ya que éste último en una simulación suele abarcar al menos cientos o miles de ciclos.

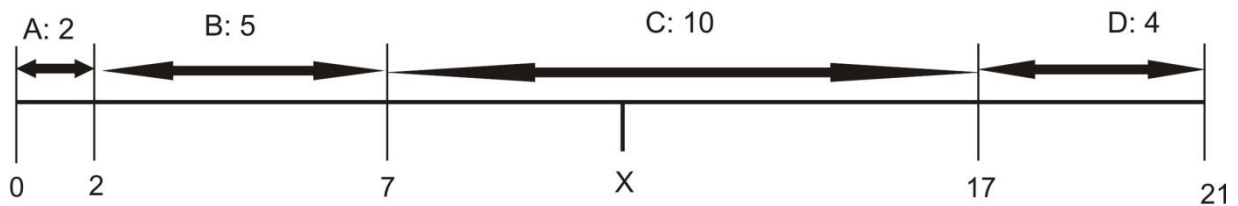
2.1.1.2 El método Montecarlo

Antes de describir la estructura y funcionamiento del sistema *Galatea*, se hará una revisión del método Montecarlo para la obtención de número pseudoaleatorios, debido a que dentro de *Galatea* las decisiones de los agentes, su tendencia de movimiento y la probabilidad de paternidad dependen de este método.

Se dice en general que usan un método de Montecarlo aquellos sistemas en los que existe una selección de eventos distintos, cada uno con una diferente probabilidad o peso, y que son elegidos de manera aleatoria, pero conforme a sus pesos respectivos (Fishman 1996; Martín-Bragado 2004). Esto es, a mayor peso, mayor probabilidad de que tal evento sea elegido, pero esto no implica necesariamente su elección, aunque si la diferencia de pesos es muy grande, se marca una clara tendencia a elegir dicho evento. En la **Figura 2.1** se explica el método de Montecarlo de forma esquemática.

Método Montecarlo

Evento	Peso
A	2
B	5
C	10
D	4



Variable aleatoria $X = 11$

Resultado del sorteo = C

Figura 2.1. Método Montecarlo. En este caso se tienen 5 posibles eventos, A, B, C y D, cada uno con sus respectivos pesos 2, 5, 10 y 4. Si se sitúan en una recta numérica cada evento cubriendo una distancia igual a su peso y se elige un punto de la recta de forma aleatoria, dando por resultado el evento que cubre dicho punto, en todos los sorteos la probabilidad de que cada evento sea elegido depende de su peso. En el caso ilustrado, el número aleatorio fue 11, que se encuentra en el área que cubre el evento C, por lo que tal evento resulta elegido.

Dados los pesos de cada evento, en este ejemplo el evento D tiene el doble de probabilidades de ser elegido con respecto al evento A, el evento C tiene el doble de probabilidades que el B y cinco veces más que el A. Figura modificada de Martín-Bragado (2004).

2.1.1.3 Funciones en *Galatea*

Las variables que el usuario define para regular el funcionamiento del sistema pueden ser constantes o funciones. Las funciones pueden tomar como parámetro valores de genes, de morfología, de percepciones del agente, de morfología de agentes interactuantes, variables de tiempo, entre otros factores. El manejo de excepciones en *Galatea* es el siguiente:

- Cuando se espera un valor entero y se obtiene uno real: la cantidad se redondea al número entero más próximo.
- Cuando se espera un número mayor o igual a cero, pero se obtiene un número negativo: el número negativo se convierte en cero.
- Cuando se espera un número real entre 1 y 0, pero se obtiene un número fuera de este intervalo: los números negativos se convierten en cero y los mayores a 1 se convierten en 1.

Las fórmulas se introducen al sistema utilizando la notación informática, basada en el lenguaje de programación C, de acuerdo a las siguientes reglas:

- Todas las fórmulas se escriben en una sola línea de texto.
- El alcance de los operadores se especifica mediante el uso de paréntesis.
- Los operadores que se pueden emplear son: suma (+), resta (-), multiplicación (*), división (/), potencia (^) y módulo (%).
- *Galatea* incorpora además el operador “número aleatorio” que se denota con el símbolo “almohadilla” o “gato” (#), el cual regresa un número aleatorio con valor mayor a cero y menor a uno, y distribución uniforme.

En el ámbito de la programación, la operación de módulo da como resultado el residuo de una división con números enteros. Por ejemplo, la operación $4\%2$, regresará un cero, ya que la división de cuatro sobre dos es exacta y no deja residuo, en cambio la operación $4\%3$, regresará uno, que es el residuo de tal división.

En el presente escrito, las fórmulas empleadas se reportan tal cual fueron introducidas al sistema, siguiendo las reglas aquí expuestas. Dentro de las fórmulas los parámetros pueden ser en referencia a valores proporcionados por el contador de ciclos del sistema, el agente en sí mismo, el elemento dinámico con el que interacciona el agente y el agente con el que

interacciona el agente mismo. Únicamente el contador de ciclos y las referencias al agente mismo están disponibles en todo momento, estando las demás restringidas a los instantes en que el agente se encuentra interactuando con elementos dinámicos o con agentes. Así pues, solo las fórmulas que sean relevantes dentro del contexto de alimentación, ovipostura y desplazamiento pueden contener parámetros relacionados con elementos dinámicos; y únicamente las relacionadas con interacción entre agentes (combate, interacción macho-hembra y desplazamiento) puede contener parámetros de otro agente.

Un agente tiene acceso a todas las variables que contiene en sí mismo, pero solo puede acceder a variables morfológicas de otro agente. Las variables morfológicas del agente ajeno se distinguen dentro de una fórmula con el sufijo *Contender*⁴ (contendiente). Se usará el calificativo “contendiente” para los dos tipos de interacción contemplados, las agonísticas y las sexuales. Un agente sólo puede interactuar con un solo elemento dinámico o con un solo agente a la vez en cada ciclo.

2.1.1.4 Estructura de entornos

Un entorno es todo aquello con lo que el agente puede interactuar. Se compone de elementos estáticos y dinámicos, así como de agentes. El entorno en *Galatea* emula al entorno de los organismos reales.

Sustrato: es un componente estático del entorno, esto es, durante todo el desarrollo de la simulación no cambiarán sus propiedades. Un sustrato simple se caracteriza por un nombre y un color, un sustrato mixto se compone de diferentes porcentajes de sustratos simples, y posee a su vez un color propio.

Podemos utilizar, por ejemplo, un sustrato denominado “pasto” y otro denominado “suelo”, asignarles color verde y marrón respectivamente. Además podemos crear un sustrato mixto compuesto por 50% pasto y 50% suelo expuesto, con un color intermedio entre verde y marrón, pero además con todas las propiedades intermedias (promediadas proporcionalmente) de los sustratos que lo componen.

⁴ Los nombres de variables preestablecidos, así como la interfaz diseñada para el sistema Galatea se encuentran en idioma inglés, con ello se pretende hacer el sistema accesible a la comunidad académica mundial.

Escenario: es un arreglo bidimensional de elementos de sustrato. Posee una longitud Norte-Sur y una longitud Este-Oeste, las cuales definen el área del escenario, que en todos los casos será rectangular. Sin embargo, declarando áreas de sustrato repulsivas a los agentes se pueden generar escenarios de cualquier forma (ver concepto de atractividad negativa en la sección Conducta-Movimiento en este mismo capítulo). Por otro lado, el arreglo bidimensional de sustratos puede simular un componente tridimensional del mismo de manera análoga a mapas topográficos. Cada elemento de sustrato ocupa una unidad de área cuadrada fija e igual a todos los demás elementos de sustrato. Al área que ocupa un elemento de sustrato (área mínima de sustrato) se le denomina “cuadro”.

Elemento dinámico: es aquel componente del entorno que cambia sus propiedades a lo largo de la ejecución de la simulación, en función del tiempo o en función de la interacción con algún agente. Su ubicación dentro del entorno es fija. Los elementos dinámicos son: fuentes de agua, fuentes de carbohidratos, fuentes de lípidos, fuentes de proteínas y sitios de ovipostura. Las cantidades de nutrimentos son variables discretas. En la **Tabla 2.1** se listan y explican las propiedades de los elementos dinámicos. Las propiedades Calidad y Nivel de los elementos dinámicos pueden ser parámetros dentro de las funciones que calculan las reglas de decisión de los agentes. De esta manera los elementos dinámicos pueden influir en las decisiones de los agentes. Todas las propiedades del elemento dinámicos, a excepción de Nivel, son fijas, por lo que no cambian a lo largo de la simulación. Si se modelaran poblaciones de mariposas, por ejemplo, las fuentes de carbohidratos corresponderían a flores con néctar.

2.1.1.5 Agentes

Un agente es el integrante activo del entorno. El agente percibe su entorno vecino y toma decisiones según sus percepciones. El agente modifica su propio estado a cada tiempo según su estado actual y el estado del entorno. Así mismo el agente modifica su entorno según sus acciones, considerando que el entorno incluye a otros agentes y elementos dinámicos. Un agente es entonces, el elemento que emula a los organismos reales.

En *Galatea* se definen prototipos de agente, que son las plantillas a partir de las cuales se crearán los agentes propiamente dichos. El poder definir prototipos de agente permite que

en la población existan diferentes morfos, como podrían ser machos satélites y territoriales, o cualquier otra forma de polimorfismo. Si bien los machos y hembras de una población son morfos en sí mismos, dado que el interés principal es simular poblaciones con reproducción sexual, se asumen por lo menos dos prototipos, uno para cada sexo. Esto, sin embargo, no impide simular poblaciones con reproducción asexual.

A continuación se describe la estructura y funcionamiento de agentes dentro del sistema *Galatea*.

Genotipo

Cada agente tiene “genes” compuestos por dos juegos de alelos (que definen los parámetros fenotípicos). Sus hijos heredan un juego de alelos de cada padre, producto del entrecruzamiento de los juegos de alelos de cada uno. Parte de la varianza en los caracteres de los hijos se debe a los padres, y otra parte definible al “azar” generado mediante funciones que incluyan valores aleatorios con distribuciones conocidas. Los genes son en realidad valores numéricos, 15 continuos y 15 discretos, para cada uno se define una tasa y un rango de mutación, así como un valor dominante y uno recesivo. Tanto la tasa como el rango de mutación son fijos para cada gen. En la **Tabla 2.2** se listan y explican las propiedades de los genes.

Ciclo de vida

Se pueden definir diferentes estadios inmaduros (no reproductivos), los cuales tienen reglas de decisión propias, pueden alimentarse y desplazarse, sin embargo no pueden combatir ni cortejar. También el usuario establece las reglas que permiten a cada agente pasar al siguiente estadio inmaduro, o al adulto. Cada huevo ovipuesto en el entorno se convierte en un agente sin prototipo definido, la asignación de prototipo que adquiere el agente al llegar a la etapa adulta se establece según reglas definidas por el usuario. El sexo se establece una vez ovipuesto el huevo, según la proporción sexual asociada al prototipo de la madre. Dicha proporción puede ser constante o calculada a partir de una función, lo que permite simular determinación ambiental del sexo. Los huevos no pueden desplazarse ni alimentarse, no son visibles, y necesariamente deben estar asociados a un portador, que puede ser un sitio de

ovipostura o un agente adulto. Esto último permite simular cualquier forma de cuidado parental durante la embriogénesis, por ejemplo embarazo en mamíferos, o cuidado de huevos en el dorso como en algunos insectos y anfibios, o en la boca como en algunos peces. Si el agente portador muere, mueren también todos los huevos que portaba.

Se pueden establecer también estadios que únicamente sean expresados por agentes que en su estadio adulto expresarán un prototipo específico, estos son llamados estadios ligados, en este caso, la asignación de prototipo ocurrirá antes de llegar al estadio adulto, cuando los agentes abandonen el último estadio no ligado. En la **Figura 2.2** se esquematiza el ciclo de vida de un agente.

Los agentes pueden morir por tres causas:

1. Alcanza una edad mayor a su longevidad. La edad del agente se mide en ciclos (ver Dinámica de simulaciones). El ciclo en que es ovipuesto el huevo es el ciclo uno de la vida del agente. La longevidad puede ser una constante o bien una función, y está asociada al prototipo de agente. Únicamente los agentes adultos pueden morir por longevidad.
2. Alguno de los nutrimentos alcanza un valor inferior al mínimo establecido dentro de las reservas del agente. Esta causa de muerte se explicará en la sección de fisiología. El agente puede morir por esta causa en cualquier etapa del ciclo de vida, excepto en el estadio huevo.
3. El agente “decide” morir. En *Galatea* la muerte es considerada una conducta más, por lo que el agente también puede decidir morir. El mecanismo de elección de conductas se explica en la sección conducta. En cualquier etapa de su ciclo de vida el agente puede morir por esta causa.

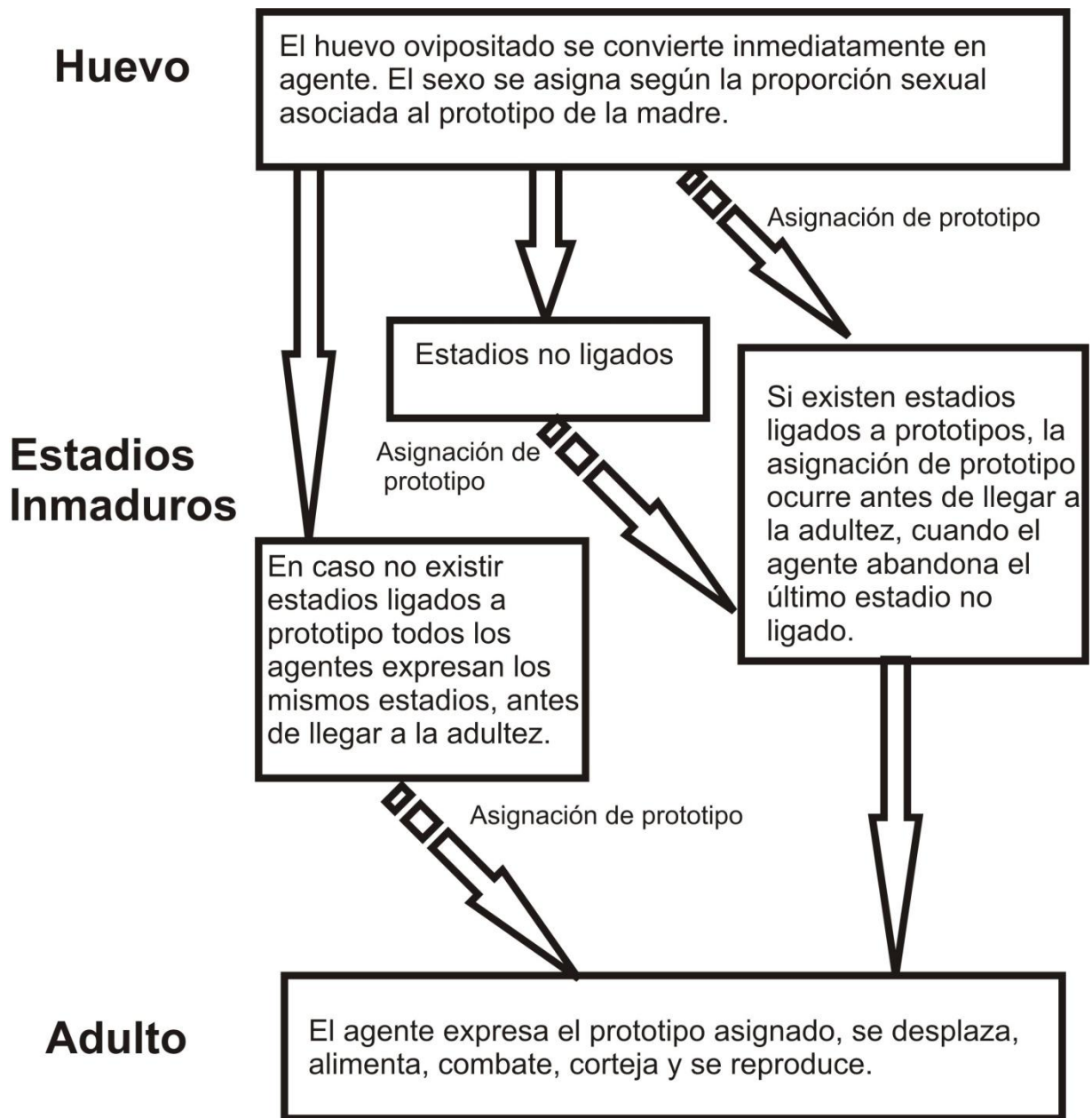


Figura 2.2 Ciclo de vida de un agente. La asignación de sexo ocurre con la ovipostura. Para cada prototipo de hembra se definen dos números, que pueden ser constantes o funciones; a partir de estos dos número (Machos:Hembras) se calcula la proporción sexual asociada a dicho prototipo de hembras.

La asignación de prototipo puede ocurrir en tres momentos, cuando el agente se convierte en adulto, cuando abandona el último estadio inmaduro no ligado, o cuando eclosiona, si es que no existen estadios inmaduros ligados. Aunque un agente en estadio inmaduro ya tenga prototipo asignado, no expresará tal prototipo sino hasta que alcance la adultez. La muerte puede ocurrir en cualquier etapa de este ciclo de vida.

Morfología

Cada prototipo de agente tiene 15 caracteres morfológicos de valor continuo, y 15 de valor discreto. El usuario puede asignarles el nombre que desee (peso, longitud, número de patas, etc.). El valor de cada carácter morfológico puede ser fijo, o una función dependiente de los genes, de otros caracteres morfológicos, e inclusive de las percepciones del agente. El que la morfología pueda depender de una amplia gama de factores permite no solo simular expresión de genes, sino efectos del entorno sobre el fenotipo.

Fisiología

Cada agente tiene sus propias reservas internas de agua, carbohidratos, lípidos, grasas y proteínas, mismas que consume para llevar a cabo cualquier actividad y para producir gametos. Toda acción que realice el agente tendrá un costo energético (definido por el usuario). El gasto de energía repercute en la reservas de agua, lípidos y proteínas. El agente abastecerá sus reservas internas tomando recursos de las fuentes de nutrimentos (elementos dinámicos), con lo que disminuirá la disponibilidad de estos recursos en sus respectivas fuentes. En cualquier caso en que se hable de definición de costos dentro del sistema *Galatea* va implícita la idea de que estos costos se definen por separado para cada tipo de nutrimento, y que estos pueden ser iguales a cero (conductas que no cuestan nada).

Los nutrimentos se miden en cantidades discretas. El usuario define los costos de cada conducta y la cantidad de unidades tomadas cuando el agente interacciona con elementos dinámicos que son fuentes de nutrimentos, esto es, por ejemplo, cantidad de agua bebida por cada interacción con una fuente de agua cuando el agente ha decidido beber.

También se definen los costos de producción de gametos (huevos en hembras, paquetes espermáticos en los machos), y el número máximo de estos que el agente puede producir. Dentro de la dinámica de producción de gametos se definen otros valores que se listan y explican en la **Tabla 2.3**. Los huevos y los paquetes espermáticos son en realidad estructuras de información que contienen un genotipo haploide y nutrimentos. Los nutrimentos del huevo serán aprovechados por el agente que se origine a partir de ese huevo, y los nutrimentos del paquete espermático serán aprovechados por la hembra que los reciba.

Se asume que un solo paquete espermático contiene tantos espermatozoides como para fertilizar todos los huevos de la hembra, así que el paquete espermático podrá seguir siendo usado para fertilizar, en tanto permanezca almacenado por la hembra. La posibilidad de que un paquete espermático sea utilizado para fertilizar huevos, depende de la variable probabilidad de paternidad. Al momento de la fertilización, se realiza un sorteo mediante el método Montecarlo entre los paquetes espermáticos que contenga la hembra, donde la variable probabilidad de paternidad es el peso con el que cada paquete toma parte en el sorteo. El sorteo se realiza por cada uno de los huevos que la hembra fertiliza. Este mecanismo de elección simula competencia espermática, y además, pérdida de capacidad fertilizante del paquete por degradación, como se explica en la **Tabla 2.3** en la variable tasa de degradación de esperma. Dado que la variable probabilidad de paternidad debe ser discreta, en cuanto el redondeo del cálculo de la misma resulte en 0, el paquete espermático ya no tendrá probabilidad de fertilizar. Un paquete espermático es desechado por la hembra cuando tanto la cantidad de nutrientes que contiene como su probabilidad de paternidad se redondean a cero.

La haploidía tanto de huevos como de paquetes espermáticos se establece mediante un proceso de manipulación de los datos genéticos de los padres que simula la meiosis.

Además de costos y ganancias, se establecen los valores mínimos, críticos, óptimos y máximos para cada nutriente. En la **Tabla 2.4** se listan y explican estos valores.

En el apartado de fisiología se define también la velocidad asociada al sustrato, se establece por separado para cada sustrato, y será la velocidad (medida en cuadros por ciclo) a la que se desplaza el agente cuando se encuentre sobre un sustrato específico.

Todos los valores que el usuario define en el apartado de fisiología pueden ser funciones o constantes, y estos valores son independientes del prototipo, por lo que se aplican los mismos valores o fórmulas a todos los agentes. La única forma de que los valores declarados en el apartado de fisiología diverjan entre agentes es utilizando fórmulas que involucren parámetros del propio agente.

Conducta

Una vez alcanzado el estadio adulto, durante la ejecución de la simulación el agente se pueden encontrar en tres diferentes situaciones: no interactiva, combate y cortejo. Las conductas que

el agente puede realizar en cada una de estas situaciones se listan en la **Tabla 2.5**. Únicamente en la situación “no interactiva” puede ocurrir la muerte por decisión, en todas las situaciones puede ocurrir la muerte por falta de nutrimentos y longevidad.

La situación “no interactiva” implica que el agente no se encuentra interaccionando con otro agente, pero sí puede interaccionar con elementos dinámicos.

Las tendencias de movimiento, interacciones con otros agentes (agonistas o sexuales), las interacciones con elementos dinámicos (beber, comer y oviponer), así como la influencia que puedan tener los sustratos sobre las reglas de decisión de los agentes se definen en las matrices de interacción.

Las matrices de interacción son tabulaciones en cuyos renglones se listan todos los prototipos de agentes y estadios inmaduros, y en las columnas, según el caso, los sustratos, los elementos dinámicos o los agentes mismos.

Propiedad	Definición
Tipo	Puede ser: fuente de agua, fuente de lípidos, fuente de proteínas, fuente de carbohidratos o sitio de ovipostura.
Nombre	Es el identificador con el que el sistema distingue a cada elemento individualmente: automáticamente el sistema asigna un nombre formado por 5 letras y 5 números aleatorios.
Nivel	Es la cantidad de unidades de alimento, o bien, en el caso de sitios de ovipostura, cantidad de huevos, que el elemento contiene en determinado instante. Estas unidades son número discretos mayores o iguales a cero.
Calidad	Es un número discreto mayor o igual a cero, puede funcionar como parámetro en las reglas de decisión del agente, pero no influye en absoluto sobre el elemento dinámico mismo.
Máximo	Es la cantidad máxima de unidades de nutrimentos (o huevos en el caso de sitios de ovipostura) que puede contener el elemento dinámico.
Tasa de relleno	Es un número real mayor a o igual a uno, por el cual la propiedad Nivel del elemento dinámico se multiplica en cada ciclo. No aplica en el caso de sitios de ovipostura.

Tabla 2.1. Propiedades de los elementos dinámicos. Las propiedades aquí listadas son válidas para todos los tipos de elementos dinámicos, a excepción de los sitios de ovipostura, para los cuales no se puede definir una tasa de relleno, ya que su nivel se determina por la cantidad de huevos que han sido ovipuestos por los agentes en los mismos, menos los que han eclosionado.

Propiedad	Definición
Nombre	Para loci continuos va de CL1 a CL15, y para discretos va DL1 a DL15. Estos identificadores se usan como parámetros en las fórmulas que definen la morfología y conducta de los agentes.
Valor dominante	Es el valor que se tomará en cuenta al computar fórmulas que contengan como parámetro al locus cuando el atributo del locus sea dominante.
Valor recesivo	Es el valor que se tomará en cuenta al computar fórmulas que contengan como parámetro al locus cuando el atributo del locus sea recesivo.
Tasa de mutación	Es la probabilidad (entre 0 y 1) de que el locus mute (cambie su valor) al ser heredado. Las tasas de mutación se definen por separado para el valor recesivo y el valor dominante.
Intervalo de mutación	Establece el intervalo de variación del valor del locus cuando muta. Se define por separado para el valor recesivo y el valor dominante.

Tabla 2.2 Propiedades de los genes. Los nombres CL y DL son las siglas en inglés de locus continuo (*continuous locus*) y locus discreto (*discrete locus*) respectivamente. Si se define, por ejemplo, para el locus continuo CL5 un valor dominante de 7.5 y uno recesivo de 5.3, y al valor dominante se le asigna una tasa de mutación de 0.01 y un intervalo de mutación de 0.05, el resultado será que cuando se herede el locus en el 1% de los casos mutará, y adquirirá un valor de que puede ser 0.05 mayor (7.55) o 0.05 menor (7.45).

A lo largo del texto se usarán las siglas en español LC y LD para locus continuo y locus discreto respectivamente. Únicamente cuando se reporten fórmulas o parámetros se utilizará la notación en inglés descrita aquí.

Variable	Definición
Número de paquetes espermáticos proporcionados por cópula (macho vs. hembra)	Es la cantidad de paquetes espermáticos que el agente transfiere a la hembra al consumarse la cópula.
Máximo número de paquetes espermáticos almacenados por la hembra (hembra)	Es la cantidad máxima de paquetes que la hembra puede almacenar a un tiempo, en caso de que el número de paquetes que almacena se igual a este número, la hembra no aceptará más paquetes, aunque existan cópulas posteriores.
Tasa de consumo de los nutrimentos del paquete espermático (hembra)	Número entre 0 y 1 por el cual se multiplican las cantidades de nutrientes del paquete espermático en cada ciclo, una vez almacenado por la hembra, la cantidad resultante de esta operación se redondea y se suma a las reservas de nutrimentos de la hembra, y se restan a los del paquete espermático.
Fracción de huevos fertilizados justo después de la cópula (hembra vs. macho)	Número entre 0 y 1 por el cual se multiplica la cantidad de huevos sin fertilizar que almacena la hembra, la cantidad resultante se redondea y será la cantidad de huevos que serán fertilizados inmediatamente después de que termine la cópula, el resto de los huevos serán fertilizados justo antes de oviponer, pudiendo la hembra haber adquirido más paquetes en más cópulas.
Probabilidad de paternidad (hembra vs. macho)	Es el peso, según el método Montecarlo, con el que un paquete espermático determinado toma parte en el sorteo que decide con cuál paquete espermático la hembra fertilizará cada uno de los huevos.
Tasa de degradación de esperma (hembra vs. macho)	Número entre 0 y 1 por el que se multiplica la probabilidad de paternidad de cada paquete en cada ciclo, esto implica que tal probabilidad irá disminuyendo.
Huevos ovipuestos por ciclo (hembra)	Cantidad de huevos que la hembra ovipone, una vez fertilizados, en cada ciclo que interaccione con un sitio de ovipostura.

Tabla 2.3. Variables de la dinámica de gametos. Algunos valores dependen exclusivamente del macho, otros de la hembra, y otros de ambos. Entre paréntesis se indica cuál es el sexo del agente cuyos parámetros se tomarán en cuenta en el cálculo de estas variables, en caso de que se indique confrontación (vs.) el primer sexo corresponde al agente involucrado, y el segundo al que se toma como contendiente o pareja (ver Funciones en *Galatea*).

Variable	Definición
Mínimo	Cuando las reservas de cualquiera de los nutrientes alcanzan un valor menor a esta variable, el agente muere en ese mismo ciclo.
Crítico	Cuando las reservas de cualquiera de los nutrientes alcanzan un valor menor a esta variable el agente no realiza combates ni cortejo, por lo que se prioriza la búsqueda y obtención de alimento.
Óptimo	Únicamente cuando todas las reservas de nutrientes tienen un valor mayor a esta variable el agente produce gametos, empleando todos los recursos excedentes, es decir, usando todas sus reservas, hasta que algún nutriente no esté disponible en sus reservas en cantidad mayor a la óptima.
Máximo	Cuando las reservas de algún nutriente superen este valor, el agente no realizará la conducta asociada a la obtención de ese nutriente aún en cercanía de la fuente. Por ejemplo: no beber si se ha rebasado el máximo permitido de agua almacenada.

Tabla 2.4 Variables metabólicas. En todos los casos se trata de valores discretos mayores o iguales a cero. Cada uno de estos cuatro valores se define por separado para cada uno de los nutrientes (agua, carbohidratos, lípidos y proteínas). Se entiende por excedente cuando el agente tiene algún nutriente en reservas mayores a la óptima. Cuando hay excedentes en todos los nutrientes, el agente emplea sus reservas para producir gametos, hasta que las reservas de cualquiera de los nutrientes sean menores a su valor óptimo.

Situación	Conductas
No interactiva	<ol style="list-style-type: none"> 1. Moverse 2. Estático 3. Beber 4. Comer carbohidratos 5. Comer lípidos 6. Comer proteínas 7. Despliegue agresivo 8. Escalada agresiva 9. Despliegue intento de cópula 10. Escalada intento de cópula 11. Oviponer 12. Morir
Interacción de combate	<ol style="list-style-type: none"> 1. Despliegue agresivo 2. Escalada agresiva 3. Rendición
Interacción de cortejo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Despliegue intento de cópula 2. Escalada intento de cópula 3. Receptividad 4. Cópula

Tabla 2.5. Conductas asociadas a cada una de las situaciones en las que un agente adulto se puede encontrar. Las conductas alimentarias (beber y comer) y la de oviposición, sólo pueden ejecutarse cuando el agente se encuentre en vecindad (distancia no mayor a un cuadro) de un elemento dinámico relacionado a la conducta dada (fuente de agua para beber, sitio de ovipostura para oviponer, por ejemplo). Las conductas de combate sólo se pueden realizar cuando el agente se encuentre interaccionando con otro agente adulto, y las de cortejo cuando interacciona con un agente adulto del sexo opuesto.

Movimiento

Cuando el agente decide moverse, la decisión de hacia dónde se dirige se ve influida por varios factores. El agente únicamente puede moverse hacia 8 direcciones posibles, establecidas por los 8 cuadros contiguos al cuadro en que se encuentra, como se muestra en la Figura 2.3. El usuario define las tendencias de movimiento; esto es, por cada dirección se establece un peso, para que en un sorteo de Montecarlo el agente decida en qué dirección dirigirse.

Cuando el usuario define las tendencias de movimiento la referencia a cada dirección se hace de manera relativa, es decir, el frente es la dirección a la que apunta la cabeza del agente. De esta manera, una tendencia a ir hacia el frente, es en realidad una tendencia a mantener la misma dirección, y una tendencia a ir hacia atrás, es en realidad una tendencia a cambiar la dirección en 180°.

Las tendencias de movimiento son afectadas además por la atractividad de los elementos presentes en el entorno. La atractividad se define en matrices de interacción. El usuario define un total de tres matrices para establecer la atractividad: una para los sustratos, otra para los elementos dinámicos y otra para los agentes.

En cada celda de las matrices de atractividad se definen dos valores: atractividad y radio de percepción. La atractividad es un valor discreto que se usa para calcular la influencia del elemento en las tendencias de movimiento del agente, como se explicará más adelante. El radio de percepción es un valor entero mayor o igual a cero, define la distancia mínima a la que debe estar el agente para que sea capaz de percibir al elemento, puede ser constante o función. Se utiliza la distancia euclidiana, redondeando la cantidad al entero más próximo.

Para calcular las tendencias de movimiento una vez que el agente ha decidido moverse, primero se realiza un barrido de todos los demás elementos del entorno, se calcula si están dentro del radio de percepción, y en su caso se almacena su atractividad para ser promediada después. Finalizado el barrido, se promedian las atractividades de todos los elementos situados dentro del radio de percepción del agente y se obtienen 8 promedios en total, uno por cada una de las áreas de influencia (ver **Figura 2.4**). A cada una de las tendencias de movimiento se les suma el promedio correspondiente a su área de influencia, considerando que la dirección absoluta del área de influencia no necesariamente corresponde a la dirección relativa del

agente. Por ejemplo: si el agente tiene la cabeza orientada hacia el Oeste del entorno, éste será el Frente del agente, por lo que el promedio de atractividades de los elementos situados en el área de influencia Oeste, serán sumados a la tendencia del agente a ir hacia su Frente, o sea, a su tendencia a conservar la misma dirección.

Para calcular los promedios de atractividades primero se eliminan los valores iguales a cero, por lo que los elementos cuya atractividad sea cero, no ejercerán influencia alguna sobre las tendencias de movimiento del agente.

Es importante destacar que la atractividad puede ser un valor negativo, lo que hará que un elemento cuya atractividad sea menor a cero tenga una influencia repulsiva sobre el agente. Eventualmente un valor negativo muy alto de atractividad, o bien la suma de muchos elementos con atractividad negativa pueden disminuir considerablemente o bien anular la tendencia del agente a dirigirse hacia cierta dirección. En la **Tabla 2.6** se muestran las tendencias de movimiento preestablecidas en *Galatea*.

La relación entre las formas en que se mueven los organismos, y su influencia en la dinámica de la población ante un entorno heterogéneo ya ha sido estudiada ampliamente con simulaciones (Thurchin 1991).

Matrices de interacción

Dentro de las matrices de interacción, en cada celda se establece una serie de valores separados por comas, que corresponde a una conducta en particular. El valor declarado para cada conducta determina la probabilidad de que tal conducta sea ejecutada por el agente en el renglón si en su percepción se encuentra el elemento de la columna.

Las interacciones sexuales y de combate se establecen en matrices, en los renglones y en las columnas se listan las conductas relacionadas. En el caso de las interacciones sexuales las conductas implicadas son: intento de cópula de baja magnitud (despliegue), intento de cópula de alta magnitud (escalamiento), cópula y rechazo de cópula. Para combates las conductas son: agresión de baja magnitud (despliegue), agresión de alta magnitud (escalamiento) y rendición.

En las matrices de interacciones sexuales y de combate los valores en las celdas corresponden a valores que definen la probabilidad de que el agente responda con la conducta

de la columna ante la ejecución de la conducta del renglón por parte del agente con el que interacciona (pareja potencial o contendiente).

Si durante la ejecución de la simulación el agente decide combatir con otro se inicia la dinámica de combate, en sucesivos ciclos cada agente decidirá qué hacer en base a las acciones del contendiente, el combate culmina con la rendición o muerte de alguno de los implicados.

De igual forma la dinámica de las interacciones sexuales culmina con la cópula, o bien con el rechazo o muerte de alguno de los involucrados.

Las dinámicas de interacción sexual y de combate implementadas se basan en diversos modelos que pretenden describir la dinámica de interacción en combate o interacción macho-hembra; principalmente Maynard-Smith y Price (1973), Enquist y Leimar (1983), Clutton-Brock y Parker (1995), y Taylor y Elwood (2003).

Dinámica de simulaciones

El simulador actúa a intervalos discretos de tiempo denominados ciclos. La duración del ciclo depende del tiempo que tarda el sistema en recorrer a todos los agentes, proveerlos de percepciones, recibir las acciones de éstos y actualizar el entorno. Al inicio de cada ciclo se llevan a cabo dos sorteos, uno que determina con cuál de los agentes se inicia el ciclo, y otro que determina el orden a seguir en la elección del siguiente agente.

Según la clasificación de Russell y Norung (1996), las propiedades del entorno de un sistema como *Galatea* lo caracterizarían como:

- Accesible: el aparato sensorial de un agente le permite tener acceso al estado total del entorno.
- Determinista: El estado siguiente del entorno se determina completamente por el estado actual y las acciones elegidas por los agentes. En este punto cabe recalcar que el determinismo se refiere únicamente al estado siguiente del sistema una vez que todos los agentes ya han decidido, ya que el comportamiento global del sistema a través de los ciclos no es determinista, puesto que las decisiones de los agentes son influidas por un componente aleatorio proveniente del sorteo Montecarlo involucrado.

- Episódico: La experiencia del agente se divide en episodios (ciclos). Cada episodio consta de un agente que percibe, decide y actúa.
- Estático: No existe la posibilidad de que el entorno sufra modificaciones mientras el agente se encuentra deliberando.
- Discreto: Existe una cantidad limitada de percepciones y acciones distintas y claramente discernibles.

Al igual que muchos ejemplo de VA, el Sistema *Galatea* es matemáticamente irreductible, ya que no existe método analítico que pueda predecir el estado del sistema al tiempo t , la única forma de averiguarlo es iterar t veces el sistema. El sistema *Galatea* es a su vez no determinista, ya que al estado inicial t_0 no corresponde a un, y sólo un estado final t_n .

Un tipo de modelos ampliamente utilizado en la VA es el de los algoritmos genéticos (Goldberg 1989), principalmente encaminados a optimizar diseños y métodos. Parten de una población de individuos, que en realidad son cadenas de texto o código, a partir de los cuales se resuelve un problema. Después de calificar el desempeño de cada individuo se selecciona a los más aptos para que mediante un proceso que emula el entrecruzamiento de genes, se generen hijos, de esta manera se espera que los hijos hereden la aptitud de los padres, pero con cierta variabilidad. Después de iterar el sistema una gran cantidad de generaciones, los individuos resultantes suelen ser una buena solución al problema que se desea resolver. En este método existe la llamada “función de adecuación” que decide en cuantas cruza participará cada individuo, a partir de su propia aptitud. Más que emular la evolución por selección natural, los algoritmos genéticos son modelos de selección artificial ya que la llamada “función de adecuación” se establece *a priori*.

Galatea no puede equipararse a un algoritmo genético, puesto que no existe ninguna “función de adecuación”. La adecuación de cada individuo la determina su aptitud para sobrevivir, encontrar pareja, ser aceptado por ésta, fertilizar sus gametos y favorecer la sobrevivencia de su descendencia. Lo anterior corresponde al concepto de “adecuación emergente” propuesto por Strand y cols. (2002).

Archivos de salida generados

El simulador genera diversos archivos de salida, los cuáles proporcionan los datos necesarios para:

- Estadísticas instantáneas
- Registro del entorno en cada ciclo
- Filogenias
- Registro del estado del entorno en cada ciclo para reproducir la simulación

Los datos son exportables a archivos legibles por numerosos paquetes informáticos de análisis de datos entre los que destaca, únicamente por ser el de más amplio uso, Excel™ de Microsoft Corporation®.

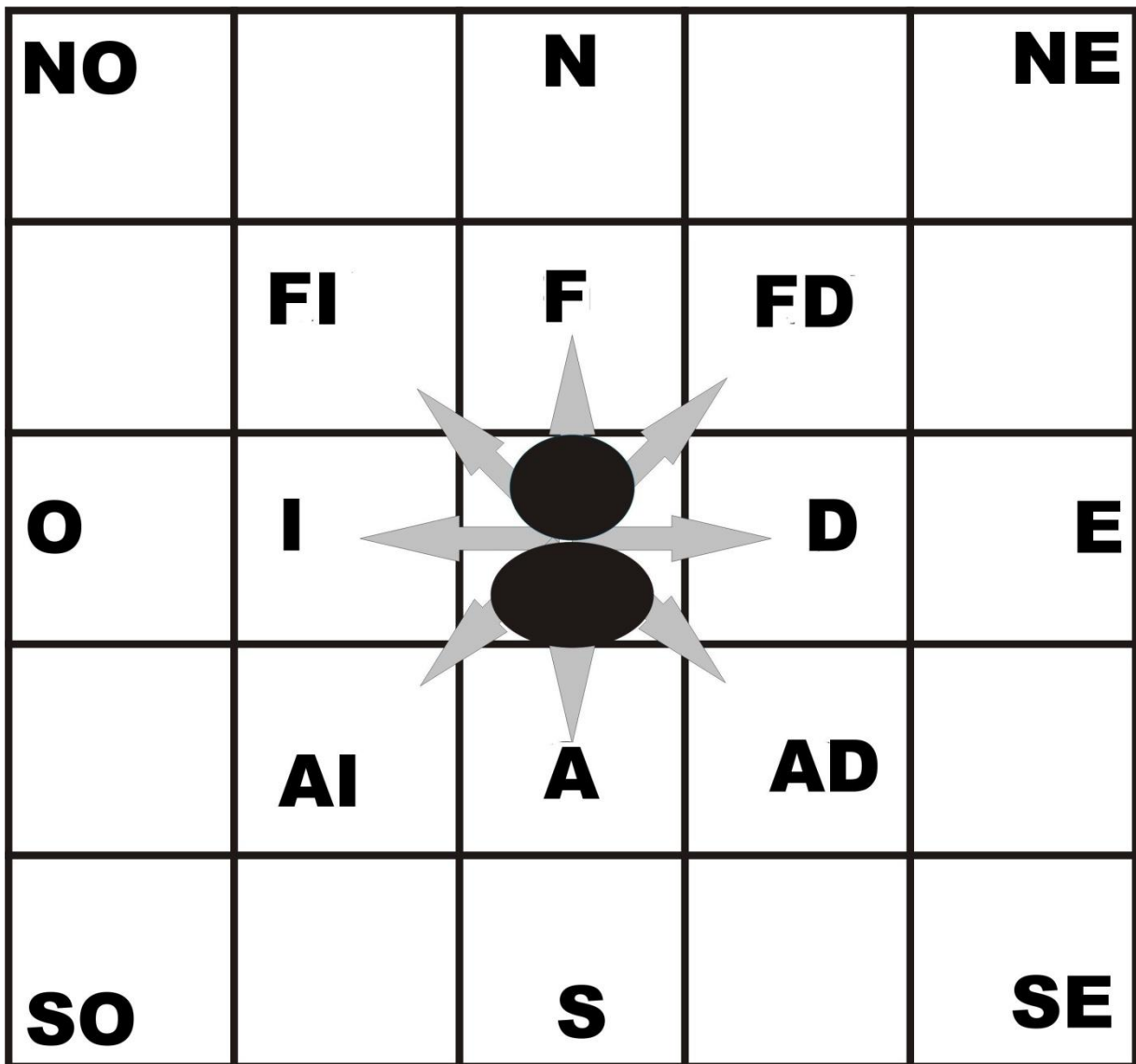


Figura 2.3. Direcciones en *Galatea*. Los agentes únicamente pueden tomar cualquiera de estas ocho direcciones: N = norte, NE = noreste, E = este, SE = sureste, S = sur, SO = suroeste, O = oeste y NO = noroeste. Las direcciones se pueden tratar de manera absoluta, en la que el Norte es el Norte del escenario, o relativa, en la que el Frente se sitúa hacia delante del agente y su Atrás en dirección contraria. Así, si un agente dirige la cabeza hacia el sur del escenario, el Frente para el agente será el sur del escenario. Las direcciones relativas se denotan con: F = frente, FD = frente-derecha, D = derecha, AD = atrás-derecha, A = atrás, AI = atrás-izquierda, I = izquierda y FI = frente-izquierda.

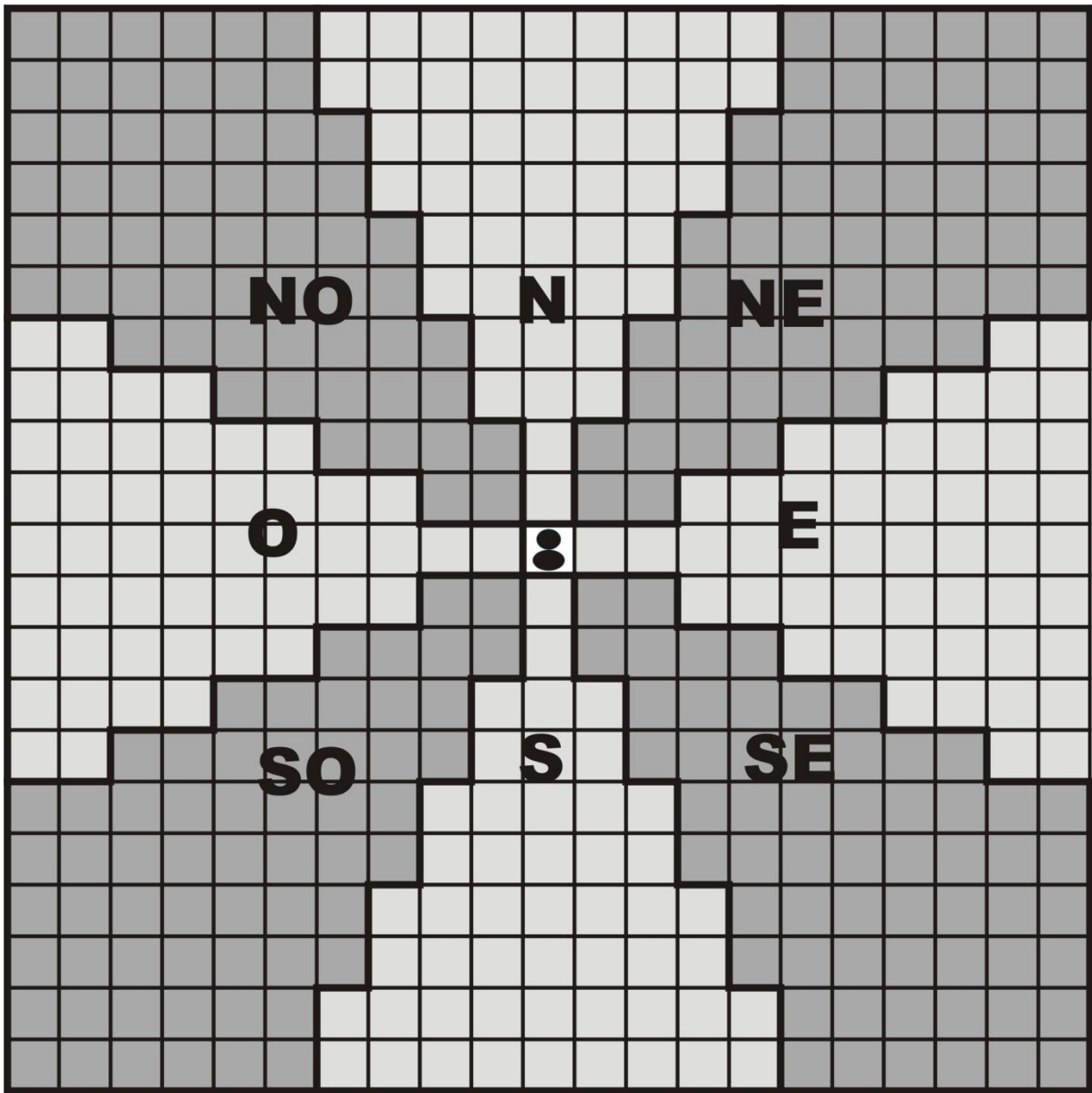


Figura 2.4. Áreas de influencia de los elementos en *Galatea*. Los elementos situados en cada una de estas áreas podrán ejercer influencia en las tendencias de movimientos del agente, si es que se encuentra dentro del radio de percepción definido para tal elemento con respecto a tal agente. En este caso los elementos situados en el área sombreada Norte modificarán la tendencia del agente a ir hacia esa dirección, y así sucesivamente con todas las demás áreas y sus respectivas direcciones. Si el agente apunta la cabeza hacia el Sur del entorno, por ejemplo, entonces el Sur del entorno será el Frente del agente, por lo que los elementos situados al Norte absoluto afectarán la tendencia a ir a la dirección Atrás del agente (cambiar su dirección en 180°).

Dirección	Tendencia
Frente	50
Frente-Derecha	25
Derecha	10
Atrás-Derecha	1
Atrás	1
Atrás-Izquierda	1
Izquierda	10
Frente-Izquierda	25

Tabla 2.6. Tendencias de movimiento preestablecidas en *Galatea*. Estos valores se traducen como una tendencia a conservar la dirección actual en la mayoría de los casos, eventualmente cambiar la dirección en 45°, pocas veces cambiar la dirección en 90°, y casi nunca invertir la dirección, lo cual es el tipo de desplazamiento característico de la mayoría de los artrópodos terrestres (Kindvall, 1999). Cabe recordar que estas tendencias son pesos que toman parte en un sorteo Montecarlo, y que tales pesos pueden ser alterados por las percepciones del agente, por lo que se espera que estas tendencias se modifiquen constantemente en cada ciclo.

3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen numerosos sistemas de simulación orientados a explorar problemas de ecología y evolución. Sin embargo, un sistema con la potencia y flexibilidad de *Galatea* aún no ha sido reportado. Verificar y validar un sistema tal, pondrá a disposición de la comunidad académica mundial una herramienta robusta, novedosa y versátil, que permitirá analizar desde otro enfoque, una infinidad de problemas relacionados con diversas áreas de la Biología

El aspecto multidisciplinario del presente trabajo, su originalidad, y su vasto campo de aplicación, constituyen la principal fortaleza del mismo.

4. HIPÓTESIS

El Sistema *Galatea* es una herramienta funcional y útil para explorar problemas específicos en Ecología y Biología Evolutiva.

Predicción

El Sistema *Galatea* será capaz de replicar resultados publicados, en base a los datos o parámetros empleados por los autores originales de las fuentes consultadas.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Validar al Sistema Simulador de Estrategias Reproductivas *Galatea* como herramienta predictiva en Ecología.

5.2 Objetivos particulares

- Ratificar la verificación del Sistema *Galatea*.
- Contrastar resultados ya publicados en revistas de ecología contra réplicas realizadas en *Galatea*.
- Comprobar la utilidad de los sistemas de simulación basados en agentes como herramienta experimental y predictiva en Ecología Conductual y Biología Evolutiva.

6. METODOLOGÍA

A continuación se presenta un listado que resume el método desarrollado en el presente trabajo:

1. **Revisión en literatura** de artículos publicados en revistas de ecología en que se hayan empleado modelos de simulación.
2. **Selección de resultados a replicar** acorde a qué tan trasladables son a *Galatea* los métodos descritos. El criterio de selección consistió en: que el modelo se basara en individuos e implicara desplazamiento espacial, que los parámetros estuviesen descritos de manera explícita, y, principalmente, que la dinámica del sistema estuviese determinada principalmente por las decisiones de los individuos. Se seleccionaron dos artículos.
3. **Ejecución de las simulaciones.**
4. **Procesamiento de datos.** Con ayuda de paquetes informáticos de estadística se analizaron los datos arrojados por las simulaciones.
5. **Análisis y conclusiones.** Se compararon los datos obtenidos mediante *Galatea* para contrastarlos con los publicados en las fuentes originales. Se valoró si con *Galatea* fue posible replicar los resultados.

6.1 Primera validación: éxito reproductivo en escarabajos saproxilicos

Jonsson y cols. (2003) comparan la eficiencia de dos estrategias de búsqueda de pareja de los escarabajos de las familias Cisidae y Anobiidae que habitan en cuerpos fructíferos de hongos en madera en descomposición. En el caso de la familia Cisidae, ambos sexos son atraídos por el aroma del hospedero, mas no por feromonas (estrategia sin feromonas). En tanto en la familia Anobiidae las hembras son atraídas por el aroma del hospedero, y los machos son atraídos por las feromonas de las hembras (estrategia con feromonas) (**Tabla 6.1**).

Con simulaciones se comparan ambas estrategias, a cuatro diferentes combinaciones de densidad de árboles con hongos hospederos (53, 27, 12, 6) y de individuos por hospedero (25, 4, 1). Se destaca que estas densidades se basan en conteos reales realizados en campo.

El éxito reproductivo se estimó con el parámetro T_{50} , que se define como la cantidad de

iteraciones (ciclos) necesarios para que el 50% de las hembras sean copuladas. Jonsson y cols. (2003) encontraron que la estrategia con feromonas tiene una ligera ventaja a altas densidades de conespecíficos y baja densidad de árboles. La estrategia con feromonas aumenta su eficiencia cuando disminuye la densidad de individuos y de árboles. Los autores concluyeron que los escarabajos con la estrategia sin feromonas son más sensibles a la fragmentación de hábitat.

Cabe destacar que los parámetros empleados por Jonsson y cols. (2003) se basan en datos obtenidos en campo con diferentes especies de las familias citadas.

6.1.1 Réplica con *Galatea*

A continuación se describen los entornos *Galatea* diseñados para replicar los resultados reportados por Jonsson y cols. (2003).

Sustratos

Se utilizaron tres sustratos: *pasto*, *madera* y *hongos*, de colores verde, marrón y gris respectivamente.

Escenarios

Se diseñaron tres escenarios de 200 x 200 cuadros, con diferentes densidades de hospederos: alta (**Figura 6.1**), media (**Figura 6.2**) y baja (**Figura 6.3**); con 27, 12 y 6 cuerpos fructíferos respectivamente. Las densidades fueron tomadas del artículo original. El tamaño del escenario se estableció acorde a las capacidades del equipo de cómputo disponible.

Juegos de agentes

En la construcción de un proyecto con *Galatea*, el diseño de los agentes es el aspecto que requiere mayor atención. Dentro del juego de agentes se establecen una gran cantidad de variables que determinarán la dinámica del sistema. A pesar de la gran flexibilidad y control que ofrece el sistema *Galatea*, sólo se manipularon una cantidad muy limitada de variables, por lo que aquí únicamente se reportarán los valores diferentes a los preestablecidos en el sistema, o bien aquellos que influyan en las reglas de decisión de los agentes. Los valores no

reportados son irrelevantes, considerando que gran parte de los valores manipulables dentro del juego de agentes tienen influencia sobre el desarrollo de la simulación únicamente si forman parte de los parámetros de las funciones que determinan la conducta o de los agentes, o bien tienen influencia en el cálculo de dichos parámetros.

Se diseñaron dos juegos de agentes, uno para la estrategia con feromonas y otro para la estrategia sin feromonas. Se reportarán primero los parámetros que comparten ambos juegos y posteriormente se detallarán las diferencias.

La velocidad de desplazamiento de los agentes fue de un cuadro por ciclo en todos los sustratos, excepto el sustrato pasto, con cuatro cuadros por ciclo. Las hembras ejercían una atractividad sobre los machos de 50.

En relación al metabolismo de los agentes, para todas las conductas se fijó un costo energético nulo, los agentes al no consumir reservas internas de nutrimentos no necesitaban alimentarse. Los agentes eran inmortales. La producción de gametos también ocurría sin costos, en todo momento los machos portaban un paquete espermático y las hembras un huevo. En cuanto un macho se encontraba contiguo a una hembra, se iniciaba la dinámica de cortejo, si la hembra era virgen, ésta aceptaba inmediatamente la cópula. Posterior a la cópula el periodo refractario de la hembra era indefinido, por lo que las hembras se apareaban solamente una vez. Nunca ocurría la ovipostura, por lo que no nacían nuevos individuos.

Las hembras eran indiferentes a todos los sustratos y hacia los machos, y su probabilidad de moverse era cero, cuando estaban sobre el sustrato hongos.

Las dos únicas diferencias entre el juego de agentes correspondiente a la estrategia sin feromonas, y la estrategia con feromonas, consistieron en que en ésta última, el radio de percepción de los machos para localizar hembras era de 20, contra 1 en el caso de la estrategia sin feromonas. Este parámetro fue tomado del artículo de referencia, y simula el hecho de que con la acción de las feromonas los machos detectan a las hembras en un radio más amplio. La segunda diferencia consiste en que para el caso de la estrategia sin feromonas, la atractividad de los hongos sobre los machos era de 50, en un radio de percepción de 10, puesto que los autores reportan que el radio de atractividad de las feromonas es el doble respecto al radio de atractividad de las hembras. La atractividad no es un parámetro empleado en el artículo original. En el modelo empleado por Jonsson y cols. (2003) los individuos perciben, y en caso

de que dentro de su radio de percepción se encuentre el elemento que los atrae (hembras u hongos) el desplazamiento hacia tal elemento era instantáneo.

Entornos

Se diseñaron doce entornos, resultado de combinar las tres diferentes densidades de hospederos (27, 12, 6), con dos densidades de individuos por hospedero (4, 1), con ambas estrategias (sin feromonas, con feromonas). La diferencia entre los parámetros reportados en el artículo de referencia, y los que en realidad se emplearon en el presente trabajo, responde solamente a limitaciones en el poder de cómputo que otorgaba el equipo disponible. Como se verá más adelante en los resultados y discusión, esta salvedad no mermó la capacidad de replicar los resultados del artículo de referencia.

Todos los individuos eran adultos. Las hembras fueron colocadas solamente sobre sustrato hongos, por lo que jamás se movían. Los machos fueron colocados aleatoriamente sobre el entorno.

La distribución inicial de los individuos era idéntica para los entornos que compartían la misma densidad de hospederos e individuos, ya sea que fueran relativos a la estrategia con feromonas o sin feromonas.

Simulaciones

Se realizaron diez réplicas por cada uno de los doce entornos diseñados (120 ejecuciones en total), partiendo de condiciones iniciales idénticas. El equipo de cómputo empleado para ejecutar las simulaciones consistió en una computadora personal portátil compatible con IBM-PC™, marca Dell®, modelo Inspiron 6400™, con procesador Intel® T2050™ de núcleo dual a 1.6 GHz y 1 Gb de memoria RAM; con sistema operativo Linux 2.6, distribución Ubuntu™ 11.10 (*Oneiric Ocelot*).

Sexo	Sin feromonas	Con feromonas
Hembras	Olor hospedero	Olor hospedero
Machos	Olor hospedero	Feromonas hembras

Tabla 6.1. Resumen de las estrategias de búsqueda de pareja. En las celdas se denota el factor que atrae a cada uno de los sexos. Tomado de Jonsson y cols. (2003).

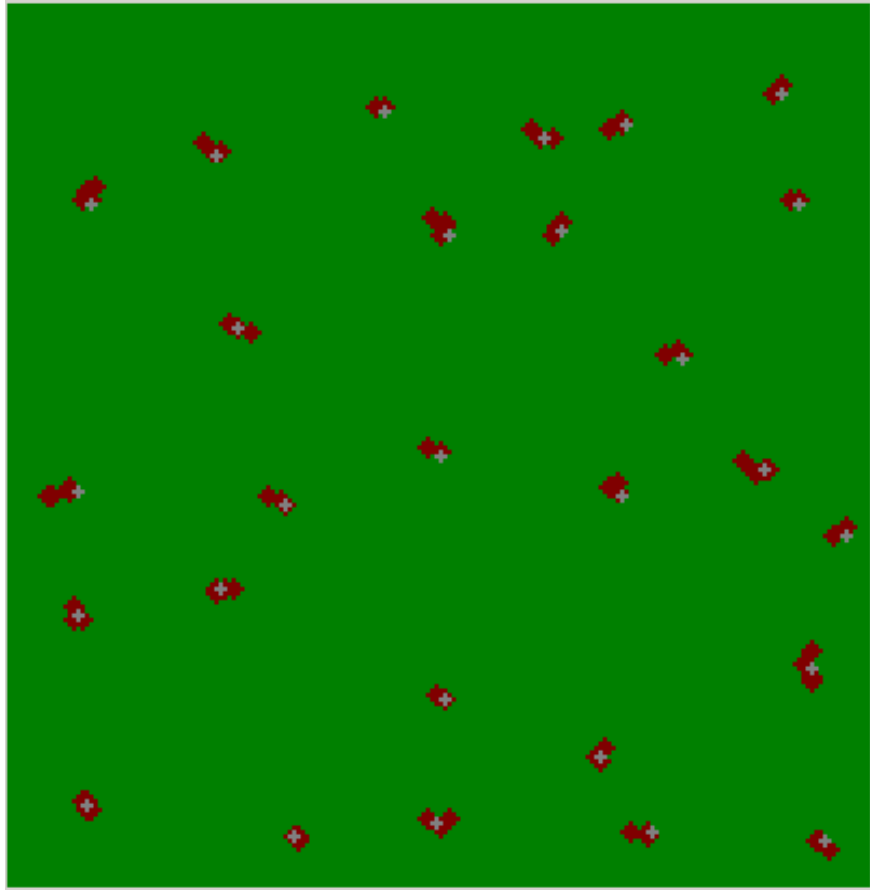


Figura 6.1. Escenario con alta densidad de hospederos (27 en total). La extensión de color verde corresponde al sustrato pasto, los parches marrones al sustrato madera y el gris a hongos (hospederos). El diseño del escenario es totalmente arbitrario.

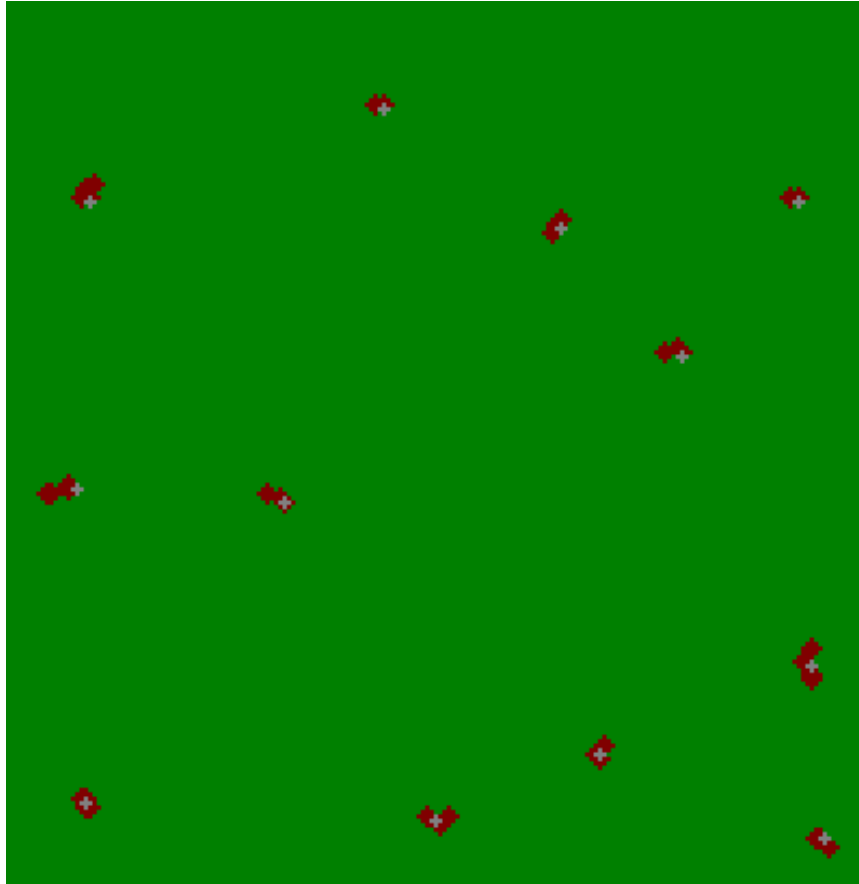


Figura 6.2 Escenario con densidad media de hospederos (12 en total). La extensión de color verde corresponde al sustrato pasto, los parches marrones al sustrato madera y el gris a hongos (hospederos). El diseño del escenario es totalmente arbitrario.

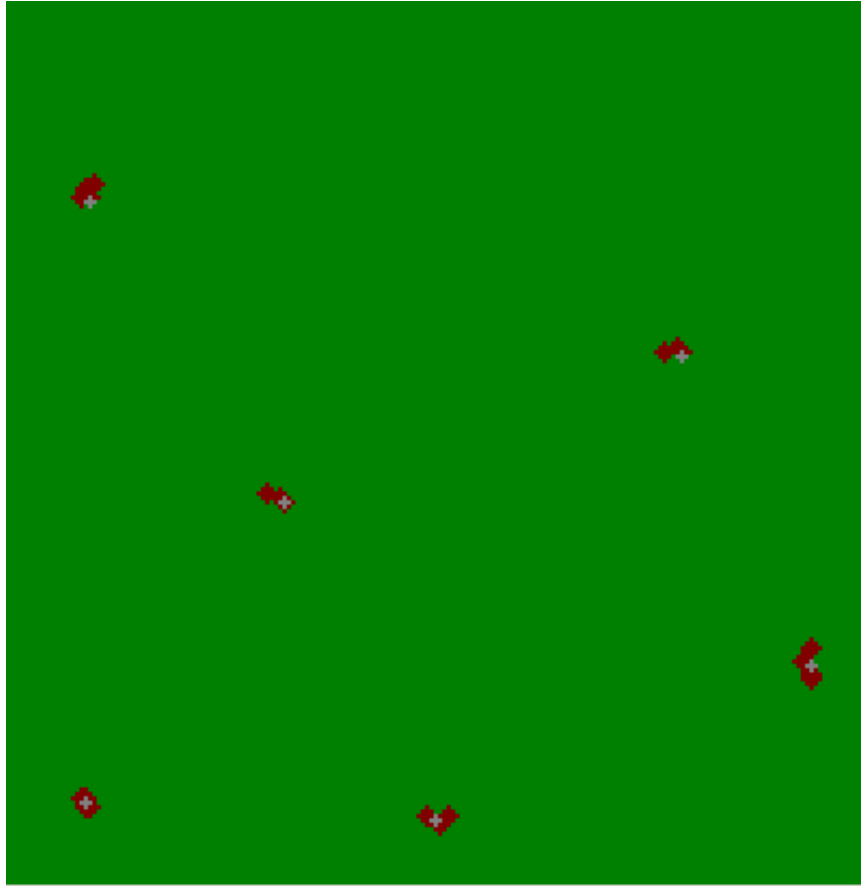


Figura 6.3 Escenario con baja densidad de hospederos (6 en total). La extensión de color verde corresponde al sustrato pasto, los parches marrones al sustrato madera y el gris a hongos (hospederos). El diseño del escenario es totalmente arbitrario.

6.2 Segunda validación: dispersión en metapoblaciones

Kindvall (1999) modela una población de grillos *Metrioptera bicolor* que se desplaza en un entorno de parches de vegetación. Las reglas de decisión se programaron en base a la atractividad de los diferentes sustratos. Los sustratos consistieron en vegetación adecuada, y cuatro sustratos hostiles (bosque, cultivos, carreteras y mar báltico). En estudios previos de campo se determinó la velocidad a la que los grillos transitan en cada sustrato y la atractividad que cada uno ejerce sobre los individuos. Otro estudio consistió en liberar individuos marcados en un punto particular de cada zona de estudio, y posterior recapturar, con ello se obtuvo el dato de la distancia que recorrió cada individuo respecto al sitio de liberación. El estudio de liberación y recapturase realizó en cuatro diferentes zonas de estudio (**Figura 6.4**) ubicadas en Finlandia. De los mapas de cada una las zonas de estudio se programaron los escenarios de las simulaciones. Kindvall (1999) expone el concepto de “permeabilidad del sustrato”, que mide la propensión de los individuos a salirse de un parche con cierto tipo de vegetación. En las simulaciones se compararon los resultados entre individuos que no presentan preferencia por cierto sustrato, y los que presentan preferencia por los parches de vegetación adecuados.

Los resultados obtenidos mediante simulaciones, en cuanto a la predicción de la distancia promedio recorrida por los individuos liberados en cada zona, se compararon contra los resultados obtenidos en el experimento de marcaje, liberación y recaptura de grillos reales. El sistema de simulación de Kindvall (1999) prácticamente predijo los resultados que se encontraron posteriormente en campo. Los resultados se resumen en la **Figura 6.5**.

Kindvall (1999) concluye que las tasas de migración se correlacionan negativamente con el tamaño del parche de vegetación adecuada, y que poblaciones situadas en parches pequeños son más propensas a la extinción.

6.2.1 Réplica con *Galatea*

A continuación se describen los entornos *Galatea* diseñados para replicar los resultados reportados por Kindvall (1999).

Sustratos

Se utilizaron cinco sustratos: *cultivos*, *bosque*, *adecuado*, *carretera* y *mar*, de colores dorado,

verde, blanco, negro y azul respectivamente.

Escenarios

Se diseñaron cuatro escenarios de 280 x 320 cuadros. Cada escenario corresponde a un área de estudio: Ilstorp (**Figura 6.6**), Löderup (**Figura 6.7**), Sandhammaren (**Figura 6.8**) y Järahusen (**Figura 6.9**).

Juegos de agentes

Se diseñó un único juego de agentes. Sólo se manipularon una cantidad muy limitada de variables, por lo que aquí únicamente se reportarán los valores diferentes a los preestablecidos en el sistema, o bien aquellos que influyan en las reglas de decisión de los agentes. Los valores no reportados son irrelevantes.

Se diseñaron dos prototipos de agentes, uno con preferencia por el sustrato adecuado y otro sin preferencia. Por comodidad, todos los machos correspondían al prototipo con preferencia, y todas las hembras al de sin preferencia. Cabe recalcar que en estas pruebas no se involucraron interacciones entre machos y hembras, por lo que el sexo de los agentes no era relevante. En lo sucesivo no se hará mención al sexo de los agentes, sino al prototipo al que pertenecen.

La velocidad de desplazamiento de los agentes fue de un cuadro por ciclo en todos los sustratos. Las tendencias de movimiento fueron modificadas para que correspondieran a lo reportado por el autor (**Tabla 6.2**).

En relación al metabolismo de los agentes, para todas las conductas se fijó un costo energético nulo, los agentes al no consumir reservas internas de nutrientes no necesitaban alimentarse. Los agentes eran inmortales. La producción de gametos y las interacciones de machos con hembras se obviaron por lo que no nacían nuevos individuos.

Los agentes no ejercían atraktividad ni establecían interacciones entre sí. Ambos prototipos eran fuertemente repelidos por el sustrato mar (atraktividad = -100, radio de percepción = 10). El prototipo sin preferencia por sustrato no era atraído ni repelido por el resto de los sustratos. El prototipo con preferencia era repelido por los sustratos cultivos, bosque y carretera (atraktividad = -50, radio de percepción = 10), y atraído por el sustrato

preferido (atractividad = 50, radio de percepción = 10). En el artículo original no se emplea el concepto de atractividad, su equivalente es “permeabilidad de sustrato”, que indica la probabilidad de que un individuo abandone un parche de determinado sustrato. Kindvall (1999) plantea que los parches de sustrato adecuado presentan baja permeabilidad, dado que se espera que los individuos prefieran permanecer en ellos y eviten ingresar a parches con sustratos hostiles como el bosque, o mortales, como el mar. Los parámetros establecidos en los entornos *Galatea* diseñados emulan esta situación.

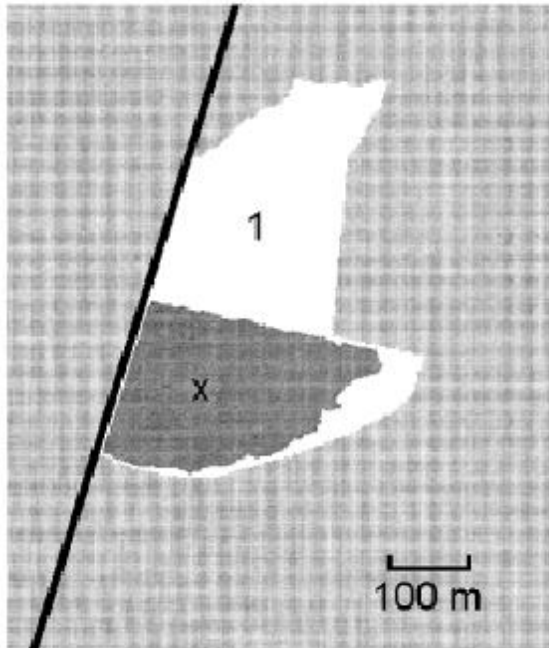
Entornos

Se diseñaron cuatro entornos, uno para cada sitio de estudio. Todos los agentes fueron colocados en el cuadro marcado con una X (**Figuras 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9**). Se colocaron 25 individuos por prototipo, para un total de 50. Todos los agentes eran adultos.

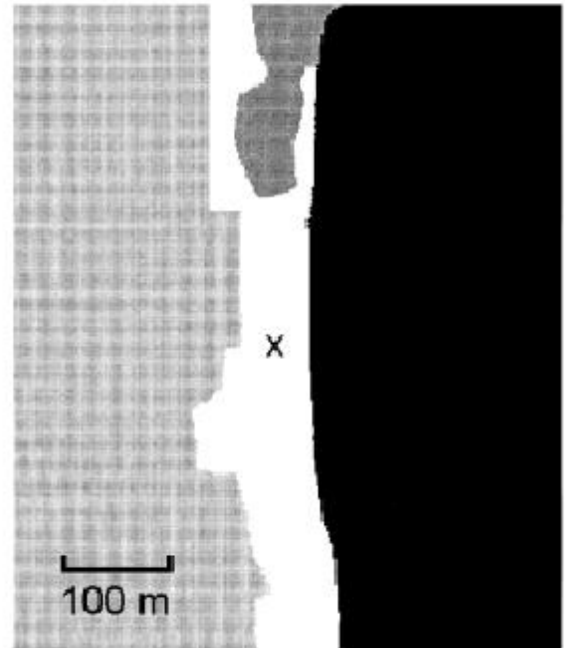
Simulaciones

Se realizaron diez réplicas por cada uno de los cuatro entornos diseñados (40 ejecuciones en total), partiendo de condiciones iniciales idénticas. El equipo de cómputo empleado para ejecutar las simulaciones consistió en una computadora personal de escritorio compatible con IBM-PC™, con procesador de 64 bits AMD® Athlon™LE-1640 de núcleo dual a 2.7 GHz y 3 Gb de memoria RAM; con sistema operativo Linux 3.5, distribución Ubuntu™ 12.10 (*Quantal Quetzal*).

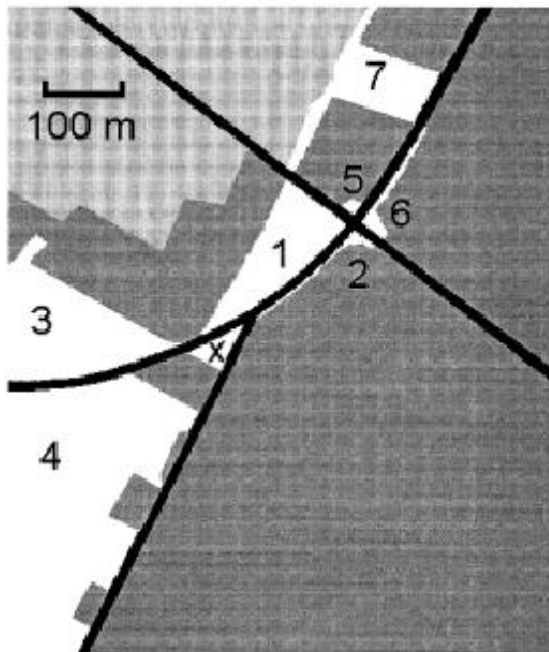
(a) Ilstorp



(b) Löderup



(c) Sandhammaren



(d) Järahusen

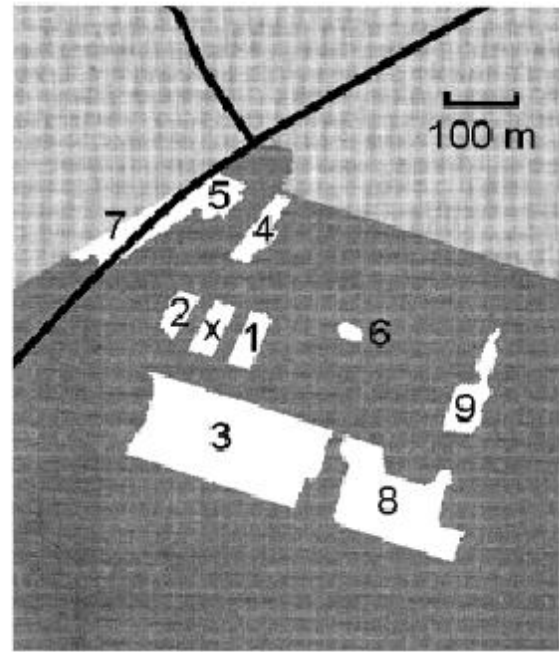
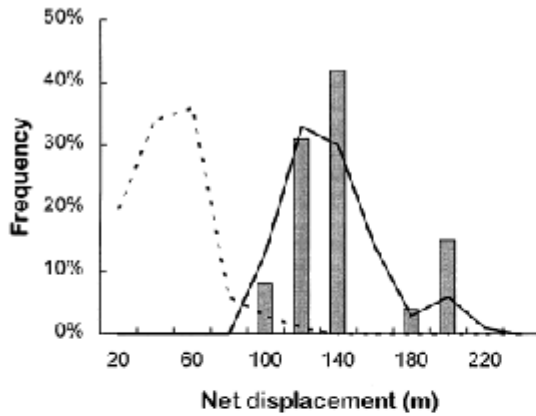
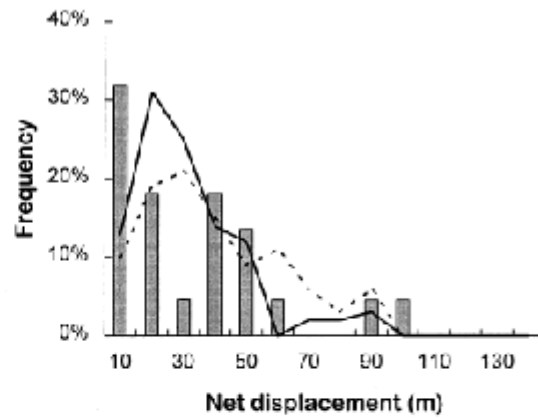


Figura 6.4. Mapas de distribuciones de los sustratos en cada una de las zonas de estudio. En cada mapa los colores corresponden a diferentes sustratos; blanco: parches de vegetación adecuada; gris oscuro: bosque; gris claro: cultivos; líneas negras: carreteras; negro: Mar Báltico. Las X denotan el sitio de liberación. Tomado de Kindvall (1999).

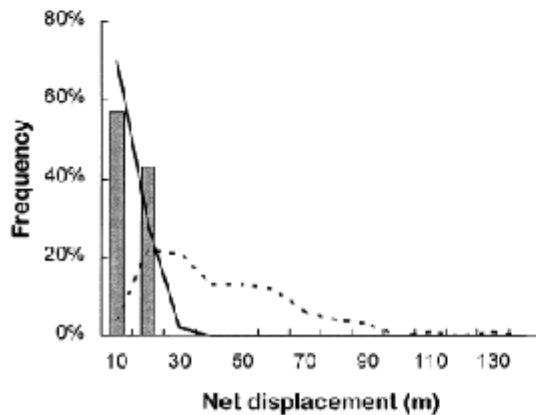
(a) Ilstorp



(b) Löderups strandbad



(c) Sandhammaren



(d) Järahäsen

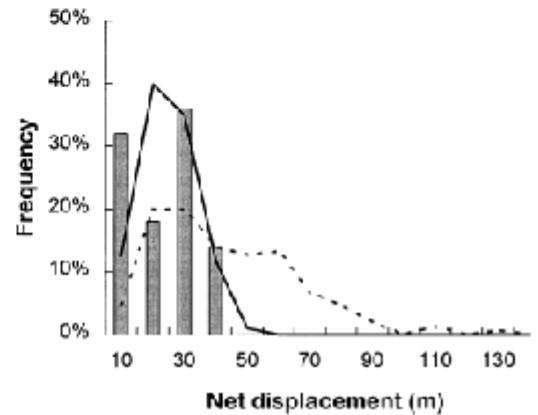


Figura 6.5. Comparativa entre las distancias promedio recorridas por los individuos a partir del sitio de liberación. Las líneas punteadas corresponden a lo predicho por el modelo sin preferencia de sustrato, las líneas sólidas a lo predicho por el modelo con preferencia por sustrato, y las barras a lo encontrado en experimentos de marcaje, liberación y recaptura con organismos reales. El modelo con preferencia predijo lo observado posteriormente en campo. Tomado de Kindvall (1999).

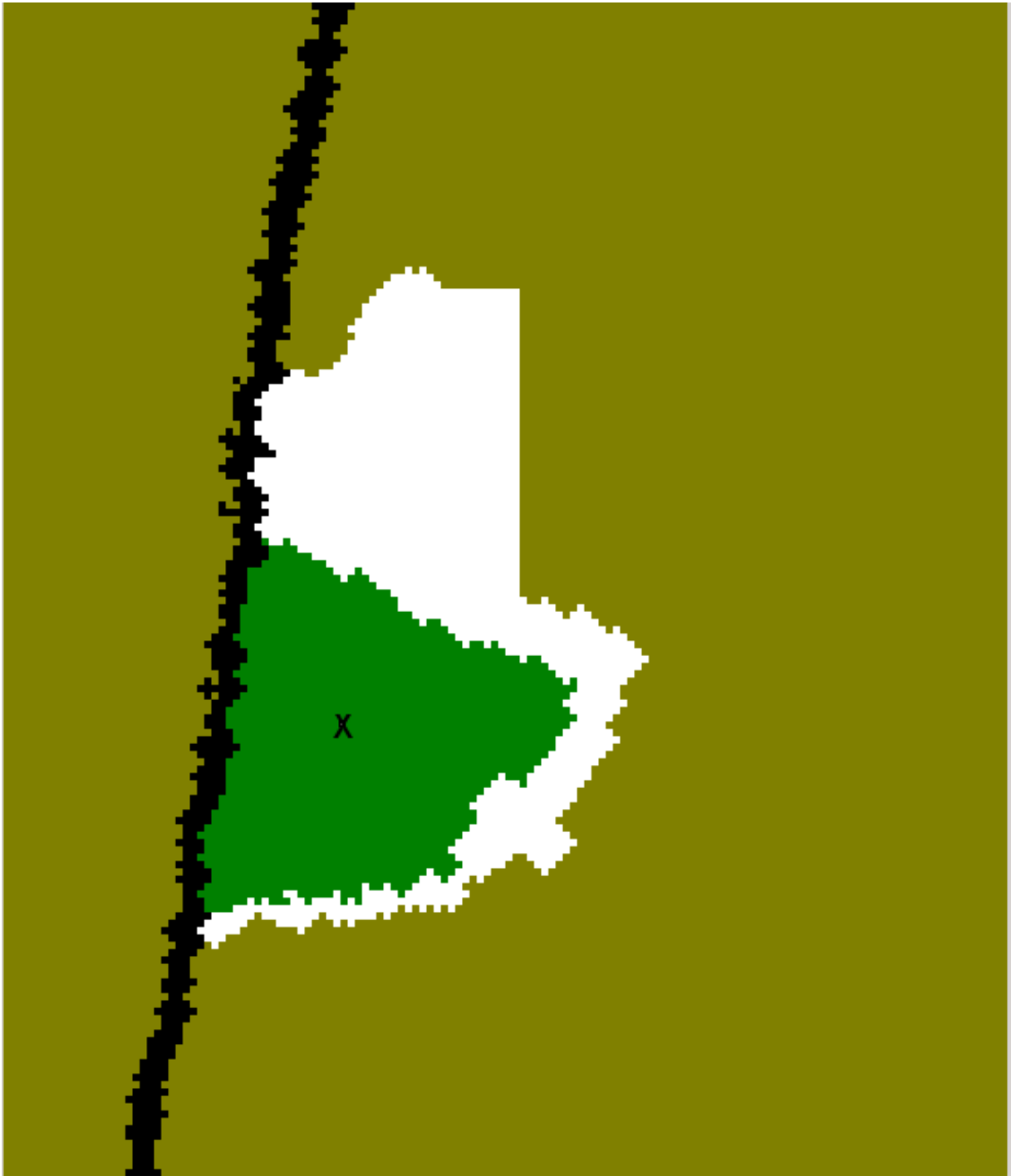


Figura 6.6 Escenario basado en el sitio de estudio Ilstorp. Los colores corresponden a diferentes sustratos; dorado: cultivos, verde: bosque, blanco: preferido, negro: carretera. La X indica el sitio en que fueron colocados los agentes al inicio de cada simulación. Basado en los mapas publicados por Kindvall (1999).

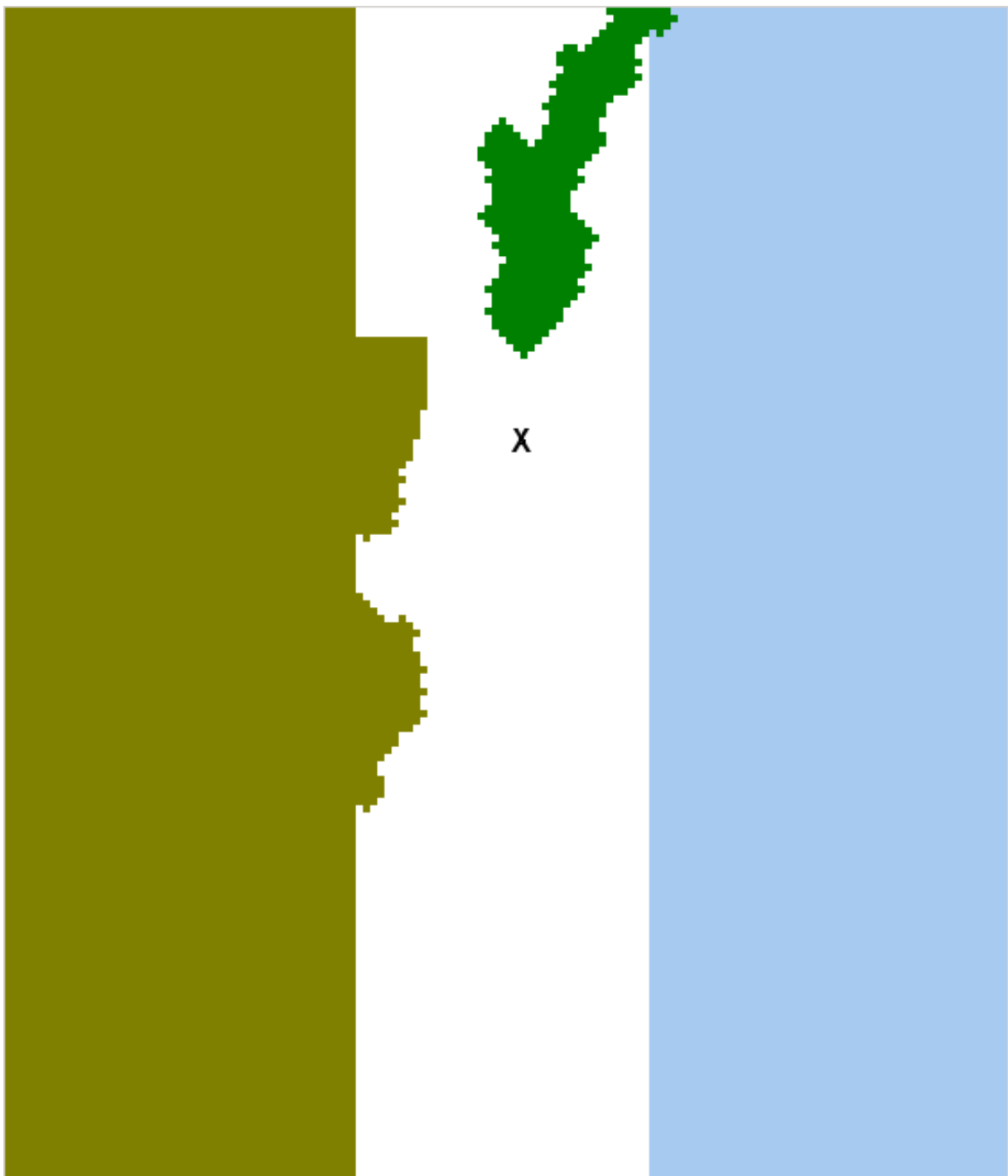


Figura 6.7 Escenario basado en el sitio de estudio Löderup. Los colores corresponden a diferentes sustratos; dorado: cultivos, verde: bosque, blanco: preferido, azul: mar. La X indica el sitio en que fueron colocados los agentes al inicio de cada simulación. Basado en los mapas publicados por Kindvall (1999).

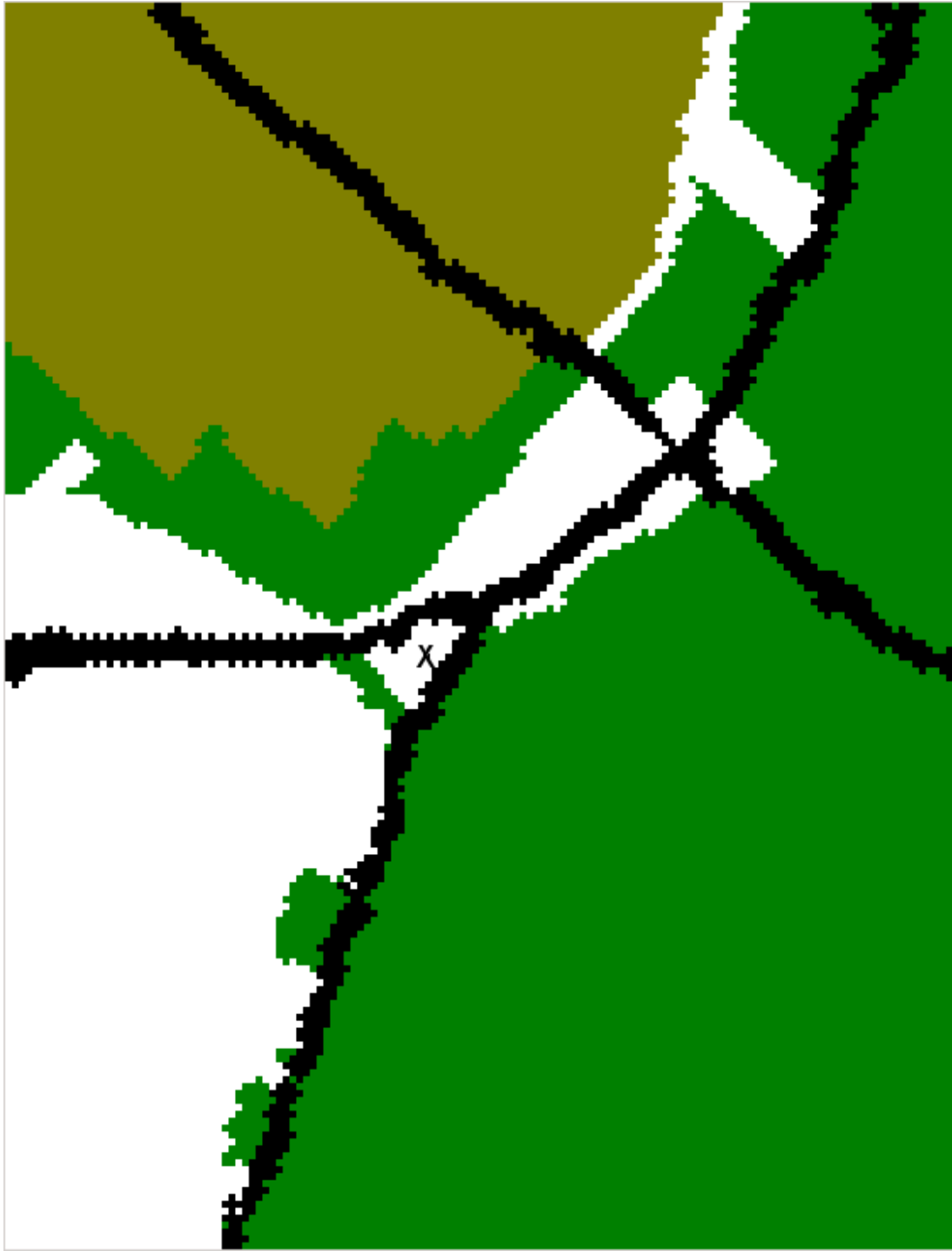


Figura 6.8 Escenario basado en el sitio de estudio Sandhammaren. Los colores corresponden a diferentes sustratos; dorado: cultivos, verde: bosque, blanco: preferido, negro: carretera. La X indica el sitio en que fueron colocados los agentes al inicio de cada simulación. Basado en los mapas publicados por Kindvall (1999).

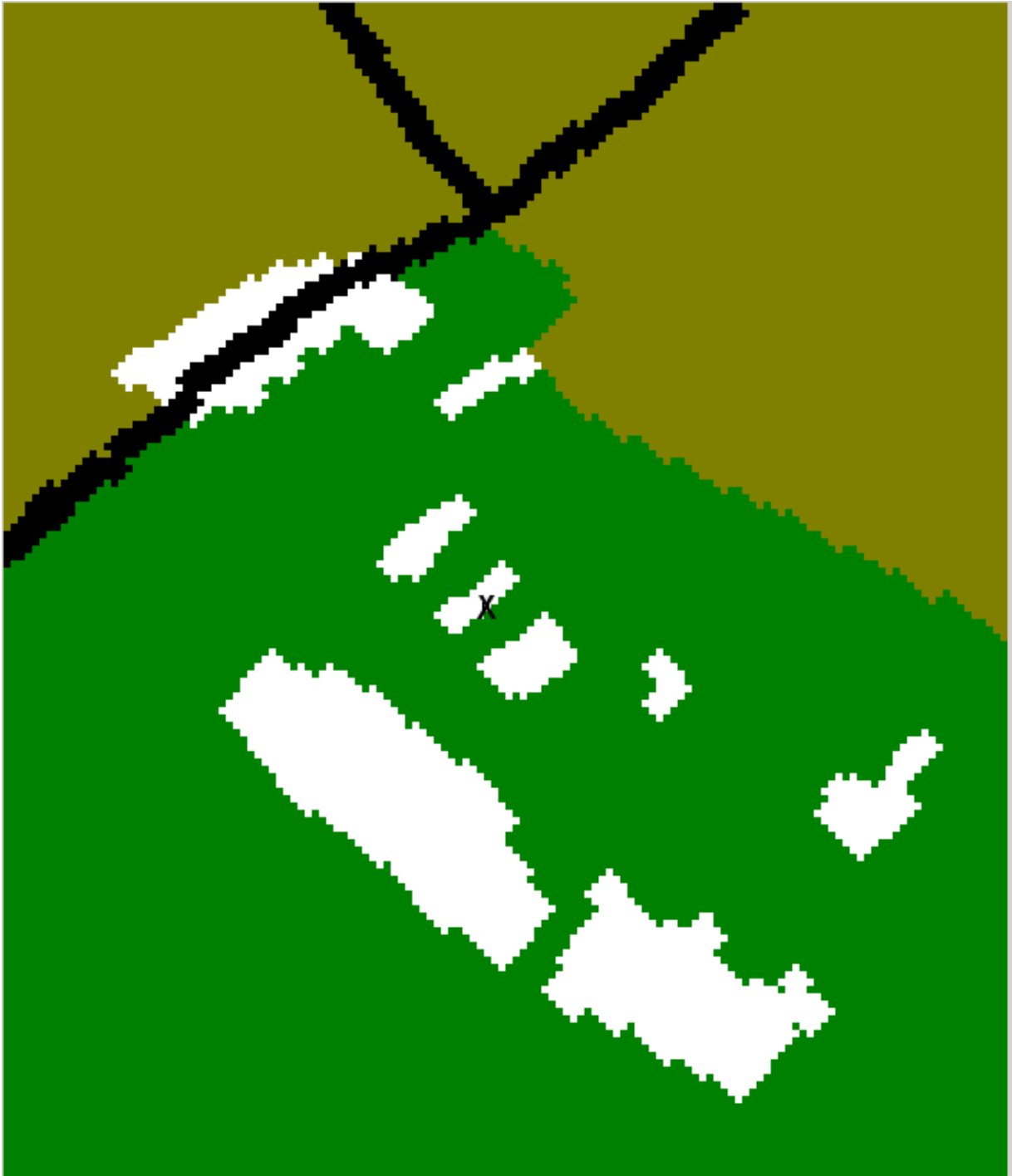


Figura 6.9 Escenario basado en el sitio de estudio Järahusen. Los colores corresponden a diferentes sustratos; dorado: cultivos, verde: bosque, blanco: preferido, negro: carretera. La X indica el sitio en que fueron colocados los agentes al inicio de cada simulación. Basado en los mapas publicados por Kindvall (1999).

Dirección	Tendencia
Frente	26
Frente-Derecha	2
Derecha	14
Atrás-Derecha	14
Atrás	14
Atrás-Izquierda	14
Izquierda	14
Frente-Izquierda	2

Tabla 6.2 Tendencias de movimiento establecidas para los agentes que emulan a *Metrioptera bicolor*. Estas tendencias están basadas en lo reportado por Kindvall (1999).

7. RESULTADOS

Todos los estadísticos y figuras relevantes para el análisis de los datos fueron procesados mediante el paquete informático R (R Core Team 2012).

7.1 Primera validación: Éxito reproductivo en escarabajos saproxylicos

A altas densidades tanto de hospederos (27) como de individuos por hospedero (4), la estrategia con feromonas presenta una ligera ventaja en cuanto a éxito reproductivo, en comparación con la estrategia sin feromonas; sin embargo, esta diferencia no es significativa (Mann-Whitney, $W = 56$, $p = 0.6704$; **Figura 7.1**). En tanto, a bajas densidades tanto de hospederos (4) como de individuos por hospedero (1), la estrategia con feromonas es significativamente más eficiente (Mann-Whitney, $W = 83$, $p = 0.01398$; **Figura 7.2**). Para procesar estos resultados se tomó en cuenta al universo total de individuos en todas las réplicas.

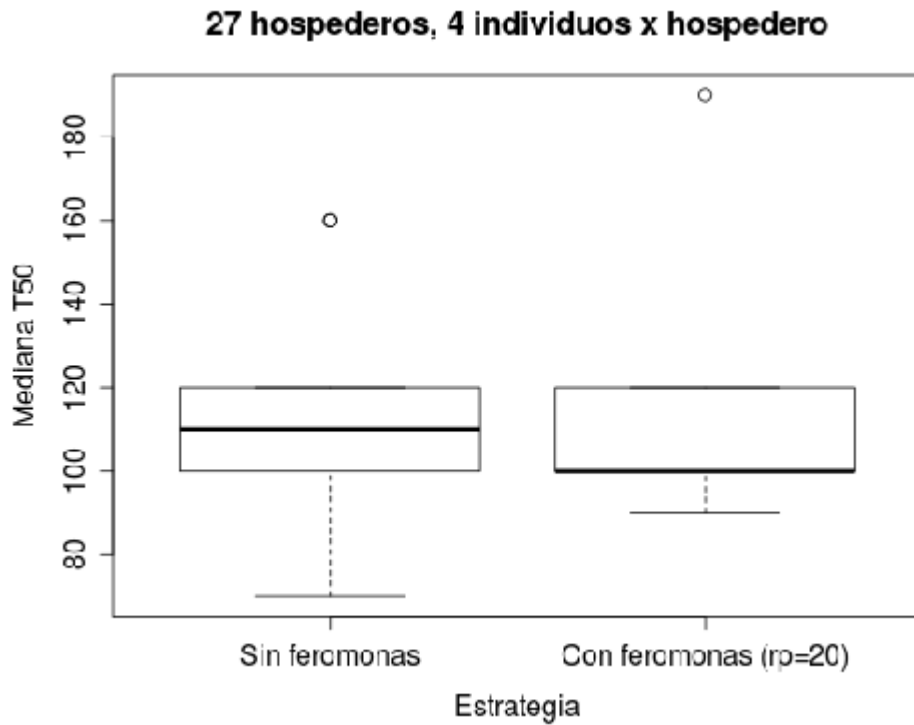


Figura 7.1. Diagrama de caja y bigotes que ilustra la comparación en el éxito reproductivo de la estrategia con feromonas respecto a la estrategia sin feromonas, en situación de alta densidad de hospederos e individuos. Aunque se aprecia ventaja por parte de la estrategia con feromonas, esta no resultó significativa (Mann-Whitney, $W = 56$, $p = 0.6704$) rp = radio de percepción. La variable T_{50} denota la cantidad de ciclos que transcurren para que el 50% de las hembras sean copuladas.

4 hospederos, 1 individuo x hospedero

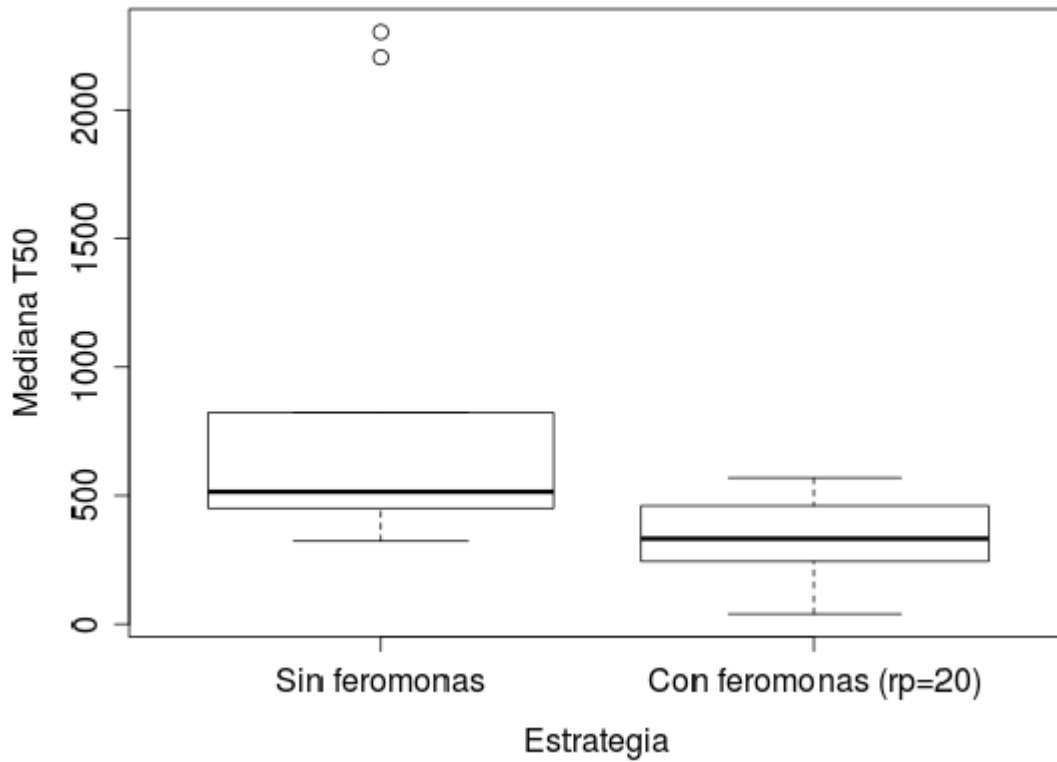


Figura7.2. Diagrama de caja y bigotes que ilustra la comparación en el éxito reproductivo de la estrategia con feromonas respecto a la estrategia sin feromonas, en situación de baja densidad de hospederos e individuos. La estrategia con feromonas presenta mayor éxito reproductivo (Mann-Whitney, $W = 83$, $p = 0.01398$) rp = radio de percepción. La variable T_{50} denota la cantidad de ciclos que transcurren para que el 50% de las hembras sean copuladas.

7.2 Segunda validación: Dispersión en meta poblaciones

En las **Figuras 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6** se presentan los histogramas de las distancias a la que se hallaban los agentes al término de las simulaciones. Con fines comparativos se presentan traslapados los histogramas que corresponden a los agentes con preferencia por el sustrato adecuado, y los agentes sin preferencia. Para facilitar el contraste con los resultados obtenidos por Kindvall (1999) en todas las figuras se presenta un recuadro que reproduce las gráficas reportadas por el autor citado. El único caso en que la diferencia entre los resultados del modelo con preferencia y el modelo sin preferencia no fue significativa, corresponde al escenario Löderup (Mann-Whitney, $W = 34184$, $p = 0.8228$; **Figura 7.4**). Aún así, este resultado es consistente por lo reportado por Kindvall (1999), y sus implicaciones serán revisadas en la discusión. Para procesar estos resultados se tomó en cuenta al universo total de individuos en todas las réplicas.

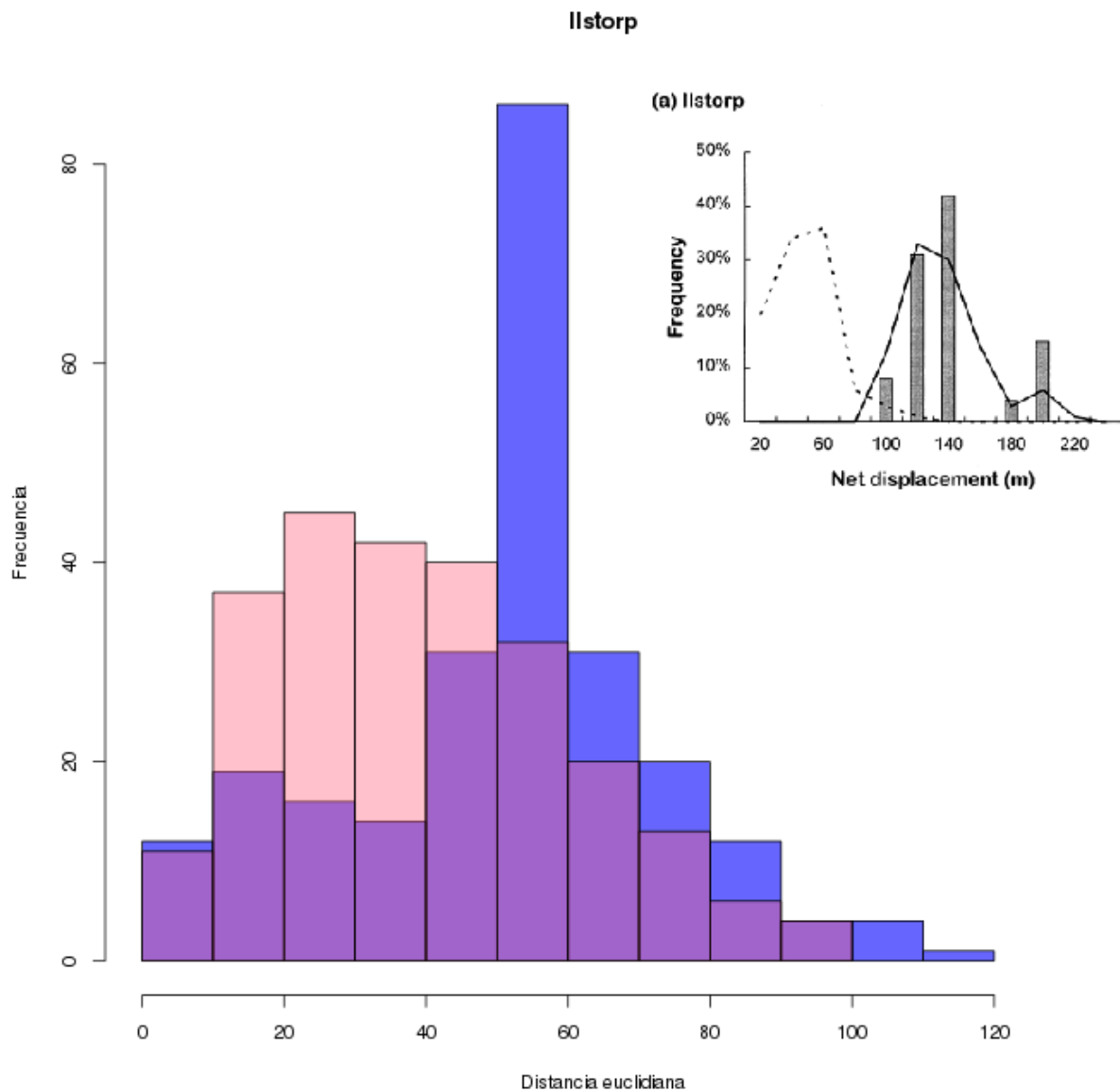


Figura 7.3 Histogramas de distancias de los agentes respecto al punto de liberación en el escenario Ilstorp. El color rosa corresponde a los agentes sin preferencia por sustrato, el color azul corresponde a los agentes con preferencia por el sustrato adecuado, la zona morada es de traslape. La diferencia entre las medianas en ambos tipos de agentes fue significativa (Mann-Whitney, $W = 41608.5$, $p < 0.0001$). En el recuadro superior derecho se reproduce la gráfica con los resultados obtenidos por Kindvall (1999) en el mismo escenario. En ese caso la línea punteada corresponde al modelo sin preferencia, la línea sólida al modelo con preferencia, y las barras ilustran los resultados de campo con organismos reales.

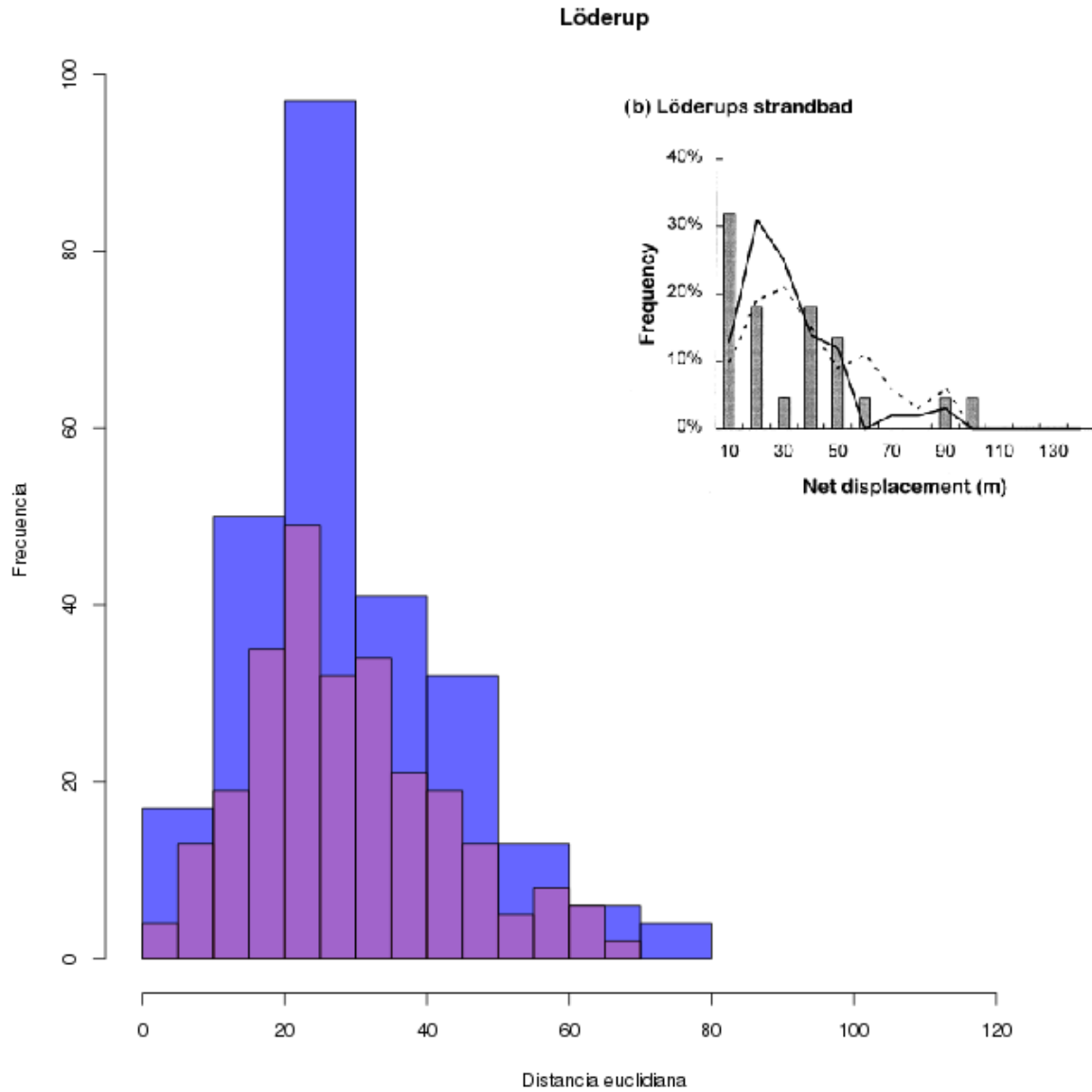


Figura 7.4 Histogramas de distancias de los agentes respecto al punto de liberación en el escenario Löderup. El color rosa corresponde a los agentes sin preferencia por sustrato, el color azul corresponde a los agentes con preferencia por el sustrato adecuado, la zona morada es de traslape. La diferencia entre las medianas en ambos tipos de agentes no fue significativa (Mann-Whitney, $W = 34184$, $p = 0.8228$). En el recuadro superior derecho se reproduce la gráfica con los resultados obtenidos por Kindvall (1999) en el mismo escenario. En ese caso la línea punteada corresponde al modelo sin preferencia, la línea sólida al modelo con preferencia, y las barras ilustran los resultados de campo con organismos reales.

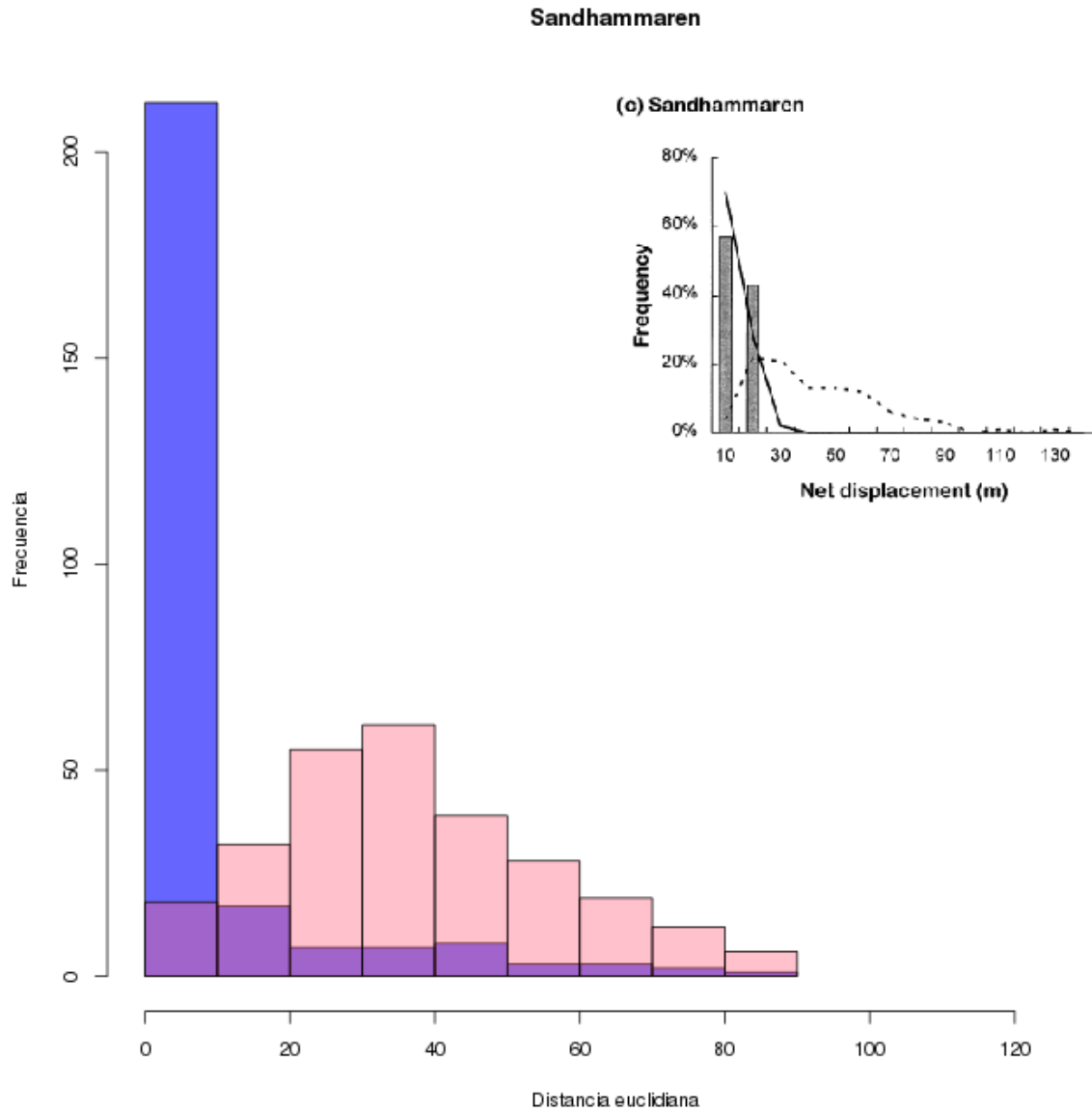


Figura 7.5 Histogramas de distancias de los agentes respecto al punto de liberación en el escenario Sandhammaren. El color rosa corresponde a los agentes sin preferencia por sustrato, el color azul corresponde a los agentes con preferencia por el sustrato adecuado, la zona morada es de traslape. La diferencia entre las medianas en ambos tipos de agentes fue significativa (Mann-Whitney, $W = 7328.5$, $p < 0.0001$). En el recuadro superior derecho se reproduce la gráfica con los resultados obtenidos por Kindvall (1999) en el mismo escenario. En ese caso la línea punteada corresponde al modelo sin preferencia, la línea sólida al modelo con preferencia, y las barras ilustran los resultados de campo con organismos reales.

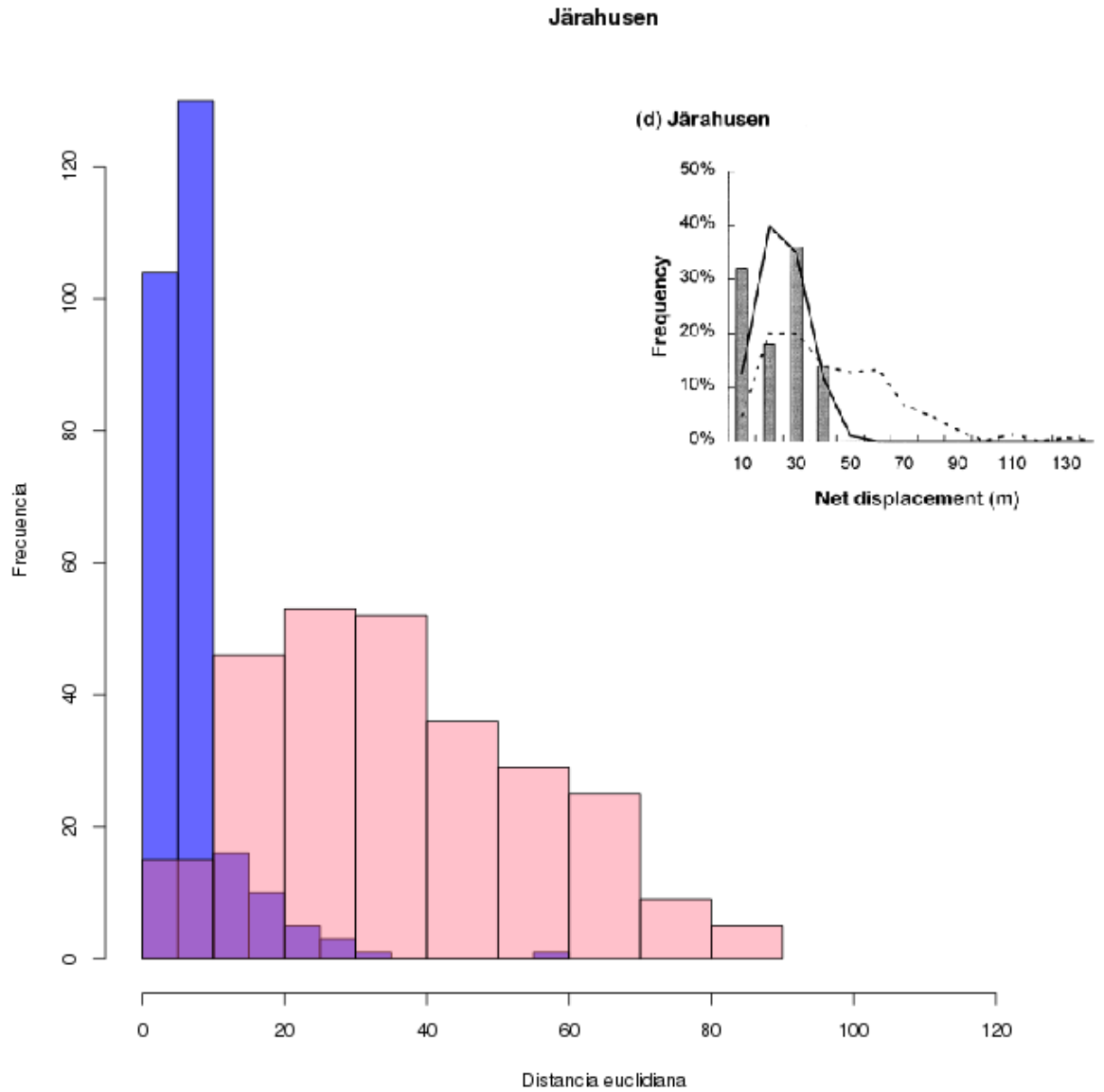


Figura 7.6 Histogramas de distancias de los agentes respecto al punto de liberación en el escenario Järahusen. El color rosa corresponde a los agentes sin preferencia por sustrato, el color azul corresponde a los agentes con preferencia por el sustrato adecuado, la zona morada es de traslape. La diferencia entre las medianas en ambos tipos de agentes fue significativa (Mann-Whitney, $W = 3219.5$, $p < 0.0001$). En el recuadro superior derecho se reproduce la gráfica con los resultados obtenidos por Kindvall (1999) en el mismo escenario. En ese caso la línea punteada corresponde al modelo sin preferencia, la línea sólida al modelo con preferencia, y las barras ilustran los resultados de campo con organismos reales.

8. DISCUSIÓN

8.1 Primera validación: Éxito reproductivo en escarabajos saproxylicos

A pesar de que las limitaciones de cómputo, impuestas por el equipo con que se contaba, no permitieron emplear exactamente los parámetros reportados en el artículo de referencia; sí fue posible obtener resultados útiles. Lo anterior debido a que las variables consideradas eran de carácter cualitativo (alta o baja densidad), y la exactitud en las variables no era relevante. Siempre que se puedan contrastar resultados a diferentes densidades tanto de hospederos como de individuos, será posible comparar las estrategias estudiadas.

La conclusión reportada por Jonsson y cols. (2003) se resume en el siguiente enunciado: “a altas densidades de hospederos e individuos, la estrategia con feromonas tiene una ligera ventaja sobre la estrategia sin feromonas; mientras que, a bajas densidades, la estrategia con feromonas presenta un mayor éxito reproductivo”. Lo anterior lleva a los autores a establecer la premisa de que las poblaciones de organismos que expresen la estrategia sin feromonas serán más sensibles a la fragmentación de hábitat.

En el caso de la réplica realizada con *Galatea*, se observa que en situación de alta densidad de hospederos e individuos, la ventaja de la estrategia con feromonas no es significativa. Si se toma en cuenta que los datos analizados corresponden al universo total de individuos en todas las réplicas, y no a una muestra de éstos, en base a tal resultado se cuenta con evidencia para afirmar que la estrategia con feromonas presenta una ligera ventaja respecto al estrategia sin feromonas, en situación de alta densidad de hospederos y de individuos.

Respecto al entorno con baja densidad tanto de hospederos como de individuos, la diferencia en éxito reproductivo entre ambas estrategias fue significativa. En este caso, la estrategia con feromonas obtiene mayor éxito. De tal forma, la evidencia apoya la hipótesis de que la estrategia con feromonas contribuye a la viabilidad de la población, aún en situaciones de hábitat perturbado o fragmentado.

Al contrastar los resultados, análisis y conclusiones reportados por Jonsson y cols. (2003), con los resultados obtenidos de las réplicas de *Galatea* y el análisis realizado en el presente trabajo, se puede afirmar que si los autores del artículo citado hubiesen empleado el

Sistema *Galatea* para comparar las estrategias estudiadas, habrían llegado a conclusiones similares.

8.2 Segunda validación: Dispersión en metapoblaciones

La relevancia del artículo de Kindvall (1999), para los fines del presente trabajo, radica en que se trata de un estudio que reporta un caso en que la simulación informática predijo resultados que posteriormente se obtuvieron en campo con organismos reales. De ahí que lograr replicar con *Galatea* tales resultados establece un antecedente para afirmar que el sistema cuenta con poder predictivo. Ello representa un factor crucial para validar a *Galatea*.

En este caso de estudio, al diseñar las simulaciones, se trabajó con individuos que son clones, bajo condiciones iniciales idénticas. Lo anterior implica que las diferencias en los resultados obtenidos entre agentes con diferentes atracciones por sustratos, se explican enteramente por las reglas de decisión de tales agentes.

A su vez, las reglas de decisión para ambos tipos de agentes eran idénticas entre los diferentes escenarios. Sin embargo los resultados entre escenarios difieren, ello implica que tales diferencias se explican únicamente por la variación en la distribución de los diferentes sustratos entre cada uno de los escenarios. En particular, el tamaño y distribución de las zonas cubiertas por la vegetación adecuada fue el factor decisivo sobre los resultados.

Salvo ajustes en la magnitud, al contrastar las gráficas arrojadas por el análisis obtenido en el presente trabajo, contra los reportados por el autor citado, es evidente la semejanza entre ambos conjuntos de gráficas. Esta semejanza implica que *Galatea* también pudo reproducir resultados que corresponden a datos obtenidos en entornos reales.

El caso particular del escenario Löderup, en que los resultados entre ambas reglas de decisión no difirieron significativamente, ilustra que si se cuenta con una extensión suficientemente grande de vegetación adecuada, la distribución de los individuos reales no será diferente a la de organismos hipotéticos que no presentan preferencia por ningún sustrato. Esta situación puede corresponder a una gran cantidad de organismos diferentes, incluso pertenecientes a diferentes reinos taxonómicos. Siempre que una población presente afinidad por un sustrato en particular, se espera que su dispersión se ajuste a patrones semejantes a los

observados en las gráficas obtenidas. Patrones delimitados solamente por el esquema de distribución de sustratos adecuados y hostiles.

Los resultados que proporcionó *Galatea* aportan evidencia a favor de las mismas conclusiones a las que llegó Kindvall, en cuanto a que poblaciones ubicadas en parches reducidos de vegetación adecuada son más propensas a la extinción. Por lo que *Galatea* es útil para predecir patrones de dispersión de poblaciones, en respuesta a la presencia de sustratos hostiles. Por lo tanto, *Galatea* representa una herramienta en estudios de viabilidad de poblaciones amenazadas por perturbación del entorno.

9. CONCLUSIONES

Después del prolongado proceso de diseño, desarrollo y mejora del Sistema *Galatea* (desde el año 2003 a la fecha), se requería de un proceso de verificación que permitiera presentarlo ante la comunidad académica como una herramienta útil y confiable. Replicar resultados ya publicados se consideró como el mecanismo más adecuado para tal fin.

De los dos artículos seleccionados, con ambos se cumplió la expectativa de replicar los resultados. El ejercicio de validación realizado permite aseverar que *Galatea* es una herramienta útil y con aplicación en una amplia variedad de situaciones relacionadas con ecología conductual.

También se destaca que no en todos los casos *Galatea* encuentra aplicación. Sin embargo, esto no menoscaba su potencial. Cualquier herramienta presenta ventajas y desventajas. En algunos casos se dispone de una amplia gama de opciones, en tanto que, entre más específico sea al problema abordado se va reduciendo la disponibilidad de herramientas aplicables. En algunos casos, *Galatea* representa una opción más, en otros, una opción muy conveniente, y en unos cuantos casos, la única opción disponible.

En general, en cualquier sistema en el que se conozcan con suficiente profundidad las reglas de decisión, en cuanto a desplazamiento, forrajeo, combate y cortejo, de los individuos que lo integran, y en el que los cambios en los componentes físicos del entorno no sean relevantes para el problema estudiado, y el problema se base en una población con su área de dispersión bien delimitada, se espera que *Galatea* sea aplicable para poner a prueba hipótesis concretas sobre tales sistemas. Otra consideración es que no se pueden ignorar las limitaciones que impone el equipo de cómputo disponible. Tales limitaciones acotan la cantidad de individuos dentro del sistema, tamaño del escenario y cantidad de ciclos que durará la ejecución de la simulación.

Una vez realizada la validación de *Galatea*, el siguiente paso es promover su uso entre la comunidad de investigadores en ecología conductual.

10. PERSPECTIVAS

En sus inicios, los sistemas de simulación informática basados en sistemas biológicos, eran curiosidades informáticas atractivas sólo para profesionales de las ciencias de la computación, y otras disciplinas afines a las matemáticas. Actualmente, el empleo de tales sistemas adquiere cada vez mayor presencia en artículos de revistas especializadas en ecología. Se prevé que esta tendencia irá en aumento, dada la utilidad manifiesta de estos sistemas para abordar problemas concretos en el ámbito de Ecología.

La cantidad de problemas reales que se pueden abordar con el sistema *Galatea* parece ilimitada. La flexibilidad del sistema es tal, que se puede adaptar a los más dispares casos de estudio, como por ejemplo especies acuáticas, voladoras, insectos sociales, e inclusive seres humanos. No se debe ignorar que aun hablando de especies totalmente hipotéticas, los resultados no dejarían de ser relevantes y útiles para la biología, en toda su variedad de campos de estudio, así como para la informática en sí misma, y para las disciplinas sociales. Es por lo anterior que se puede plantear una línea de investigación exclusivamente basada en simulaciones con *Galatea*.

A pesar de que las prestaciones del sistema son de por sí generosas, aún hay lugar para mejoras y adiciones. Por el momento *Galatea* permite únicamente modelar una especie a la vez, lo que limita su uso en modelos presa-depredador, o de comunidades. Los escenarios son estáticos, y los elementos dinámicos muy poco flexibles. En futuras versiones se contempla incluir plantas, como un tipo especial de agentes y no como meras fuentes de recursos, dotándolas de dinámica poblacional propia.

Los ejemplos planteados aquí como mejoras posibles al sistema, o de cómo sus capacidades actuales se pueden emplear para casos no previstos originalmente, representan sólo una muestra mínima. El sistema se puede seguir explotando y desarrollando, sin más límite que la creatividad y aptitud del usuario y del programador, además de las capacidades de equipo de cómputo.

Un proyecto de investigación que se podría desarrollar a corto plazo, tal vez durante estudios doctorales, consistiría en realizar un estudio semejante al replicado en la presente tesis, sobre dispersión de metapoblaciones. Tal estudio consistiría en obtener datos en campo con organismos reales, y mediante *Galatea* predecir patrones de dispersión o cualquier otro

factor verificable mediante datos que posteriormente se obtendrían en campo.

La simulación informática es una herramienta útil en la exploración de hipótesis ecológicas y evolutivas, que adquirirá cada vez mayor atención de la comunidad de ecólogos.

11. REFERENCIAS

- Adami, C. 1998. *Introduction to Artificial Life*. Springer-Verlag. Nueva York.
- Berryman, A. A. 1991. Population theory: an essential ingredient in pest prediction, management, and policy-making. *Am. Entomol.* **37**: 138-142.
- Bousquet, F. y Le Page, C. 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecol Model.* **176**: 313-332.
- Brown, D. G. 2006. Agent-based models. En Geist, H. (ed.) *The Earth's Changing Land: An Encyclopedia of Land-Use and Land-Cover Change*. Westport CT: Greenwood Publishing Group. 7-13.
- Byers, J. A. 1991. Simulation of the mate-finding behaviour of pine shoot beetles, *Tomicus piniperda*. *Anim. Behav.* **41**: 649-660.
- Cropper Jr., W. P. 2000. SPM2: A simulation model for slash pine (*Pinus elliottii*) forest. *Forest Eco. Manag.* **126**: 201-212.
- Clutton-Brock, T. H. y Parker, G. A. 1995. Sexual coercion in animal societies. *Anim. Behav.* **49**: 1345-1365.
- Emmeche, C. 1994. *Vida simulada en el ordenador*. Gedisa. Barcelona.
- Enquist, M. y Leimar, O. 1983. Evolution of fighting behavior: decision rules and assessment of relative strength. *J. Theor. Biol.* **102**: 387-410.
- Fishman, G. S. 1996. *Monte Carlo. Concepts, Algorithms and Applications*. Springer Series in Operational Research. Springer.
- Franzén, T. 2005. *Gödel's theorem. an incomplete guide to its use and abuse*. AK Peters.
- Goldberg, D. 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.
- Izquierdo, L.R., J.M. Galán, J.I. Santos & R. Del Olmo. 2008. Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales* **16**: 85–112.
- Janssen, M. A. y Ostrom, E. 2006 Empirically based, agent-based models. *Ecol. and Soc.* **11**: 37-50
- Jonsson, M., Kindvall, O., Jonsell, M. y Nordlander, G. 2003. Modelling mating succes of

- saproxylic beetles in relation to search behaviour, population density and substrate abundance. *Anim. Behav.* **65**: 1069-1076.
- Kindvall, O. 1999. Dispersal in a metapopulation of the bush cricket, *Metrioptera bicolor* (Orthoptera: Tettigoniidae). *J. Anim. Ecol.* **68**: 172-185.
- Kokko, H. 2006. *Modelling for field biologists*. Cambridge University Press. Cambridgeshire.
- Koza, J. R., Keane, M. A. y Streeter, M. J. 2003. Evolución de las invenciones. *Sci. Am. México.* **1**:42-49.
- Kleijnen, J. P. C. 1995. Verification and validation of simulation models. *Eur. J. Oper. Res.* **82**: 145-162
- Langton, C. G. 1986. Studying Artificial Life with cellular automata. *Physica D.* **22**: 12-37.
- Lenski, R. E., Ofria, C., Collier, T. C. y Adami, C. 1999. Genome complexity, robustness and genetic interactions in digital organisms. *Nature.* **400**: 661-664.
- Levy, S. 1992. *Artificial Life*. Pantheon Books.
- Macal, C. M. y North, M. J. 2006. Tutorial on agent-based modeling and simulation Part 2: How to model with agents. En Perrone, L. F., Wieland, F. P., Liu, J., Lawson, B. G., Nicol, D. M. y Fujimoto, R. M. (eds.) *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*
- Martín-Bragado, I. 2004. El método Monte Carlo: simulando un sistema vivo. *Mundo Linux.* Madrid. **64**: 20-25.
- Maynard-Smith, J. y Price, G. R. 1973. The logic of animal conflict. *Nature.* **246**: 15-18.
- Peck, S.L. 2004. Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends Ecol. Evol.* **19**: 530-534.
- Piña-Altamirano, B. 2006. *Efectos de la proporción sexual y la disponibilidad de recursos sobre sistemas de apareamiento poliginándricos: La simulación informática como herramienta*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM.
- R Core Team. 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Ray, T. S. 1992. An approach to the synthesis of life. En Langton, C. G., Taylor, C., Farmer, J. D. y Rasmussen, S (eds.). *Artificial Life II*. Addison Wesley. 854 pp.

- Russell, S. J. y Norung, P. 1996. *Inteligencia Artificial: un enfoque moderno*. Prentice Hall Hispanoamericano. México.
- Sargent, R. G. 2010. Verification and validation in simulation models. En: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, and E. Yücesan, (eds.) Syracuse University. pp. 166
- Strand, E., Huse, G. y Giske, J. 2002. Artificial evolution of life history behavior. *Am. Nat.* **159**: 624-644.
- Taylor, P. W. y Elwood, R. W. 2003. The missmeasure of animal contest. *Anim. Behav.* **65**: 1195-1202.
- Turchin, P. 1991. Translating foraging movements in heterogeneous environment into the spatial distribution of foragers. *Ecology*. **72**: 1253-1266.
- Uchmanski, J. y Grimm, V. 1996. Individual-based modelling in ecology: what makes the difference? *Trends Ecol. Evol.* **11**: 437-440.
- Zavala, M. A., Díaz-Sierra, R., Purves, D., Zea, G. E. y Urbieto, I. R. 2006. Modelos espacialmente explícitos. *Ecosistemas*. **15**: 88-99.

13. ANEXOS

Anexo 1: El mito de Pigmalión y Galatea

Pigmalión es, según la mitología Griega, un rey de Chipre que además de ser sacerdote, era también un magnífico escultor. Su obra superaba en habilidad incluso a la de Dédalo, el célebre constructor del Laberinto. Se destacó siempre por su bondad y sabiduría a la hora de gobernar.

Durante mucho tiempo Pigmalión había buscado una esposa cuya belleza correspondiera con su idea de la mujer perfecta. Al fin decidió que no se casaría y dedicaría todo su tiempo y el amor que sentía dentro de sí a la creación de las más hermosas estatuas.

Así, realizó la estatua de una joven, a la que llamó Galatea (la de rostro blanco como la leche), tan perfecta y tan hermosa que se enamoró de ella perdidamente. Soñó que la estatua cobraba vida.

Ovidio dice así sobre el mito en el libro X de Las metamorfosis: *«Pigmalión se dirigió a la estatua y, al tocarla, le pareció que estaba caliente, que el marfil se ablandaba y que, deponiendo su dureza, cedía a los dedos suavemente, como la cera del monte Himeto se ablanda a los rayos del sol y se deja manejar con los dedos, tomando varias figuras y haciéndose más dócil y blanda con el manejo. Al verlo, Pigmalión se llena de un gran gozo mezclado de temor, creyendo que se engañaba. Volvió a tocar la estatua otra vez, y se cercioró de que era un cuerpo flexible y que las venas daban sus pulsaciones al explorarlas con los dedos.»*

Cuando despertó en lugar de la estatua se hallaba Afrodita, que le dijo "*Mereces la felicidad, una felicidad que tú mismo has plasmado. Aquí tienes a la reina que has buscado. Ámala y defiéndela del mal*". De esa forma Galatea se transformó en una mujer real.

Comentarios del autor

El texto anterior fue tomado textualmente de la Wikipedia, La Enciclopedia Libre. Wikipedia es un proyecto mantenido por una comunidad mundial y su contenido puede ser redistribuido libremente sin infringir los derechos de autor. La dirección electrónica de la Wikipedia en Español es:

es.wikipedia.org

De otras fuentes consultadas sobre el mito de Pigmalión y Galatea se han encontrado desenlaces diversos para la historia. En general la historia tiene dos finales, el primero asevera que la pareja vivió feliz, a semejanza de los cuentos de hadas tradicionales; y el segundo afirma que Galatea, originada de piedra, tenía un corazón duro y frío, y que por lo tanto jamás correspondió al amor de Pigmalión. Que el lector elija el final que le parezca más edificante.