



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

00322

FACULTAD DE CIENCIAS

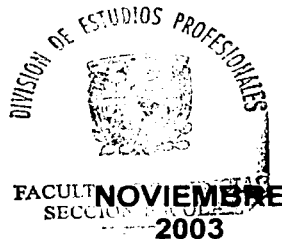
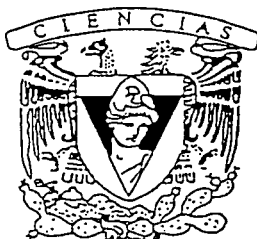
174

“SIMULACIÓN DE LA TERMOTAXIA DE CRÍAS DE CONEJO EN UN ROBOT”.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
B I O L O G O

P R E S E N T A :
MARCOS FRANCISCO ROSETTI SCIUTTO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ROBYN E. HUDSON



I.A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



REPUBLICA DE CHILE
ACADEMIA DE
CIENCIAS

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a Usted que hemos revisado el trabajo escrito:

Simulación de la termotaxia de crías de conejo en un robot
realizado por Marcos Francisco Rosetti Sciutto con número de cuenta 09877027-2
quién cubrió los créditos de la carrera de Biología
Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis Propietario Dra. Robyn Elizabeth Hudson

R. E. Hudson

Propietario Dr. Hernán Larralde Ridaura

H. L. Ridaura

Propietario Dra. María Eugenia Gensebatt Bonaparte

M. E. Gensebatt

Suplente Dr. Arturo Carlos Becerra Bracho

A. C. Becerra

Suplente M.en.C. Amando Bautista Ortega

A. B. Ortega

Consejo Departamental de Biología

Juan Manuel Rodríguez Chávez

M. en C. Juan Manuel Rodríguez Chávez

FACULTAD DE CIENCIAS



UNIDAD DE ENSEÑANZA
DE BIOLOGIA

I.B

Para mis abuelos, Carlos Sciutto y Nilda Conde

I.C

Y los agradecimientos van para...

EN MI CASA DE ESTUDIOS...

A la mismísima UNAM, donde entré y tal vez nunca salga, a la Facultad de Ciencias por educarme y hacerme un biólogo y al Instituto de Investigaciones Biomédicas por ser espacio de tantas memorias.

A mis sinodales, Arturo Becerra, Maria Eugenia Gonsebatt, Amando Bautista (y la UAT) y Hernán Larralde, por sus valiosos comentarios, preguntas, correcciones y toda la discusión generada.

EN EL LABORATORIO...

A Robyn por su gran entusiasmo, a Adela por tanta paciencia y fé, comentarios, pláticas y lecciones, a Luis por compartir esta aventura y muchos paquetes de palomitas, y al resto de la tripulación: Daniela, Emma, Carolina, Aline, Ivette y Diana ha sido un gustazo viajar a su lado.

Al amigo a distancia Hans Distel, reconocido tele-tutor.

EN EL TIEMPO...

A todos mis amigos: Ricardo (Cuervito), Diego, Paula, Andrés, Rodrigo, Eugenio, Kasia, Bernardo, Guisepepe, Yoshi, Mariana, Laskmi, Nadja, Alonso y muchos mas! Mis amigos de ayer, hoy, mañana y siempre. Estas amistades nunca se olvidan!

A Ruben y Co. (Carlos, Pano y las Abuelas: Chepa y Tina) mi familia adoptada, que siempre me recibe con los brazos abiertos, una deliciosa cena, buenos consejos y mucha, mucha plática.

EN MI CASA...

A mis padres: Carlos y Edda, por consentirme mucho y quererme incondicionalmente, enseñarme a caminar y apoyarme en trazar mi propio camino.

A Florencia y Virgilio, siempre he hecho un esfuerzo por enseñarles algo y yo he aprendido más de ustedes...por haberme aguantado su vida entera (¡pobrecillos!).

A Nan, por que es espléndido tener un brillante hermano físico que te ayude con la tarea, Ana por crear tantas cosas bonitas, Pepita por vivir tan lejos pero siempre estar muy cerca. También a sus esposos(as) e hijos, que hacen que esta gran familia sea tan bella como es: Maite, Nanito y Mateo así como a Manuel, Nico y Joaquín.

EN MI PAÍS NATAL...

A mi gran familia: Mis fantásticos abuelos, que con su amor, su humor y su buena estrella, son combustible para mi inspiración. Me enseñaron a terminar lo que comienzo y ver a un trabajo bien hecho como la mejor recompensa. A mi macanudo tío Manuel, la hermosa Natalia, el carismático Iván, la bella Nati y la loca de Abril. Todos los de allá, que son muchos, que veo poco y que quiero bastante.

EN UN LUGAR ESPECIAL DE MI CORAZÓN...

A Lia: mi amiga y mi compañera, en los días de sol, los días de lluvia y en algunas (pero pocas) tormentas, siempre estas conmigo. Me enseñaste la importancia de reír: tu risa me da risa y tu valor me da valor!

EN GENERAL...

A la alegría, los libros, la música (en mp3), la fotografía, los atardeceres, la sidra, el cine y las palomitas y todas las cosas pequeñas que hacen que la vida sea tan grandiosamente única y maravillosa...

DE ORDEN FINANCIERO...

AI PAPIIT IN217100.

RESUMEN

La biorobótica es una metodología que nos permite darle a las hipótesis sensorimotoras una existencia física mediante la construcción de un robot. Utilizando esta metodología, se espera que el investigador pueda probar y generar hipótesis sobre los mecanismos de decisión que involucra la conducta de un organismo. En éste estudio intentamos construir un modelo biorobot para reproducir la conducta termotóxica de las crías de conejo recién nacidas. Esta conducta resulta interesante debido a que durante los primeros días de vida, la detección y desplazamiento hacia fuentes ambientales de calor constituye la principal manera en que los conejos recién nacidos logran regular su temperatura corporal. La capacidad de los conejos neonatos para localizar una temperatura adecuada fue confirmada en un estudio previo realizado en n estudio realizado en nuestro laboratorio. En este, crías recién nacidas del conejo europeo fueron colocadas sobre un gradiente térmico. El desplazamiento de las crías fue registrado en intervalos de tiempo y con esta información fue generada una base de datos.

En la primera parte del presente estudio utilizó la base de datos realizó un nuevo análisis de la conducta de orientación con el fin de obtener un algoritmo. El algoritmo establece, en forma de hipótesis, el mecanismo de decisión que produce en los conejos una orientación térmica. En la segunda parte de este estudio, el algoritmo se programo y fue introducido en un robot genérico LEGO®. Puesto que el robot cuenta con un sensor que registra cambios de intensidad luminosa, se utilizó un gradiente de distintos colores para simular los gradientes de temperatura. El robot fue colocado sobre el gradiente donde ejecutó una orientación. Debido a que el robot cuenta con una capacidad de almacenamiento de las variables registradas, se facilitó el análisis de la conducta. Se realizó un análisis sobre los parámetros obtenidos de las trayectorias de los conejos y del robot. A partir del análisis de los parámetros se comparó el desempeño termotáxico entre el robot y el conejo.

El robot no logró simular correctamente las características de orientación térmica de los conejos. Sin embargo, utilizando los datos obtenidos pueden generarse nuevas hipótesis sobre los mecanismos sensorimotoreos que controlan la orientación térmica. Con estas hipótesis es posible trazar modificaciones para mejorar el algoritmo. Se discuten a fondo las posibles causas de la falla del robot y los pasos a seguir para lograr obtener más información sobre la conducta de los conejos y conseguir un mejor desempeño en la conducta termotóxica.

ABSTRACT

Biorobotics is a methodology that allows us to give physical reality to a hypothesis about sensorimotor integration through the construction of a robot. Using this method, the researcher can generate and test hypotheses about the decision points involved in the behavior of an organism. The aim of the current work was to build a biorobotic model of the thermotaxic behavior of newborn rabbit pups. During early postnatal life, the detection and movement towards an external heat source constitutes the principal manner in which the newborn pups regulate their body temperature. The ability to find an appropriate temperature was confirmed in a previous study done in our laboratory, in which newborn pups were placed on a thermal gradient and their behavior was registered in time. A data base was built using the behavioral record.

In the first part of the current work we reanalyzed the data using new behavioral categories in order to formulate an algorithm. The algorithm states the hypothetical decision making mechanism that directs the pups during their orientation towards heat. In the second part of this study, the algorithm was programmed into a generic LEGO® robot. The robot had a light intensity sensor, thus we used gradients made of different colors to simulate the temperature gradients used in testing the rabbit pups. The robot was placed in the arena where it executed orienting behavior.

We analyzed the parameters obtained from the trajectories of the robot and the rabbit pups. Using these parameters we compared the thermotaxic capacities of the robot and the rabbit pups. The robot was unable to simulate correctly the orientation to temperature. However, using the new insights provided by the robot, we can make new hypothesis concerning the mechanism that control the thermal orientation. An thus, with new hypothesis it is possible to improve the algorithm. The inability of the robot to orient on the simulated thermal gradient an the possible reasons for this are discussed in order to find new ways to improve the robot's thermotaxic performance.

Índice

1 Introducción	1
1.1 Biorobótica.....	1
1.1.1 Metas, métodos y modelos.....	1
1.1.2 Componentes de un robot.....	3
1.1.3 Animales y robots.....	4
1.2 Antecedentes de la biorobótica.....	4
1.2.1 Mecanicismo.....	4
1.2.2 Cibernética.....	5
1.2.3 Los primeros robots.....	5
1.2.4 Robots basados en conducta y biorobótica.....	7
1.2.4.1 Biorobots aplicados a la ingeniería.....	7
1.2.4.2 Biorobots aplicados a la biología.....	10
1.3 Sesgo hacia los invertebrados.....	19
1.3.1 Trabajo con mamíferos.....	20
2 Antecedentes	22
2.1 El gazapo como modelo.....	22
2.1.1 Termorregulación fisiológica.....	22
2.1.2 Termorregulación conductual.....	23
3 Hipótesis	26
4 Objetivos	26

Parte 1: Obtención del algoritmo

5 Metodología: Obtención del algoritmo	27
5.1 Metodología <i>in vivo</i>	27
5.2 Procedimiento.....	27
5.2.1 Obtención de los datos.....	27

5.2.2 Criterios de inclusión de gazapos.....	28
5.2.3 Análisis conductual.....	29
5.2.4 Análisis de los gradientes.....	31
5.2.5 Análisis de cruces.....	33
5.2.6 Relación entre temperatura y conducta.....	35
5.3 Análisis estadístico.....	35
6 Resultados: Obtención del algoritmo.....	36
6.1 Cruces en la misma dirección.....	36
6.1.2 Resumen.....	36
6.2 Reacción a un gradiente térmico.....	38
6.2.1 Gazapos <i>InP</i>	38
6.2.2 Gazapos <i>InC</i>	40
6.2.3 Resumen.....	40
7 Discusión: Obtención del algoritmo.....	42

Parte 2: Prueba del algoritmo

8 Metodología: Prueba del algoritmo.....	47
8.1 Materiales.....	47
8.1.1 Lenguaje de programación.....	47
8.1.2 Sistema robot.....	47
8.1.3 Arenas de prueba.....	49
8.2 Procedimiento.....	51
8.2.1 Programación del algoritmo.....	51
8.2.1.1 El programa <i>Termotaxia</i>	51
8.2.1.2 El programa <i>Control</i>	52
8.2.2 Prueba del algoritmo.....	54
8.2.3 Obtención y registro de datos.....	54
8.3 Estadística.....	54

9 Resultados: Prueba del algoritmo.....	56
9.1 Sobre las trayectorias de los conejos.....	56
9.2 Sobre las trayectorias de los gazapos.....	59
9.2.1 Condición <i>InP</i>	59
9.2.2 Condición <i>InC</i>	59
9.3 Sobre las trayectorias del robot.....	63
9.3.1 Condición <i>InP</i>	63
9.3.2 Condición <i>InC</i>	63
9.4 Resumen.....	67
9.4.1 Conejos.....	67
9.4.2 Robots.....	67
10 Discusión: Prueba del algoritmo.....	68
11 Conclusiones.....	76
12 Futuras direcciones.....	77
13 Bibliografía.....	79
14 Anexos	
Apéndice 14.1.....	Sobre la validez de los modelos biorobots
Apéndice 14.2.....	Datos
Apéndice 14.3.....	Código Termotaxia/Control
Apéndice 14.4.....	Especificaciones del robot
Apéndice 14.5 ^a	Trayectorias Conejo
Apéndice 14.5 ^b	Trayectorias Robot

1 Introducción

1.1 Biorrobótica

Casi todos esperamos el día en que un robot resuelva los trabajos manuales de nuestra vida cotidiana, sin embargo, hemos pensado mucho menos en robots que nos ayuden comprender conductas biológicas. Este estudio es un esfuerzo que utiliza robots como modelos artificiales de conductas biológicas. La biorrobótica es una metodología resultante de la intersección entre la biología y la ingeniería (Webb 1999, 2000, 2001), cuyo principio consiste en utilizar sistemas artificiales, no para igualar o replicar, sino para modelar las configuraciones sensorimotoras que producen las conductas de los organismos biológicos. Existen dos principales intereses derivados de utilizar sistemas biorrobóticos: El primero consiste en construir biorobots con aplicaciones tecnológicas utilizando principios similares a los de la conducta de organismos, el segundo busca probar hipótesis biológicas en modelos artificiales para conocer las bases de la conducta (Beer *et al.* 1990, 1998).

1.1.1 Metas, métodos y modelos

La biorrobótica resulta especialmente útil para probar hipótesis biológicas difícilmente abordables por medios convencionales. Para ello debemos construir un robot que capture las propiedades físicas esenciales de la pregunta. Así, podremos evaluar la viabilidad de una hipótesis biológica con un robot. Las sugerencias obtenidas a partir del estudio y análisis del biorobot permitirán probar hipótesis más específicas sobre la relación sensorimotora en el sistema biológico (Beer *et al.* 1990, 1998). Los robots resultan ser especialmente útiles para explorar hipótesis sobre los mecanismos de una conducta específica, particularmente cuando ésta es el resultado de la interacción entre un sistema sensorimotor y el ambiente (Webb 2000). El tipo de preguntas donde la biorrobótica ha demostrado ser de utilidad son aquellas que involucran el control de extremidades, locomoción y orientación animal (Beer *et al.* 1998). Los biorobots pueden ser utilizados en la producción y prueba de hipótesis en distintos niveles: desde los niveles puramente algorítmicos, neuroanatómicos, procesos neurales (aprendizaje y memoria) e incluso evolutivos (Webb 1999). Por ello, las conclusiones obtenidas a partir de un modelo robot, dependerán directamente de las características del modelo.

No existen modelos correctos o incorrectos, pero si existen modelos buenos y malos. Una de las características necesarias para ser un buen modelo es que el sistema biológico a modelar esté claramente definido. Si la intención en la construcción involucra un interés biológico, es de primera importancia que a partir de modelos, los investigadores puedan derivar hipótesis biológicas. Los robots cuya similitud a organismos o conducta no estén modeladas a partir de conductas biológicas de algún organismo particular no permiten generar hipótesis de interés biológico específico. Se prefieren modelos de un organismo y conducta específica pues esto contribuye más al conocimiento detallado de un mecanismo particular, que la construcción de un modelo general, que modelo los principios generales de las conductas biológicas sin tomar en cuenta las particularidades del organismo (Huntsberger 2001, Tunstel 2001). Aunque la construcción de modelos biorobots siempre requiere cierto grado de abstracción sobre el organismo blanco, la abstracción debe estar justificada por el criterio del investigador. La certeza estructural debe estar planteada en términos de la conducta biológica. Se debe mantener similitud en aquellos elementos involucrados en la pregunta. Los robots representan físicamente hipótesis de integración sensorimotora y por lo tanto involucran necesariamente hipótesis sobre integración sensorial, control motor y estructuras de control. Por ser modelos con una realidad física, los robots se encuentran sujetos a las leyes físicas del medio y deben interactuar sobre un medio físico, imperfecto y en permanente cambio. Por estas razones quedan descartados de la biorrobótica las simulaciones en software, tanto de organismos reales (Piña 2003) como imaginarios (Bertin & van de Grind 1998, Watts 1998 Gershenson 2001).

Una vez obtenida la conducta del robot, se puede analizar la similitud con la conducta natural. Sin embargo, resulta más difícil poder afirmar qué las reglas de interacción que producen una conducta son similares entre el animal y la maquina. Analizar al robot y al animal en diferentes condiciones experimentales puede resultar útil para probar la consistencia del modelo. Sin embargo, uno de los mayores desafíos de la biorrobótica continúa siendo cómo poder afirmar, solamente en base al parecido entre conducta del modelo y la del animal, que los mecanismos subyacentes a la conducta son los mismos (*Revisado en* Webb 2001). Una discusión más extensa sobre la validación de los modelos biorrobóticos va anexa al final de este escrito (*Apéndice 14.1*).

1.1.2 Componentes de un robot

Los robots, importantes protagonistas del paradigma biorrobótico, suelen tener las más variadas formas, mantienen ciertas características en común que los unen en una definición. Los componentes de un robot son los sensores, los efectores y la estructura de control.

Los sensores son instrumentos capaces de registrar los valores de una variable física del medio. Los robots utilizan la entrada (o *input*) de información para conocer las características de su medio. Un sensor puede medir variables como luz, temperatura, presión, concentración química, etc. Existen sensores para medir distintas variables con distinta precisión. La elección del sensor adecuado es una característica clave en cualquier estudio biorobot. Por ejemplo, en el robot diseñado por Kuwana (Kuwana *et al.* 1999) se utiliza el sensor natural, antenas del estado adulto del gusano de la seda *Bómbix mori*, conectadas a un sistema artificial para registrar correctamente la emisión de feromonas, con una definición mucho más alta que cualquier sensor artificial. Los efectores, son motores u otros dispositivos capaces de producir el movimiento propio y/o el de otros objetos.

Mediante la salida (o *output*) de información, el robot es capaz de actuar sobre su medio. Produciendo una conducta se puede modificar la recepción del estímulo o al estímulo *per se*. De la misma manera que los sensores, la elección de los efectores está relacionada con el motivo del estudio. Estudios cuyo interés recae sobre la parte sensorial utilizan motores para simular movimiento. Por ejemplo, los estudios de orientación en una langosta robot (Grasso *et al.* 1996, 2000) utilizan el movimiento diferencial de dos ruedas para simular los ocho apéndices extremadamente móviles de la langosta *Humarus americanus*.

La estructura de control es el componente que regula la forma en que la entrada de información por los sensores modifica la acción de los motores. La estructura de control puede ser construida a partir de circuitos (*hardware*) o escrito en un programa (*software*). La estructura de control contiene el conjunto de hipótesis sobre las reglas de interacción sensorimotora subyacentes a la conducta.

Los componentes mencionados por sí solos tendrían una actividad nula sin la presencia de un componente unificador. Los componentes del robot actúan en conjunto con el medio para producir la conducta de un robot. El medio provee valores a las variables y la variación en los valores, además de un medio real con limitantes físicas

sobre el cual los efectores puedan actuar. Un medio que denote un reto adecuado al robot, puede resultar muy productivo mientras que uno inapropiado puede evitar que el robot se desempeñe correctamente por causas fuera de su control.

1.1.3 Animales y robots

Los componentes arriba mencionados, características definitorias de los robots, son el punto de unión con los organismos biológicos. Al igual que los animales, que no pueden ser comprendidos como partes separadas, los robots son productos del circuito completo. De la misma manera, la evolución impone a los organismos biológicos limitaciones a las capacidades sensoriales y motoras, las características de la conducta de un robot son influenciados por las limitaciones técnicas que imponen los componentes. Los animales pueden verse entonces como complejas máquinas que interactúan consigo mismas, entre sí y con el ambiente. Ahora que podemos, intentamos imitarlos y entenderlos creando hipótesis sobre lo que creemos es su manera de operar.

1.2 Antecedentes de la biorrobótica

1.2.1 Mecanicismo

La creencia de que las máquinas son capaces de recrear la conducta animal, tiene al menos 400 años. René Descartes deja muy clara su visión mecanicista en varios pasajes de su *Discurso Sobre el Método* (Descartes 1637) donde hace comparaciones entre el enorme parecido entre un animal y una máquina (*capítulo V*):

"...si existieran máquinas idénticas a los órganos interiores y al exterior de...cualquier animal irracional, no tendríamos medios para conocer si son en cualquier forma de distinta naturaleza a la de estos animales..."

"...Y no debemos confundir el habla con los movimientos naturales que indican las pasiones y que pueden ser imitadas por máquinas así como manifestadas por animales..."

"...aunque las máquinas puedan ejecutar muchas tareas con igual o aun mayor perfección que nosotros, éstas, sin duda fallarían en algunas otras en las que sería descubierto que no actúan en base a conocimiento, sino solamente por la disposición de sus órganos..."

Para Descartes, los animales son complicadas piezas de relojería; ni las funciones fisiológicas, ni la conducta animal son distintas a la forma de operar de una máquina. Este paradigma ha resultado realmente útil en el estudio de los sistemas vivos, por ello el mecanicismo continúa siguiendo una aproximación útil en la práctica médica y científica de nuestros días.

1.2.2 Cibernética

A mediados de 1940 Norbert Wiener preocupado por la falta de esfuerzos coordinados en la ciencia debido a la especialización de los campos, comenzó a buscar mecanismos para encontrar soluciones coordinadas a problemas matemáticos y biológicos. Durante discusiones entre Norbert Wiener, Arturo Rosenbluth y Julian Bigelow (Wiener 1948) conceptos como *retroalimentación (feed-back)* surgen como necesarios para la explicación de problemas matemáticos y lógicos. De esta manera nace la *cibernética* o el estudio del control y la comunicación en la máquina y el animal (Wiener 1948) en un escrupuloso esfuerzo para sentar un marco de principios mediante los cuales atacar sistemas de control y los mecanismos subyacentes, con un lenguaje común ya sea en máquinas o seres vivos. Un ejemplo de los principios de la cibernética está aplicado en la construcción del *homeostat* de William Ross Ashby (Ashby 1956). El homeostat es una máquina que, como un animal, responde a los cambios de sus variables vitales dentro de un rango de valores. La máquina sólo descansa, cuando ha hallado una conducta que mantiene los valores dentro de los límites deseados (Krippendorff 1986)

Este grupo de principios fue especialmente importante para el estudio de la conducta biológica. La gran contribución de la cibernética es mostrarnos que el producto puede ser más complejo que la interacción de los elementos que lo componen (Heylighen 1992). Por primera vez se plantea buscar en los mecanismos generales de fisiología y en la conducta animal, reglas sencillas de interacción dentro de redes y circuitos de retroalimentación complejos.

1.2.3 Los primeros robots

Algunos años después, William Grey Walter diseña *Machina specularix*, una pequeña máquina que incorpora algunos principios básicos de la cibernética (Freeman,

2001). El robot buscaba su objetivo homeostático, una intensidad de luz moderada, mediante una coordinación sensorimotora basada en una serie de reglas de acción:

- Atracción: el sistema está motivado para moverse hacia algún estímulo ambiental.
- Aversión: el sistema está motivado para evitar algún estímulo ambiental.
- Exploración: el sistema debe permanecer siempre en movimiento.

El robot estaba construido con un par de motores para desplazarse, un sensor de luz, una atracción fototáctica, y una pequeña luz en su parte delantera utilizada para registrar la trayectoria del robot. Las pruebas conductuales del robot mostraban un gran número de conductas interesantes. Por ejemplo, al colocar al robot en un espejo, éste era atraído por la luz y al colocarse enfrente del espejo producía un su reflejo. Al acercarse la luz aumentaba y el robot se alejaba del reflejo. Cuando se alejaba una pequeña distancia, la intensidad disminuía y el movimiento se activaba, y el robot volvía a arremeter contra su imagen. Walter llamó a esto una conducta narcisista, pues el robot seguía su imagen en el espejo, produciendo en el observador la impresión de que el robot tenía conciencia de sí mismo (Ward 1999). Analizando los patrones conductuales del sencillo vehículo, Grey encontró más complejidad que la programada, las conductas eran resultado de la interacción entre las sencillas reglas conductuales del robot y el ambiente, no un producto de instrucciones intrínsecas (Freeman 2001). Eran *conductas emergentes*.

Siguiendo las ideas de Grey, Valentino Braitenberg (Braitenberg 1984) teorizó varios vehículos en los que, modificando sistemáticamente las reglas sensorimotoras consiguió un enorme conjunto de patrones conductuales. Las conductas sociales manifestadas por los vehículos de Braitenberg, eran productos emergentes de la interacción de robots con distinta programación. Braitenberg bautizó como *amor* cuando un robot fototáxico es atraído por la luz emitida por otro robot y *miedo* cuando un robot fototáxico huía al contacto con otro robot. Otras reacciones encontradas incluían *paranoia*, *agresión*, *fidelidad*. Uno de los retos de un grupo de científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts, David Hogg, Fred Martin y Mitchel Resnick fue construir un robot para probar los experimentos de Braitenberg (Hogg *et al.* 1991). Para ello concibieron la idea de un robot reprogramable. El ladrillo, un bloque de 12 x 10 cm. que contiene una computadora en miniatura, fue desde el comienzo construido utilizando piezas de LEGO® (Martin 1995), que le otorgaron plasticidad y facilidad a su armado. Muy pronto, se explotó

el potencial didáctico de este robot. Versiones más poderosas y más sencillas de construir y programar fueron producidas para educar a las nuevas generaciones en el uso de robots. Los robots han sido progresivamente mejorados gracias a las pruebas didácticas. Los equipos de construcción de conducta (*behavior construcción kits*) son utilizados por niños para entender cómo los mecanismos programados producen distintas conductas (Resnick 1993). Estos robots han popularizado la idea de utilizar robots como herramientas en la vida diaria (Resnick *et al.* 1996).

1.2.4 Robots basados en conducta y biorobótica

Los trabajos antes mencionados, corresponden a lo que hoy se conoce como robots basados en conducta. Exceptuando los esfuerzos de la inteligencia artificial, casi todos los robots industriales de hoy en día son robots basados en conducta. La robótica basada en conducta pretende proveer a los robots con distintas formas de conexiones sensorimotoras y algoritmos que regulen sus estructuras de control para otorgarles autonomía en su conducta y la capacidad de obtener conocimiento de su mundo para poder explorar su medio de manera propositiva (Arkin 1998). Una metodología que surge a partir de la robótica basada en conducta es la biorobótica. Los intereses particulares de la biorobótica la convirtieron rápidamente en un campo distinto, con objetivos y metas propios. Las particularidades de la biorobótica surgen a partir del asombro y curiosidad que la naturaleza provoca. Por ello, la biorobótica busca inspiración en la biología. Los animales son excelentes máquinas, con un diseño moldeado por millones de años de *selección natural*. La oportunidad que ofrece la biorobótica a la investigación en ingeniería es la inspiración biológica en la construcción de robots y la programación de algoritmos obtenidos a partir de conductas naturales. La eficacia que observamos en muchas conductas biológicas, ha llevado a investigar la integración de estímulos relevantes que permite una respuesta conductual tan robusta y flexible. A continuación se describen trabajos en los que diferentes versiones del *animal cunning* ha sido utilizado para construir robots.

1.2.4.1 Biorobots aplicados a la ingeniería

El comportamiento animal podría ser la envidia de cualquier robot. Aun con sus capacidades sensoriales y motoras reducidas, un animal es capaz de lograr resolver las

tareas que su existencia le impone. Este éxito para sobreponerse a los obstáculos y la aparente simpleza que muestran los animales al enfrentarse a su ambiente ha servido de gran inspiración a los ingenieros para construir biorobots. Ante el grave fracaso de la mayoría de los robots en completar los propósitos para los que fueron construidos (Musser 2003), los ingenieros buscan conductas exitosas y ven a los organismos como máquinas finamente ajustadas por la evolución. Animales extremadamente sencillos y pequeños, pueden maniobrar, desplazarse y orientarse en los ambientes más diversos, sin necesidad de grandes y caros sensores, motores o computadoras. Por ello, mediante el estudio de sistemas biológicos, la robótica ofrece robots que sean capaces de producir conductas más robustas, sencillas y flexibles utilizando los recursos de la misma manera que los animales. Algunos ejemplos de este tipo de trabajo se mencionan a continuación.

El sistema visual de los insectos puede parecer pobre comparado con el de otros animales y sin embargo, es extremadamente funcional. Los insectos voladores maniobran en ambientes visualmente complejos utilizando solamente este aparato. Nicolás Franceshini y su grupo (Franceshini *et al.* 1992) han logrado construir una versión robótica del sistema visual de la mosca. Como otros insectos voladores, la mosca tiene un sistema visual reducido, pero una navegación visual sorprendente, basada únicamente en *egomoción*. La egomoción es la estrategia que utilizan los insectos voladores y consiste en estimar visualmente la distancia a los objetos en base al movimiento del propio insecto. Franceshini y sus colaboradores han construido un robot con un ojo de 100 facetas que puede evaluar el paralaje del movimiento calculando con un sensor la distancia a los objetos basándose en su propio movimiento. El robot, que pesa 11 k (solamente el sistema visual pesa 1) puede orientarse y esquivar todos los obstáculos del bosque artificial en el que fue probado. En el trabajo desarrollado por Mandalayan Srinivasan (Srinivasan 1994) y colaboradores se estudia cómo las abejas utilizan la egomoción para aterrizar. Las abejas, como probablemente todos hemos observado, pueden aterrizar con gran elegancia sobre cualquier superficie. Los algoritmos utilizados por las abejas para aterrizajes precisos han sido propuestos para el aterrizaje de vehículos aéreos.

En el trabajo de Michael Arbib (Arbib & Liaw 1995) se utiliza la estrategia de las ranas y sapos para huir ante estímulos que se aproximan. Al parecer, las ranas tienen una retina con un gradiente de sensibilidad que incrementa de la periferia al centro. En las

ranas, la fuerza y dirección de un desplazamiento de huida está relacionada con el área de la retina que cubre la silueta del estímulo que se acerca. Arbib utiliza este principio para programar robots que tienen que evitar obstáculos móviles en su trayectoria. Estos sistemas visuales son ejemplos de cómo un número reducido de conexiones puede ser utilizado para producir una conducta compleja. Los robots no requieren de un mundo constante o una representación simbólica de los obstáculos para navegar exitosamente. Estos pueden desplazarse sin incidentes en un mundo dinámico a velocidad moderada sin necesidad de un sistema visual complejo.

El olfato en los animales es un sentido muy versátil y tiene en los animales múltiples de usos: encontrar comida, buscar, reconocer y comunicarse con sus semejantes, detectar peligros, etc. Las conductas de orientación hacia estímulos olfativos han servido de inspiración para la construcción de varios robots. Desde hace tiempo, las sociedades de las hormigas habían sorprendido por sus niveles complejos de organización basados solamente en estímulos olfativos y táctiles. Las hormigas dejan marcas químicas complejas para comunicarse con sus compañeras, existiendo una gran variedad de mensajes posibles para identificar grupos o acciones particulares en varios niveles de organización (Hölldobler 1995). Este principio fue utilizado por Reimundo Devezza (Devezza *et al.* 1994) para construir un grupo de robots capaces de orientarse por las marcas químicas depositadas por otros robots. El utilizar marcas químicas como modo de orientación permite a estos robots buscar y explorar más eficientemente su medio. Hiroshi Ishida (Ishida *et al.* 2001) y Takamichi Nakamoto (Nakamoto *et al.* 1999) investigan la orientación de las polillas en *plumas* químicas. La pluma es un gradiente que difunde desde la fuente de un olor hacia el resto del ambiente. Como otros animales, las polillas pueden encontrar la fuente de los olores siguiendo una pluma. Las polillas macho siguen las plumas de feromonas producidas por las hembras para encontrar parejas potenciales. El robot desarrollado por Ishida y Nakamoto puede encontrar la fuente de un olor, además de que cuenta con la conducta de ventilación utilizada por la palomilla para desviar el aire y atraer los olores hacia el sensor. Este robot tiene múltiples aplicaciones: puede encontrar fuente de contaminantes en el aire, fugas de químicos volátiles dentro de las tuberías industriales u olfatear drogas. Gracias a la interacción entre un sentido de gran definición y una conducta extremadamente precisa un robot se construyó un robot que provee un beneficio tecnológico directo.

Los apéndices móviles de los insectos, funcionan debido a principios de control sencillos. Con ellos, los insectos pueden desplazarse por las más agrestes superficies. Es por esto que sirven de inspiración para la construcción de vehículos de exploración que necesitan formas de control robustas que permitan a los vehículos confrontar la variación del ambiente. Sasha Zill y Ernst-August Seyfarth (Zill & Seyfarth 1996) han investigado los procesos de desplazamiento de los insectos y han encontrado que los mecanorreceptores en los *exo esqueletos* - cutícula que cubre el cuerpo del insecto - proveen la estimulación necesaria para coordinar la flexión y extensión. Mediante la estimulación por la presión del exosqueleto sobre el sustrato, estos mecanorreceptores son capaces de coordinar el movimiento de flexión de uno de los apéndices y la extensión de los apéndices contiguos, produciendo un desplazamiento coordinado. Esta información ha sido utilizada por Randall Beer y colaboradores (Beer et al 1992) para construir un grupo de robots de múltiples apéndices, en los que el control no se encuentra en un procesador central, sino más bien distribuido en segmentos. Robots de este tipo podrían ser utilizados en la exploración de terrenos peligrosos como depósitos de desechos tóxicos, campos minados o cráteres en la tierra o la luna. Aunque estos robots todavía se hallan muy lejos de caminar con la velocidad y destreza de un insecto, los resultados obtenidos hasta ahora parecen prometedores.

1.2.4.2 Biorobots aplicados a la biología

La fascinación de los ingenieros con la conducta animal ha sido realmente provechosa pues ha permitido el desarrollo de técnicas y tecnología cada vez mejores para simular su conducta. Esto ha permitido a los estudiosos de la conducta animal utilizar robots para modelar la conducta biológica con genuino interés biológico. En una era donde la preocupación ética del trabajo con animales está creciendo, la alternativa biorobot promete, entre otras cosas, la posibilidad de enfatizar los experimentos relevantes, reducir el número de animales necesarios y evitar algunas intromisiones quirúrgicas graves (Gonyou 1994, Stricklin et al 1998). Utilizando biorobots podemos obtener conocimientos sobre los mecanismos neurales, estructuras y estrategias de la conducta animal. En los ejemplos que se muestran adelante puede verse como a partir de la información que se tiene sobre el funcionamiento de organismos biológicos, se puede producir robots. Muchas veces los biorobots son la única alternativa viable, pues nos permite disectar cuidadosamente las variables involucradas en la producción de una

conducta. Además, como productos de un esfuerzo biológico, las respuestas que proveen los biorobots vuelven a las pregunta biológica, permitiendo reeligir los esfuerzos sobre el sistema biológico con mucho mas certeza sobre los puntos a atacar. La popularidad de esta metodología está creciendo, siendo utilizada con serio interés por un número cada vez más grande de autores. A continuación se muestra una revisión no exhaustiva de ejemplos de modelos biorobots sin embargo, la siguiente sección no es un requisito para entender el trabajo.

Para investigar los mecanismos de orientación de las langostas reales, Frank Grasso (Grasso *et al.* 1996, 2000) construyó un robot para imitar las operaciones sensoriales de la langosta. Los animales en el medio marino, deben orientarse en gradientes de concentración química. Mediante los olores que perciben pueden detectar comida y miembros de su especie. Sin embargo, debido a la turbulencia y otras propiedades del medio marino estos gradientes no se hallan suavemente graduados y definidos, sino más bien la información se presenta en forma de parches de distinta concentración. Esto expone al animal a un ambiente con complejas señales espacio-temporales de concentración de olores.

Gracias al trabajo experimental desarrollado por Jelle Atema (Atema 1995) y Jennifer Basil (Basil *et al.* 2000) se ha observado la orientación de las langostas expuestas a un gradiente químico y se han realizado hipótesis sobre las estrategias que utilizan para producir una orientación. Las langostas son expuestas a un estímulo que difunde de una fuente al resto del tanque donde se encuentran, produciendo un gradiente en forma de pluma. Para registrar olores, la langosta cuenta con un par de antenas lateralizadas extremadamente sensibles a cambios químicos. Al orientarse, las langostas colocan sus antenas perpendiculares al tanque y avanzan registrando un plano de dos dimensiones paralelo al piso. Los receptores de la langosta reciben "pulsos" de concentración temporales en cada una de las antenas. Una hipótesis sugiere que la comparación cruzada de los valores registrados por cada antena al mismo tiempo es utilizada para decidir la dirección del siguiente movimiento.

Para probar esta hipótesis se construyó un robot que imita a la langosta en sus operaciones sensoriales, aunque no estructurales. En lugar de los complejos apéndices móviles de la langosta, el robot cuenta con un par de motores, cuya salida diferencial decide la dirección de movimiento. Las pruebas con el robot se realizan utilizando las mismas plumas utilizadas para observar la orientación de las langostas. Los

quimiorreceptores del robot están colocados en la misma posición y a una altura comparable con la de la langosta. Utilizando al robot se fue encontrado que lograba orientarse hacia la fuente del olor. Sin embargo, el robot se "perdía" en las zonas más externas del gradiente mientras que su precisión aumentaba cuando éste se encuentra más cerca de la fuente. Así, se definieron dos secciones en el gradiente, la más exterior con una distribución agregada en parches y una sección más cercana a la fuente con un gradiente más definido. La incapacidad del robot de orientarse rápidamente en la sección más exterior sugiere nuevas hipótesis sobre mecanismos para explicar esta orientación. Por ejemplo, la existencia de mecanismos de memoria a largo plazo que permitan a la langosta un mayor conocimiento espacial de su entorno (*Revisado en Grasso et al. 1996, 2000*). Este trabajo permite la exploración de la orientación química en un ambiente sensorial complejo. En el medio marino los estímulos siguen una dinámica espaciotemporal compleja y los organismos que lo habitan deben poder reaccionar a esta complejidad exitosamente.

En el trabajo de Mandalayan Srinivasan (*Srinivasan et al. 2001*) se utilizó un robot para conocer las variables asociadas a los aterrizajes de las abejas. Como se describe antes en este trabajo, los insectos aunque excelentes navegantes, no poseen un sistema visual muy sofisticado. A diferencia de los vertebrados, los insectos tienen ojos inmóviles con óptica de foco fijo. Por ello no pueden inferir la distancia haciendo converger la vista con la superficie del objeto. Además sus ojos están muy cerca uno del otro y su agudeza visual es muy pobre, por lo que la estimación de un rango por visión estéreo está restringido a pequeñas distancias. Sin embargo, los insectos esquivan objetos y aterrizan sobre superficies complejas sin mucha dificultad.

Los experimentos con abejas muestran que éstas se acercan a la superficie a ángulos de descenso superficiales ($-30^{\circ} \pm 13^{\circ}$). También tienden a mantener la velocidad angular de la imagen a la superficie constante al acercarse. Manteniendo la velocidad angular constante trae como consecuencia que la velocidad horizontal se reduce conforme la altura de vuelo se reduce, por lo que ambos lleguen a 0° al mismo tiempo, resultando en un suave aterrizaje. Esta característica hace que no sea necesario conocer la velocidad de vuelo ni de la altura sobre el piso. Lo que sí es un requisito es que el insecto se encuentre constantemente en movimiento porque el movimiento de la imagen, resultado del movimiento del insecto es crucial para el aterrizaje.

Se probó la viabilidad de esta estrategia utilizando una grúa robot equipada con un sistema visual y capaz de movimiento en tres dimensiones. Sin embargo, los movimientos se encuentran limitados hacia delante (eje +x) y hacia abajo (eje -z). Se probó el algoritmo para la orientación visual utilizando la egomoción desarrollado a partir del aterrizaje de las abejas (Srinivasan *et al.* 2000). Utilizando el algoritmo, el robot desciende en un ángulo constante definido por el usuario y mantiene constante la velocidad angular entre la superficie con base en la velocidad generada por el movimiento de la cámara. Se encontró que las trayectorias de aterrizaje y la altura del robot decrecen exponencialmente, como la velocidad de avance y descenso, mientras se mantiene constante la velocidad angular entre el robot y la superficie. La velocidad de avance y descenso se reduce hasta que ambas alcanzan 0° al mismo tiempo que tocan la superficie, asegurando un aterrizaje suave. Este algoritmo es suficiente para describir los graciosos aterrizajes de las abejas. Sin embargo, falta generar algoritmos para describir los aterrizajes en superficies complejas, comunes en la topografía cotidiana de una abeja (*Revisado en Srinivasan et al.* 2000). El sistema visual de los insectos resulta sorprendente, pues involucra pocas variables y genera respuestas complejas. En este caso la biorrobótica muestra como poder indagar mas dentro de estos mecanismos y encontrar la fórmula de su éxito evolutivo.

La construcción de una abeja robot por Kirchner y Towne (Kirchner & Towne 1994) sirvió para resolver una larga controversia sobre los estímulos relevantes para la comunicación entre las abejas. Desde los años 40's se descubrió el primer significado de la danza de las abejas. En el nido, las caminatas y meneos de una forrajera exitosa correlacionan con la distancia y la dirección de la fuente de alimento (Karl von Frisch 1967). En experimentos con abejas en un panal fabricado de vidrio transparente lograron codificar los elementos básicos de la danza. La forrajera camina a través de las laminas verticales del panal que cuelga en la colmena y trazan la figura de un ocho. En cada círculo pausan y caminan en zigzag, meneando su cuerpo de lado a lado. Algunos reclutas potenciales siguen la danza atentamente y luego salen volando hacia el objetivo. Estos regresan y bailan atrayendo cada vez más abejas a la fuente del alimento. La localización de la comida es indicado por el punto al que una danzante se orienta en su período de meneo. Si la caminata en zigzag se halla hacia arriba, apuntando hacia el doce en un reloj, el alimento se halla en la dirección del sol. Si la caminata esta orientada 60° a la izquierda del sol, el alimento se halla 60° a la izquierda del sol. Además

dependiendo de qué tan rápido la danzante termina sus circuitos, corresponde a la distancia entre la colmena y el alimento. Entre más frenético sea su paso más corta será la distancia. Sin embargo, era difícil explicar cómo podían las abejas observar la danza de una forrajera en la completa oscuridad del panal.

Una hipótesis alternativa desafió a la primera sugiriendo que la información se transmitía por los zumbidos de baja frecuencia que producen las abejas (Wenner 1967^a, Wenner & Johnson 1967^b, Wenner *et al.* 1969). Durante la danza, la forrajera produce una vibración en las alas creando un sonido de baja frecuencia. Abejas con las alas reducidas experimental o genéticamente pueden volar y danzar normalmente pero no tienen éxito reclutando a las abejas que observan la danza. Las abejas también han demostrado ser sensibles a las vibraciones en el cuerpo que causan las abejas espectadoras al golpear su tórax con el suelo del panal, produciendo ligeras vibraciones que la danzante siente. Esta se detiene y convida a las posibles reclutas con una muestra del alimento forrajado. Esta hipótesis no tuvo mucho éxito debido a la creencia generalizada de que las abejas eran incapaces de registrar los sonidos.

Para solucionar la controversia en cuanto a los estímulos que logran una danza exitosa, se construyó un robot capaz de danzar y producir vibraciones como una forrajera exitosa. El robot consistió en una pequeña abeja de cobre cubierta por una delgada capa de cera de abeja. Midiendo apenas un poco más que una abeja obrera, cuenta con 2 alas de lámina que al vibrar producen zumbidos similares a los de las abejas. Un motor controla la abeja para producir la danza en forma de ocho y la caminata en zigzag. Un operador puede modificar el ángulo en el que danza la abeja y mediante un botón activar el zumbido. Un tubo sobre la cabeza del robot obsequia agua azucarada a las otras abejas de la misma manera que una abeja da muestras de la comida forrajada a sus compañeras. En los experimentos, se observó que el robot era capaz de reclutar otras abejas y enviarlas exitosamente a una fuente de alimento. Al remover uno a uno los componentes de la danza se observó que eran la suma y no los componentes individuales los que producen una danza exitosa. De esta manera se resolvió un largo misterio. Ni una danza silenciosa o un canto sin danza, logran comunicar exitosamente el sitio de forrajeo. El robot plantea toda una línea de investigación, para conocer la eficiencia y robustez en los mecanismos de comunicación de las abejas (*Revisado en* Kirchner & Towne 1994). Utilizando robots se pueden disectar las variables involucradas en un estudio y conocer el efecto aislado de cada variable.

En el trabajo de Barbara Webb (Webb 1996) se modela una conducta muy particular para las hembras de los grillos de *Ensifera gryllidae*: la habilidad de orientarse hacia un sonido específico y hallar su origen. Las hembras de los grillos son altamente selectivas con respecto al sonido que las atrae. Los machos atraen a las hembras produciendo sonidos de características específicas al golpear un ala contra la otra. Las principales características que las hembras distinguen de los sonidos producidos por los machos de su especie son la frecuencia y el ritmo. La frecuencia es una característica particular del sonido producido por cada especie de grillos. Cada raspado de alas produce una emisión sonora conocida como sílaba, la tasa de repetición de sílabas es el ritmo. Una hembra debe distinguir el ritmo y frecuencia del macho que prefiere entre el canto simultáneo de muchos machos. Debido al tamaño de los grillos y la poca distancia entre sus oídos, las diferencias en el tiempo, fuerza y amplitud de los sonidos que llegan a cada oído no proveen claves suficientes para distinguir la dirección en que se origino el sonido. El sistema sensorial que permite la detección de fuentes de sonido en los grillos se halla en sus patas delanteras. Los grillos tienen un tubo traqueal que conecta ambos oídos, de manera que cada oído recibe sonidos externos e internos a través de un tubo. Habiendo estos viajado distancias diferentes antes de llegar al tímpano, las ondas se refuerzan o se cancelan dependiendo de su fase relativa. Así la amplitud resultante representa la dirección de la fuente del sonido, la fuente del sonido se halla del lado con mayor amplitud.

El robot modelado a partir del grillo fue diseñado con micrófonos en miniatura que captan sólo los sonidos de una frecuencia determinada. En el grillo más de 500 neuronas de cada oído convergen en un pequeño número de interneuronas del sistema nervioso central. Para dos de estas interneuronas, una conectada al oído izquierdo y otra al derecho, se conoce el patrón de disparo en respuesta al sonido. El animal siempre voltea hacia el lado del cual un miembro de este par de neuronas responde más fuertemente. Qué tan rápidamente (latencia) y qué tan frecuentemente (tasa de disparo) dispara la neurona, depende de la fuerza de la vibración del tímpano. El modo más directo que puede utilizar el sistema nervioso del grillo para localizar la respuesta es moverse hacia al lado que comenzó a disparar primero. Esta hipótesis encaja bien con el sistema de comunicación entre los grillos y la repetición de símbolos a frecuencia constante en la canción de la especie. Además, una hipótesis para relacionar la tasa de disparo con la orientación requeriría más procesos neurales. El robot es capaz de utilizar el desfaseamiento en el tiempo para averiguar la dirección del sonido y orientarse

adecuadamente. El robot mostró éxito en encontrar los parlantes donde se originaba el sonido. El robot es capaz de reaccionar al ritmo correcto, produciendo trayectorias indistinguibles de las de los grillos. Cuando se exponía a interrupciones o variaciones de tiempo en los ritmos tanto los grillos como el robot eran incapaces de hallar exitosamente el parlante. Incluso en las trayectorias producidas al fallar para encontrar el parlante coinciden con los errores cometidos por los grillos. El éxito de este robot también está siendo probado en campo (Horchler *et al.* (en prensa)). (Revisado en Webb 1996). El modelo biorbotico del grillo es un ejemplo de la óptima aplicación de una metodología biorrobótica. Luego de validado un modelo, se pueden realizar experimentos esperando que la respuesta del robot sea prácticamente la misma que la del organismo.

Para investigar la conducta quimiotáctica o la habilidad de orientarse en respuesta a gradientes de concentración química del nemátodo *Caenorhabditis elegans*, el grupo de Lockery (Morse *et al.* 1998) ha desarrollado un modelo robot que utiliza algoritmos derivados de las observaciones conductuales del nemátodo. *C. elegans* localiza su comida por quimiotaxias. La quimiotaxis exhibida por *C. elegans* es especialmente robusta pues estos nemátodos pueden orientarse en gradientes que varían en intensidad por cuatro órdenes de magnitud. Además, *C. elegans* tiene un sistema nervioso compuesto de sólo 302 neuronas de las que se conoce la descripción completa de su morfología y actividad sináptica (White *et al.* 1986). La orientación de los nemátodos es observada en un gradiente químico construido en una caja de *petri* en la que la concentración de un químico sigue una distribución gaussiana del centro a la periferia. Los nemátodos se colocan a algunos centímetros del centro y luego de explorar avanzan hacia arriba en el gradiente y permanecen en el centro. *C. elegans* detecta el ambiente químico en un solo punto en el espacio. Los órganos sensoriales con los que detecta diferencias de concentración química, son llamados *ámfidas* y se muestran a cada lado de la cabeza. Durante las contracciones dorsoventrales que desplazan al nematodo, las *ámfidas* se encuentran perpendiculares al gradiente y se hallan expuestas a la misma concentración química. Por ello los nemátodos deben hacer comparaciones temporales de concentración química al moverse para conocer su ambiente. La dirección está dada por el ángulo de la cabeza respecto al cuerpo, el ángulo está controlado por dos conjuntos de músculos en cabeza y cuello, uno de cada lado del cuerpo. Los conjuntos de cada lado se mueven al mismo tiempo. La velocidad permanece constante durante la quimiotaxis,

por lo que los cambios de dirección se muestran como la variable de control más probable.

Para estudiar los mecanismos de quimiotaxis, los autores construyeron un robot que cuenta con una red sensorimotora basada en las características más prominentes de la red neural que se cree modula la quimiotaxis en *C. elegans*. El robot está equipado con un solo sensor que mide el ambiente en un solo punto. El ángulo del eje frontal del cuerpo y la tasa de giro están controlados por un par de efectores de cada lado del cuerpo del robot. Una serie de siete neuronas interconectadas modula la conducta del robot. El sensor estimula las interneuronas en función del cambio de intensidad registrado. La estimulación de las interconexiones activa los efectores que producen el cambio de ángulo en dirección del movimiento del robot. El vehículo es movido por motores operados a una velocidad constante. Se utilizó un gradiente de luz, en la que la intensidad aumenta de la periferia al centro. Este fue construido colocando un foco a 1.2 m sobre el centro de la arena. Se encontró que cuando el robot se movía lejos de la luz, la estimulación sensorimotora aumenta y la tasa de giro es incrementada, produciendo una reorientación mientras que cuando el robot se acercó a la luz, la estimulación sensorimotora decrece produciendo que la tasa de cambio disminuía y el robot avanzaba en línea recta, produciendo trayectorias muy similares a las del nemátodo. Utilizando este robot se podrían realizar experimentos para observar los efectos de la manipulación, así como la reacción del nemátodo y el robot a gradientes de distinta complejidad espacial. (Revisado en Morse *et al.* 1998)

La precisa localización de fuentes de sonido es el interés del trabajo de John Hallam (Walker *et al.* 1998). Sonidos originados en un lugar pero recibidos en distintas posiciones del campo tienen, como consecuencia del viaje, ciertas características modificadas. Empleando dos receptores lateralizados, los murciélagos distinguen el origen de un sonido basándose en desigualdades de intensidad y tiempo registradas por cada oído. La comparación de las magnitudes relativas y por ello la importancia relativa de estos efectos varía con las propiedades acústicas, el tamaño de la cabeza y el tamaño de los oídos o *pinnae* de un murciélago. Se cree ampliamente que la estrategia utilizada por los murciélagos para la ecolocación es la utilización de las desigualdades de intensidad interaural. Estas pueden ser manipuladas por las características del receptor, como tamaño y orientación de las *pinnae*, permitiendo a las cabezas pequeñas de los murciélagos utilizar los efectos estéreo de las cabezas más grandes. Las *pinnae* de los

murciélagos están bien desarrolladas y a veces sobrepasan el tamaño de la cabeza. La variedad de formas, tamaño y movilidad sugieren que existe una gran variedad de formas de recepción. La lateralización del sistema perceptual auditivo genera poderosas pautas de localización. Estas permiten a los animales con dos oídos detectar un sonido con una locación bien definida teniendo y con atributos espaciales.

La mayoría de los murciélagos que utilizan *gritos* de banda ancha, mantienen sus pinnae en una orientación fija relativa a su cuerpo durante la ecolocación y pueden localizar a sus blancos comparando las intensidades registradas en cada oído emitiendo sonidos en diferentes frecuencias. Sin embargo, muchas de las especies de las familias *Rhinolophidae* y *Hipposideridae* sólo pueden emitir una frecuencia constante. Los miembros de estas familias se distinguen por sus pinnae altamente móviles, incluso algunas especies pueden mover independientemente cada pinnae, durante la ecolocación. La movilidad de las pinnae puede ser utilizada en tareas relacionadas con la búsqueda. Al parecer estos murciélagos investigan el campo para encontrar potenciales blancos moviendo sistemáticamente las pinnae en un arco vertical. Un movimiento es realizado para cada ecolocación de frecuencia constante con la pinnae derecha e izquierda moviéndose en arcos iguales pero de distinto signo, hacia un lado luego hacia el otro, durante cada eco.

Un robot simulando la localización de las pinnae, cuenta con un trasmisor que genera sonidos. El robot cuenta con un par de oídos móviles que no simulan la morfología de las pinnae, pero sí la proporción pinnae/cabeza y la extensa movilidad. Utilizando un robot se prueban los tipos de claves generadas por intensidades distintas generadas por los receptores que revisan el ambiente imitando los movimientos pinneales de los *Rhinolophidae* y *Hipposideridae*. Una contribución interesante del trabajo desarrollado con este robot, fue mostrar que la velocidad de movimiento de las pinnae y no la distancia entre estas, era lo que producía mayores diferencias interaurales en la intensidad del sonido recibido y por ello una orientación más precisa. (*Revisado en Walker et al. 1998*).

En el grupo de Michele Rucci (Rucci *et al.* 1999) se estudia cómo los cambios físicos que produce el crecimiento alteran la orientación acústica y visual en los búhos de granja. Los búhos de granja *Tyto alba*, aprenden a orientarse visual y auditivamente con base en la experiencia sensorimotora. Para localizar la fuente de un sonido utilizan la diferencia temporal en cada oído. Exponiendo a las mismas pruebas a distintos individuos se ha encontrado que existe una gran diferencia individual en la localización de la fuente

de sonido, como consecuencia de el tamaño de la cabeza y la forma del pelaje. Durante el desarrollo, el tamaño del cuerpo, la cabeza y el plumaje de *T. alba* cambia significativamente lo que hace que la localización de estímulos sea una habilidad que debe ajustarse a medida que el búho crece para asegurar una localización precisa del estímulo. Básicamente, en el sistema nervioso de *T. alba* las conexiones del sistema auditivo y visual, después de pasar por varios relevos, convergen en el tectum óptico. El tectum óptico es una estructura nerviosa que se reconoce está involucrada en las respuestas motoras que producen orientación en *T.alba* (Knudsen 1983, Konishi *et al.* 1988).

Para probar esta hipótesis se desarrolló un robot que consiste en una cabeza capaz de girar sobre su propio eje. La cabeza se encuentra equipada con un par de cámaras que gira sobre un solo eje. En el robot, se pueden modificar las distancias entre ojos y entre oídos, ajustando las distancias según las distintas etapas de desarrollo. El robot está controlado por un sistema de redes neurales que imita las conexiones en el sistema nervioso regulando la orientación en *T. alba*. Cuando un estímulo visual o auditivo aparece dentro del campo de reconocimiento, la cabeza hace un intento de localizarlo. Los sensores propagan su información activando la respuesta de orientación. La información modifica las fuerzas sinápticas de las conexiones. Si al comienzo son aleatorias, éstas pueden disminuir o incrementar dependiendo si ocurrió un evento favorable, incrementando la probabilidad de que ocurra la misma acción en situaciones similares. El robot tiene un buen desempeño en su conducta de orientación y es tolerante a manipulaciones en la distancia entre sensores. Esto sugiere alta plasticidad y rápida adaptación en un proceso de orientación esencial para *T. alba*. Otros experimentos se deben realizar para observar los efectos de modificaciones severas en la morfología de los búhos de granja. (*Revisado en Rucci et al.* 1999)

1.3 Sesgo hacia los invertebrados

Aunque podemos observar un amplio espectro de modelos biorrobóticos, el porcentaje que involucran modelos invertebrados muestra el sesgo que se tiene en la elección del organismo a modelar. Este sesgo no es injustificado, ciertamente los invertebrados tienen características interesantes que los hacen buenos modelos biológicos (Webb 2002). Más allá de su fácil crianza, rápida reproducción y sencilla manipulación, los invertebrados resultan especialmente útiles para estudios biorrobóticos.

Gracias a más de un siglo de estudios neurofisiológicos, conocemos casi completamente el sistema nervioso y por ende la circuitería que une una sensación y acción en múltiples invertebrados. Algunos ejemplos de invertebrados para los que existe un extenso cuerpo de conocimientos neurofisiológicos son los nemátodos (Ward 1973, White *et al.* 1986, Mori & Oshima 1995, Tsalik & Hobert 2003) las abejas (Menzel 1996, Horridge 1977, 1987) los grillos (Elsner & Huber 1973, Sviderskii 1973) y las langostas (Atema 1995)

Las conexiones en los invertebrados son en varios órdenes de magnitud menos numerosas que las de los vertebrados. Las conductas estereotipadas de los insectos las hacen más fácilmente analizables y permite desglosar las partes involucradas. Gracias a la alta tolerancia de los insectos a la manipulación quirúrgica se han logrado mapear las conexiones neuromusculares con gran detalle. Además, la capacidad de cómputo de los robots actuales, en este momento del desarrollo tecnológico, se asemeja a la capacidad del sistema nervioso de los insectos, lo suficiente para reproducir en cierto grado sus capacidades sensoriales y motoras. Todo esto da a los constructores de robots la posibilidad de construir circuiterías completas a partir de la información obtenida por la neurofisiología y conducta.

1.3.1 Trabajo con mamíferos

La extrema complejidad en los sistemas nerviosos de los vertebrados, los hace sistemas difíciles de abordar experimentalmente. El aprendizaje y la memoria, la complejidad sensoriomotora, el desarrollo psicobiológico, la plasticidad neuronal, etc. producen una enorme variación individual tanto en la configuración de las conexiones neurales como en su manifestación espaciotemporal: la conducta; haciendo extremadamente difícil mapear las vías que siguen la información en el sistema nervioso. El sistema nervioso de los vertebrados está lejos de ser comprendido y no existe algún sistema artificial que esté cerca de imitar su capacidad. Entre los vertebrados, los mamíferos son los que poseen un sistema nervioso filogenéticamente más similar al nuestro. Exceptuando los modelos de psicología cognitiva sobre la inteligencia humana, son pocos los estudios que utilizan un mamífero como modelo para construir un sistema robótico. La escasez de modelos sensorimotrices para explicar la conducta de mamíferos resulta contradictoria, pues es en los mamíferos la vía neurofisiológica tradicional es más compleja. En los mamíferos es donde resultaría más práctico intentar obtener algoritmos

generales para la conducta, pues intentar conocer la totalidad de las vías que conectan sensación y acción resulta prácticamente imposible.

Hasta la fecha, no se conoce ningún estudio biorrobótico que trate sobre la conducta en mamíferos recién nacidos. Las conductas ejecutadas durante las primeras etapas de desarrollo modifican momento a momento las posibilidades de supervivencia del organismo. Es en estas etapas donde se encuentran los índices de mortalidad más alta para las especies en el medio natural. A pesar del celoso cuidado que las madres de muchas especies proveen a sus hijos, muchas decisiones quedan a la cría recién nacida; una cría que no se alimente correctamente o no pueda mantener una temperatura corporal adecuada seguramente morirá. En estas etapas tempranas, la calidad de las decisiones de las crías, sistemas en pleno desarrollo, modificará sus oportunidades de supervivencia inmediata y moldeará la calidad de decisiones que tomarán en un futuro lejano.

2 Antecedentes

2.1 El gazapo como modelo

El modelo con el que se trabaja en nuestro laboratorio es la cría del conejo europeo (Fig. 1). El conejo (*Oryctolagus cuniculus*) es un animal que comúnmente se utiliza en el trabajo de laboratorio (OACU 2003). Una de las razones que lo hacen una popular elección es la inusual conducta materna que presenta. La madre no provee ningún cuidado materno más allá de la construcción *pre* parto de un nido de paja y pelo de su pecho y la alimentación de sus crías cada 24 horas en periodos de máximo cinco minutos (Hudson *et al.* 1998). Consecuencia de esto son las peculiares habilidades y necesidades de los conejos neonatos. Al nacer, los gazapos pueden desplazarse hasta 40 cm entre 1 y 5 minutos (Hull & Hull 1982), más rápidamente que una cría de rata que tarda 15 minutos en moverse un distancia de 2.5 cm (Ogilvie & Stinson 1966) pero no cuentan con el completo control motor que las crías de liebre tienen al nacimiento (Hacklander 2002). Los sistemas visual y auditivo no se hallan completamente desarrollados. Los ojos y oídos externos permanecen cerrados hasta el noveno día. Además de los funcionales sistemas táctiles, vestibulares, propioceptivos y térmicos, poseen un sistema olfativo extremadamente sensible. Con estos sistemas sensoriales, los gazapos pueden encontrar el alimento en los pezones de la madre y a los demás miembros de la camada.

2.1.1 Termorregulación fisiológica

Entre muchas otras cosas, los gazapos deben, desde el momento de su nacimiento, mantener una temperatura corporal adecuada para no morir de frío (Hardman *et al.* 1969, Hull & Hull 1982). Para ello, los gazapos cuentan con mecanismos fisiológicos y conductuales. El mecanismo fisiológico involucra la termogénesis que ocurre debido al tejido adiposo pardo (Hull & Segal 1965) que los gazapos tienen sobre el cuello, entre los hombros, axilas y pecho (Dakwins & Hull 1964). Sin embargo, debido a la ausencia de pelaje y a la gran relación entre superficie corporal y volumen que poseen, cuentan con un escaso aislamiento térmico que no les permite mantener su temperatura corporal constante en ambientes menores a 30° C (Dakwins & Hull 1964, Jeddi 1971). Desde el décimo día el pelaje de los conejos comienza a crecer, capacidad de aislarse

térmicamente aumenta (Hull & Segal 1965). Las temperaturas ambientales que promueven la necesidad de termogénesis decrecen a medida que el gazapo crece.

2.1.2 Termorregulación conductual

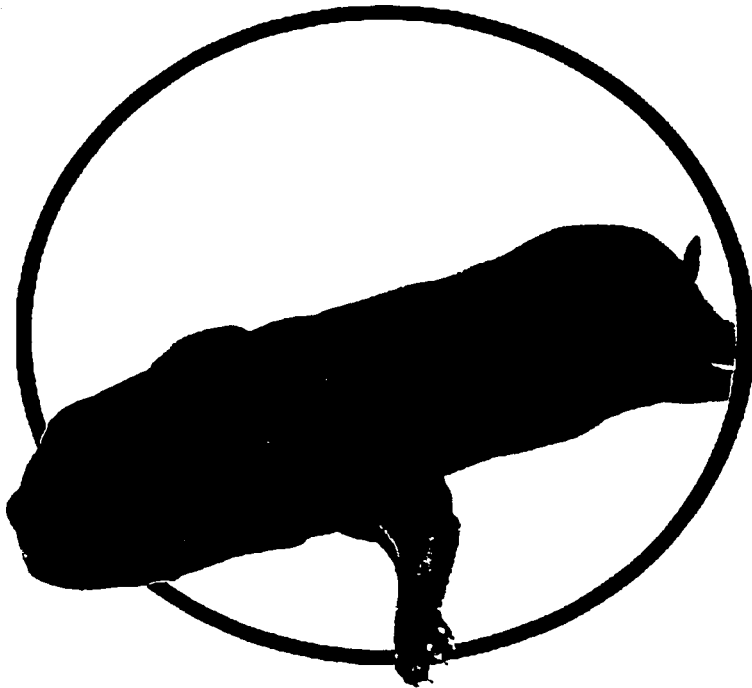
Al nacer los gazapos no cuentan con la capacidad fisiológica necesaria para regular su temperatura si la temperatura ambiental llega a caer debajo de los 30° C (Hull 1965, Dawkins & Hull 1964, Jeddi 1971). Como no cuentan con una fuente de calor constante los gazapos deben encontrar una manera de mantener su temperatura corporal. Los gazapos pueden regular su temperatura conductualmente desde las primeras horas *post parto* (Satinoff *et al.* 1976, Hull & Hull 1982). La termorregulación conductual se define como los movimientos que un gazapo realiza cuando no existe un balance en el intercambio de calor entre su cuerpo y el ambiente (Jeddi 1971, Satinoff *et al.* 1976, Hull & Hull 1982). Estos movimientos incluyen tanto las conductas que los conejos realizan para calentarse, como los que realizan para disminuir su temperatura cuando esta excede los límites fisiológicos confortables.

Luego de alimentarse, las crías excavan y se entierran bajo el material del nido para reducir el área expuesta al ambiente. Una vez entre el material del nido, las crías se separan para orinar. Una vez secas, las crías buscan el punto más cálido del nido (Hudson & Distel 1982). Su habilidad para orientarse al calor les permite buscar las fuentes de calor que provee el agrupamiento de las crías en el nido. El agrupamiento de las crías reduce el área de superficie expuesta y permite aprovechar el calor generado por cada individuo (Bautista *et al.* 2003). La orientación hacia el calor es una conducta muy importante para regular su temperatura, pues permite a los gazapos localizar una fuente de calor, reducir el área de contacto con el aire y aprovechar el calor generado por el agrupamiento de las crías. La incapacidad para encontrar una fuente de calor puede resultar en el enfriamiento y muerte de la cría.

En un estudio que buscaba confirmar la capacidad de orientación térmica en los conejos neonatos, Luis Pacheco-Cobos (Pacheco-Cobos 2003^a, Pacheco-Cobos *et al.* 2003^b) expuso gazapos a gradientes de temperatura de manera individual. Al ser colocados, los gazapos inmediatamente se desplazan buscando su temperatura óptima. En estos experimentos se obtuvieron las trayectorias de los gazapos sobre los gradientes.

Las trayectorias, muy distintas entre si, parecían errantes y exploratorias. Los gazapos parecían moverse erráticamente por el gradiente pasando varias veces por la temperatura reportada como *termoneutra*, en la que no hay pérdida ni ganancia neta de calor. A pesar de la aparente variación en la orientación térmica, ésta probó ser exitosa pues los gazapos permanecían significativamente más tiempo sobre el rango termoneutro que en el que pasaban sobre cualquier otro rango de temperatura.

Aunque confirmó la atracción y preferencia de las crías por ciertos rangos de temperatura, este estudio no logró develar la relación sensorimotora entre los estímulos térmicos presentados en los gradientes y la conducta de las crías. Para hacer más indagaciones en los mecanismos sensorimotores que regulan esta conducta, este estudio se sigue los pasos de una metodología biorrobótica. Primero se buscaran relaciones hipotéticas sobre la relación entre la temperatura de los gradientes y las trayectorias de los conejos. Luego, el resultado derivado del nuevo análisis será programado en un sistema artificial para probar su validez. Conociendo los componentes y las interacciones que originan la termotaxia podemos construir hipótesis sobre la capacidad sensorial de los conejos y sobre las prioridades psicobiológicas que rigen su conducta.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig.1 - Gazapo de *Oryctolagus cuniculus* en tamaño real. Al nacimiento las crías, sordas y ciegas, pueden mostrar una eficiente regulación térmica conductual.

3 Hipótesis

- Es posible simular la conducta de orientación térmica de los conejos recién nacidos utilizando un robot programado con un algoritmo derivado de la observación de la conducta de los conejos sobre un gradiente térmico.
- Comparando el desempeño del robot y los gazapos podemos conocer si los mecanismos de decisión programados en el robot son condición suficiente para explicar la orientación hacia el calor.

4 Objetivos

- 1) Generar un algoritmo que describa la conducta de los conejos neonatos a un gradiente térmico
 - Obtener la distribución de la temperatura de superficie del gradiente.
 - Obtener la distribución de los movimientos de los conejos sobre el gradiente.
 - Investigar la relación que guarda la conducta de los conejos con los cambios de temperatura.
- 2) Evaluar el desempeño del algoritmo obtenido a partir de observaciones conductuales utilizando un robot.
 - Incorporar el algoritmo en un programa para el robot.
 - Construir gradientes de información que simulen los gradientes térmicos.
 - Realizar pruebas con el robot sobre los gradientes construidos.
- 3) Comparar el la ejecución del robot con el desempeño de los conejos.

Parte 1: Obtención del algoritmo

5 Metodología: Obtención del algoritmo

5.1 Metodología *in vivo*

En los experimentos previos realizados por Luis Pacheco-Cobos (Pacheco-Cobos 2003^a), se expusieron crías de conejo de hasta nueve horas de edad a gradientes térmicos. Para la obtención de un gradiente de temperatura concéntrico, una superficie metálica, circular y plana con 60 cm. de diámetro fue calentada por un foco infrarrojo colocado por debajo del centro ($\bar{x}=42.8^{\circ}\text{C}$ D.E.=2.2), mientras que la periferia de la superficie fue enfriada utilizando un neumático de bicicleta, relleno de agua congelada colocada bajo el borde de la arena ($\bar{x}=14.4^{\circ}\text{C}$ D.E.=2.2). Sobre este gradiente fueron colocadas individualmente 16 crías de conejo. Sobre la misma arena, expuesta a temperatura ambiente ($\bar{x}=21.7^{\circ}\text{C}$ D.E.=1.3) y sin la existencia de un gradiente fueron expuestas en manera de prueba control 16 crías de manera individual.

La conducta de cada cría fue filmada con una cámara de vídeo por encima de la arena. Una cuadrícula de medición a escala de la arena (12:1) fue colocada sobre un monitor de video, para observar y medir la conducta filmada. Cada cuadrante de la cuadrícula represento 6 cm de la arena y cuenta con una letra y un número asignados por un plano cartesiano, los números corren horizontalmente y las letras en el eje vertical. La posición del gazapo fue registrada, tomando como referencia el hocico, cada segundo durante 200s, la duración total de la prueba. Con los datos de estos experimentos fue construida una base de datos sobre las que se realizaron las observaciones de este trabajo.

5.2 Procedimiento

5.2.1 Obtención de los datos

Se utilizó la base de datos generada en un estudio previo (Pacheco-Cobos 2003^a) con la intención de realizar nuevos análisis con distintas categorías conductuales y con el objetivo de obtener un algoritmo.

Todas las operaciones y manejo de datos para la obtención del algoritmo se llevaron a cabo utilizando Microsoft Excel® (Microsoft Corporation, 2000). Las pruebas estadísticas se realizaron utilizando GraphPad InStat® (San Diego, 1992) y la construcción de gráficas se realizó en SigmaPlot® (SPSS, 2001).

5.2.2 Criterios de inclusión de condiciones.

Para el análisis se utilizaron las trayectorias de 32 conejos divididos en cuatro condiciones distintas (Tabla 1). Para los conejos expuestos a un gradiente concéntrico, un grupo comenzó la prueba en la periferia de la arena (Condición *Grad InP*, n=8) y otro grupo de conejos inició la prueba en el centro de la arena (Condición *Grad InC*, n=8). Un grupo de conejos sobre la arena sin gradiente o control iniciaron la prueba sobre la periferia (Condición *Ctrl InP*, n=8) y otro grupo comenzó la prueba sobre el centro de la arena (Condición *Ctrl InC*, n=8).

	Inicio Periferia (<i>InP</i>)	Inicio Centro (<i>InC</i>)
Control (<i>Ctrl</i>)	<i>Ctrl InP</i>	<i>Ctrl InC</i>
Gradiente (<i>Grad</i>)	<i>Grad InP</i>	<i>Grad InC</i>

Tabla 1. Las condiciones a las que están clasificados las crías de conejo utilizadas en el estudio.

Se escogieron las trayectorias en el gradiente concéntrico por representar una simplificación del sistema. En este gradiente las crías se orientaban utilizando, casi exclusivamente, información térmica, sin entrar en contacto con la pared que rodea la arena. El estímulo físico que provee la pared, permite a los gazapos orientarse por estímulos táctiles o tigmotaxia (Jeddi 1971, Pacheco-Cobos *et al.* 2003^b). El gradiente concéntrico permite además, estudiar la orientación hacia un estímulo de distribución similar a la observada en las condiciones naturales, en este caso la distribución de la temperatura del nido.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2.3 Análisis conductual

Con base en el registro de la posición del hocico de la cría se realizó la codificación de la trayectoria. Utilizando una cuadrícula de medición, la trayectoria se dividió en unidades de desplazamiento. Con el eje rostro-caudal del conejo como referencia de posición, el gazapo cuenta únicamente con la posibilidad de moverse a cualquiera de los ocho cuadros adyacentes al cuadro en que el se encuentra su hocico. Delante (Fig. 2) se ilustran los ocho posibles movimientos del conejo recién nacido según el análisis. El análisis no incluye la posibilidad de que el conejo permanezca en el mismo cuadrante ya que esa posibilidad no aporta Información sobre dirección en el desplazamiento.

Cada posible desplazamiento lleva un nombre dada la dirección:

- 1) Hacia el hocico o *Nosebound Derecha* o *Nosebound Izquierda*: El desplazamiento lleva al hocico a cualquiera de los cuadros frente al hocico del conejo.
- 2) Hacia el costado o *Sidebound Derecha* o *Sidebound Izquierda*: El desplazamiento produce que el hocico ingrese a cualquiera de los cuadros laterales al cuerpo del gazapo.
- 3) Hacia la cola o *Tailbound Derecha* o *Tailbound Izquierda*: El desplazamiento mueve al hocico desde el cuadrante central a cualquiera de los cuadros debajo de la parte posterior del conejo.

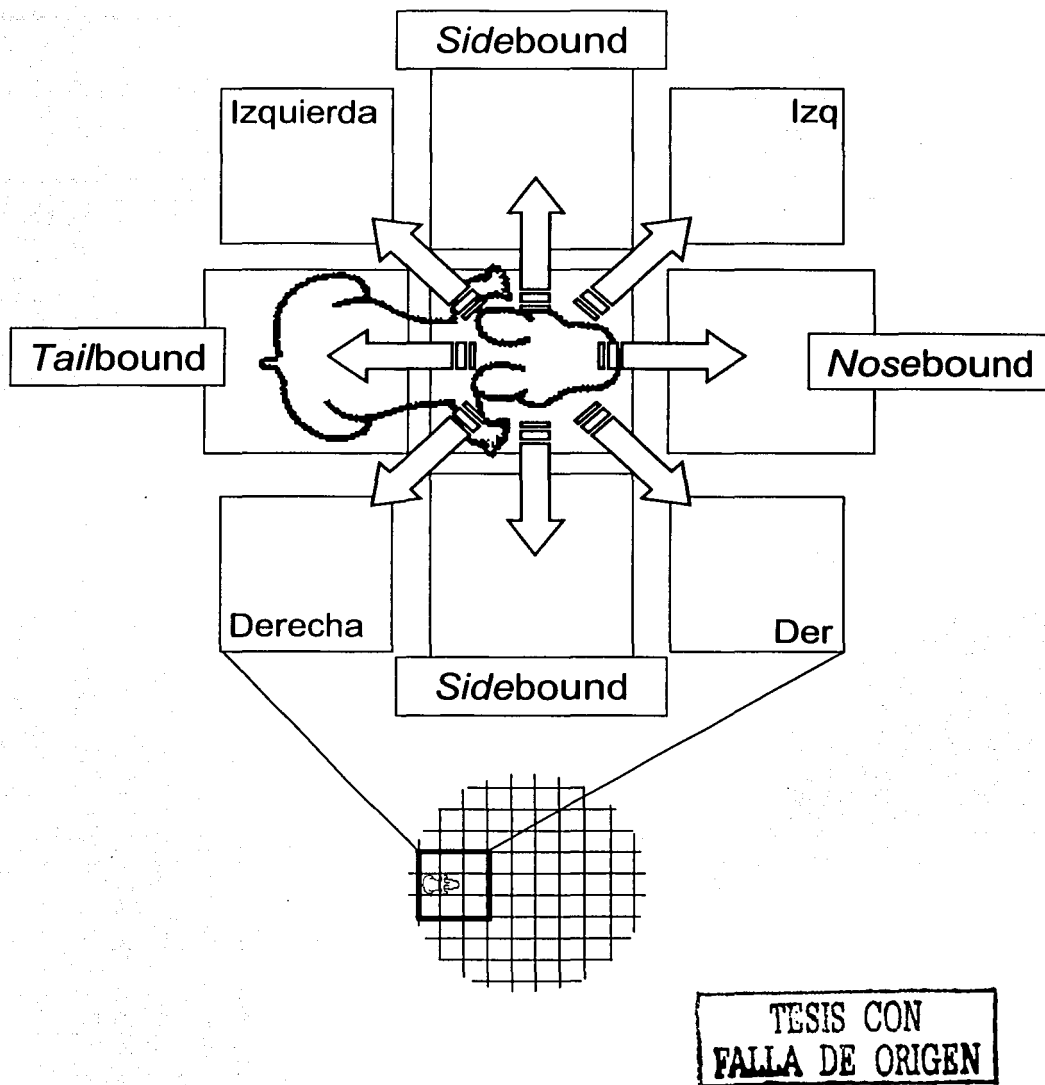


Fig. 2 - Los 8 posibles movimientos que el conejo puede realizar a partir de un cuadro. La dirección en que el conejo avanza depende de la posición previa del conejo. En la parte inferior se puede observar la gradilla con la que se mapeo la trayectoria.

5.2.4 Análisis de los gradientes.

En el estudio de Pacheco-Cobos (Pacheco-Cobos 2003^a) se midió la temperatura en el centro de cada cuadrante en tres ocasiones distintas. Un análisis de las temperaturas demostró que era posible la agrupación de cuadrantes formando anillos concéntricos de temperatura similar. El resultado fue una arena dividida en cuatro anillos concéntricos (Fig. 3). El anillo 1 es el más cercano a la periferia, donde se encuentran las temperaturas más bajas. El anillo 4 es el anillo central, donde se encuentra el rango de temperaturas más alto. El punto central de la arena es el más caliente, con una temperatura de 43° C. La tabla (Tabla 2) resume las características térmicas del gradiente según la división por anillos.

	Anillo 1	Anillo 2	Anillo 3	Anillo 4
Promedio	$\bar{x}=16.8^{\circ}\text{C}$ D.E.=1.32	$\bar{x}=23.1^{\circ}\text{C}$ D.E.=1.80	$\bar{x}=29.9^{\circ}\text{C}$ D.E.= 1.94	$\bar{x}=36.6^{\circ}\text{C}$ D.E.=2.95
T _{Max}	$\bar{x}= 19.5^{\circ}\text{C}$	$\bar{x}= 25.7^{\circ}\text{C}$	$\bar{x}= 33.1^{\circ}\text{C}$	$\bar{x}= 39.1^{\circ}\text{C}$
T _{Min}	14.4°C	20.0°C	26.5°C	32.9°C

Tabla 2. Las distintas variables relacionadas con la temperatura en la arena.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

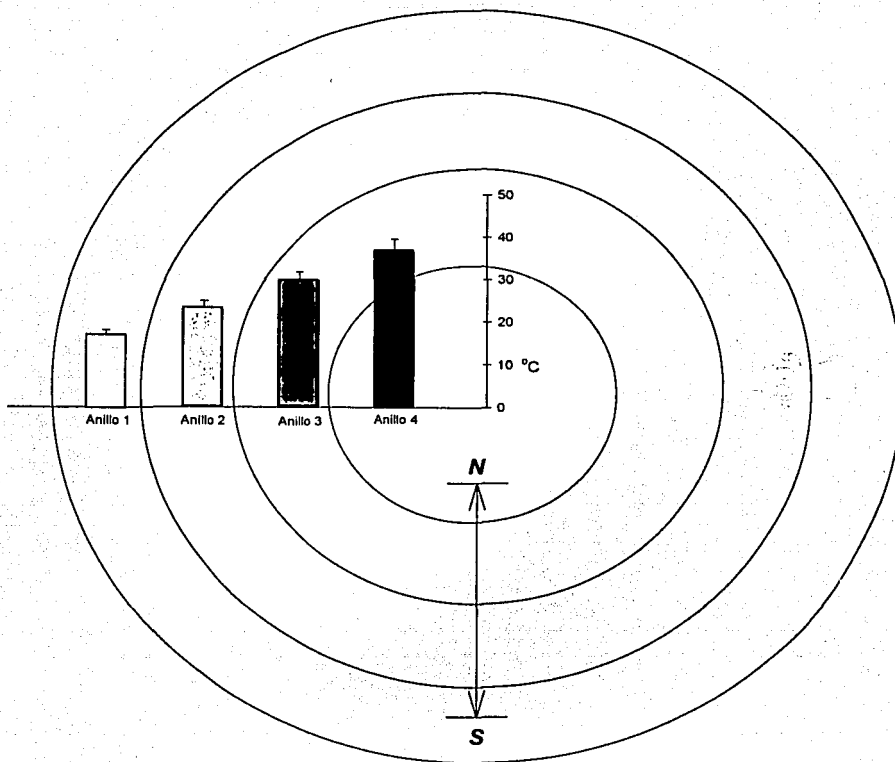


Fig. 3. - Los anillos concéntricos y la temperatura que corresponde a cada uno. Se señala el norte térmico representado por el anillo 4 y el sur térmico siendo el anillo 1.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2.5 Análisis de cruces

En el gradiente se colocó una escala cardinal indicando el norte térmico que equivale al centro del gradiente y el sur térmico que equivale a la periferia del gradiente. Con esta escala se realizó un nuevo análisis para conocer la distribución de los desplazamientos del conejo en función de la temperatura. Se analizaron las conductas de cada cría en conjunto con la división de anillos concéntricos. Una conducta puede modificar la temperatura de superficie registrada por el gazapo si este se desplaza entre los cuadros que dividen a los anillos. (Fig. 4). Los cruces se clasificaron en:

- 1) Cruces *northbound*: El conejo se desplaza de un anillo frío a uno caliente –acercándose al centro- lo que produce un aumento en la temperatura que el conejo registra sobre la superficie. El conejo se acerca hacia el norte térmico.
(p.e de la zona 3 a la zona 4).
- 2) Cruces *nobound*: Un desplazamiento sobre el mismo anillo, el conejo no registra una modificación en la temperatura ambiental. No se encuentra ni más cerca del sur o del norte térmico.
(p.e de la zona 2 a la zona 2).
- 3) Cruces *southbound*: El conejo se desplaza de un anillo caliente a uno frío -alejándose del centro- lo que produce un decremento en la temperatura que el conejo registra sobre la superficie. El conejo se aleja del norte térmico y se acerca al sur térmico.
(p.e de la zona 3 a la zona 2).

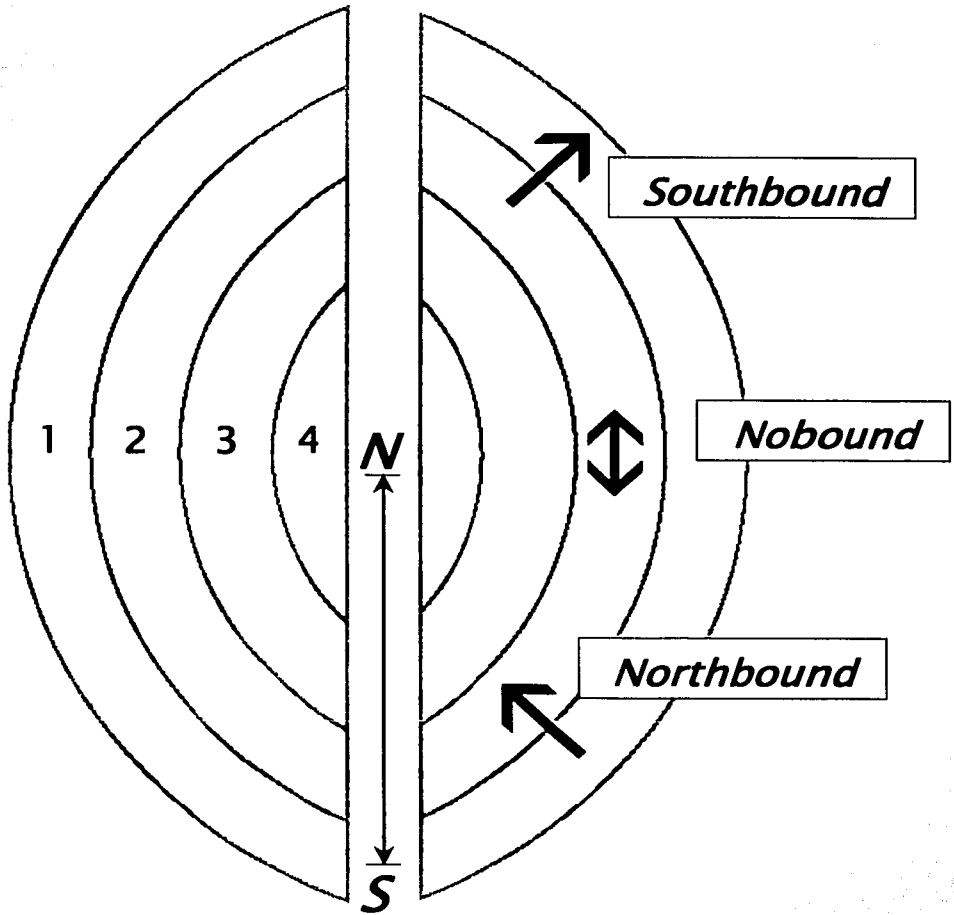


Fig. 4 - Los cruces de anillos que se pueden registrar durante un desplazamiento en relación con el norte y sur térmicos de la arena.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.3.6 Relación entre temperatura y conducta

Para encontrar la relación que mantiene la temperatura sobre la dirección de los desplazamientos de las crías se formuló una hipótesis en forma de ecuación. Se hipotetizó que el cambio térmico producido mediante un cruce (*north, south o nobound*) influencia la dirección del desplazamiento (*nose, side, tailbound*) que el gazapo produce inmediatamente después. Un cambio de temperatura se registra al inicio y termino de un desplazamiento. El cambio en temperatura modifica la dirección del siguiente desplazamiento, cambiando las probabilidades que tienen los distintos movimientos:

$$\text{(Probabilidad}_{\text{Conducta}(x)} \mid \text{Temperatura}_{\text{tiempo}} - \text{Temperatura}_{\text{tiempo-1}})$$

Ecuación 1. Una hipótesis sobre la relación entre la temperatura y la conducta.

5.3 Análisis estadístico

Para conocer la conducta inducida por el cambio en temperatura, obtuvimos la distribución porcentual de los desplazamientos que ocurren inmediatamente después de cada cruce. En la primera comparación estadística se compararon las distribuciones de los movimientos luego de un cruce hacia una misma dirección dentro de cada condición. Para esto se utilizó el análisis de varianza por rangos de Friedman. La prueba de Friedman, para comprobar si k variables relacionadas vienen de la misma población (Siegel 1998) se realizó con el fin de conocer si existían diferencias en la respuesta de los conejos a los distintos cruces en una misma dirección.

Luego se realizó una prueba de Mann-Whitney para comparar, entre las condiciones el porcentaje promediado de los cruces en la misma dirección. La prueba de Mann-Whitney compara las medianas entre muestras (Daniel 2000). Se utilizó una prueba de Mann-Whitney para comparar el porcentaje de cada conducta entre las condiciones *Grad InP vs. Ctrl InP* y *Grad InC vs. Ctrl InC*.

6 Resultados: Obtención del algoritmo

6.1 Cruces en la misma dirección

La siguiente gráfica (Graf. 1) representa las distribuciones porcentuales de los movimientos (*nosebound*, *sidebound*, *tailbound*) ejecutados luego de un cruce en dirección *northbound*, *nobound* y *southbound* para cada condición (*Grad InP*, *Grad InC*, *Ctrl InP*, *Ctrl InC*). Dentro de una misma condición, se compara si existen diferencias de distribuciones entre los cruces en una misma dirección.. Se pueden consultar los datos crudos que se utilizaron para producir esta gráfica en anexada al final de este trabajo (Apéndice 14.2).

Para los distintos cruces con dirección *northbound*, el análisis demostró que no existen diferencias entre las distribuciones para ninguna de las condiciones: *Grad InP* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.54$, $p=0.94$), *Grad InC* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.18$, $p=0.94$), *Ctrl InP* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.0$, $p=1$), *Ctrl InC* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=2.67$, $p=0.36$).

En los distintos cruces con dirección *nobound* no se obtuvieron diferencias entre las distribuciones para ninguna de las condiciones: *Grad InP* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.2$, $p=1$), *Grad InC* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.93$, $p=0.91$), *Ctrl InP* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.93$, $p=0.91$), *Ctrl InC* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.1.3$, $p=0.73$).

Al analizar los distintos cruces con dirección *southbound*, se encontró que no existen diferencias entre las distribuciones para ninguna de las condiciones: *Grad InP* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.66$, $p=0.94$), *Grad InC* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.66$, $p=0.94$), *Ctrl InP* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=0.67$, $p=0.94$), *Ctrl InC* (1-2 vs. 2-3 vs. 3-4) ($Fr=4.7$, $p=.19$).

6.1.2 Resumen

No se observa ninguna diferencia en la distribución porcentual de los desplazamientos para los cruces en una misma dirección dentro de una misma condición. Esto indica que la calidad de la información no varía dentro de la misma dirección o que los gazapos no modifican su conducta a causa de esta diferencia.

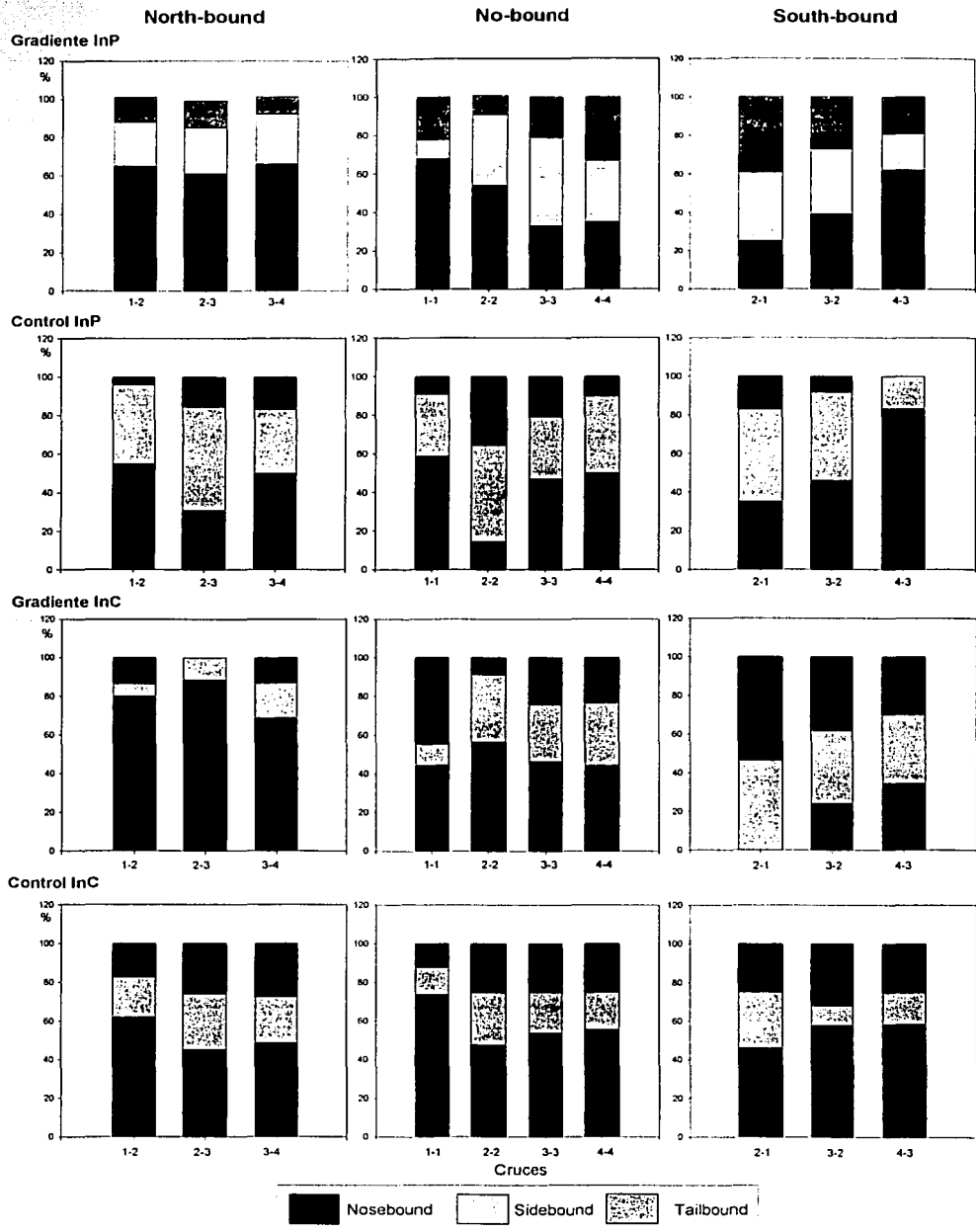


Grafico 1. Se muestra la distribución porcentual de los movimientos ejecutados por todos los gazapos luego de un cruce y los anillos cruzados para cada condición.

6.2 Reacción al gradiente térmico

Las gráficas (Graf. 2^a y 2^b) representan los promedios con desviación estándar de las distribuciones porcentuales de los movimientos de los gazapos de cada una de las condiciones. Se compararon los promedios de los porcentajes obtenidos para cada desplazamiento en las distintas direcciones entre las condiciones *Grad InP* vs. *Ctrl InP* así como para *Grad InC* vs. *Ctrl InC* utilizando la prueba de Mann-Whitney.

6.2.1 Gazapos *InP*

Dentro de los movimientos que ocurren luego de un cruce *northbound*, se encontró que la proporción de movimientos *nosebound* para conejos en la condición *Grad InP* fue significativamente mayor a la mostrada por los conejos de la condición *Ctrl* (*Grad* \bar{x} = 63.75, D.E.=2.25, *Ctrl* \bar{x} = 45.3, D.E.=12.8 *Mann-Whitney* $p=0.05$). Así mismo, los conejos en la condición *Grad InP* realizaron un porcentaje significativamente mayor de movimientos *sidebound* que aquellos en la condición *Ctrl InP* (*Grad* \bar{x} =24.51, D.E.=1.65, *Ctrl* \bar{x} = 42.7, D.E.=10.4 *Mann-Whitney* $p=0.05$). Sin embargo, no existió una diferencia significativa entre los movimientos *tailbound* de las condiciones *Grad InP* y *Ctrl InP* (*Grad* \bar{x} =11.94, D.E.=2.95, *Ctrl* \bar{x} =11.97, D.E.=7 *Mann-Whitney* $p=0.2$).

Evaluando las diferencias entre los porcentajes ocurridos luego de un cruce *nobound*, podemos observar que no existió ninguna diferencia significativa entre las condiciones *Grad InP* y *Ctrl InP* ya sea para *nosebound* (*Grad* \bar{x} =47.46, D.E.=16.7, *Ctrl* \bar{x} = 42.6, D.E.=19.4 *Mann-Whitney* $p=0.342$) o para *sidebound* (*Grad* \bar{x} =31.22, D.E.=15.12, *Ctrl* \bar{x} = 21.70, D.E.=6.42 *Mann-Whitney* $p=0.56$) e incluso *tailbound* (*Grad* \bar{x} =21.32, D.E.=9.45, *Ctrl* \bar{x} = 18.8, D.E.=12.31 *Mann-Whitney* $p=0.1714$).

Al revisar los porcentajes ocurridos luego de un cruce *southbound*, vemos que no existió ninguna diferencia significativa entre las condiciones *Grad InP* y *Ctrl InP* para *nosebound* (*Grad* \bar{x} = 41.97, D.E.=18.9, *Ctrl* \bar{x} = 54.8, D.E.=25.3 *Mann-Whitney* $p=0.35$) o para *sidebound* (*Grad* \bar{x} =29.56, D.E.=9.29, *Ctrl* \bar{x} =36.9 D.E.=17.5 *Mann-Whitney* $p=0.35$). El caso es distinto para los movimientos *tailbound*, cuyo porcentaje es mayor para los conejos *Grad InP* que para los conejos *Ctrl InP* (*Grad* \bar{x} =28.5, D.E.=10.26, *Ctrl* \bar{x} = 8.33, D.E.=8.44 *Mann-Whitney* $p=0.05$).

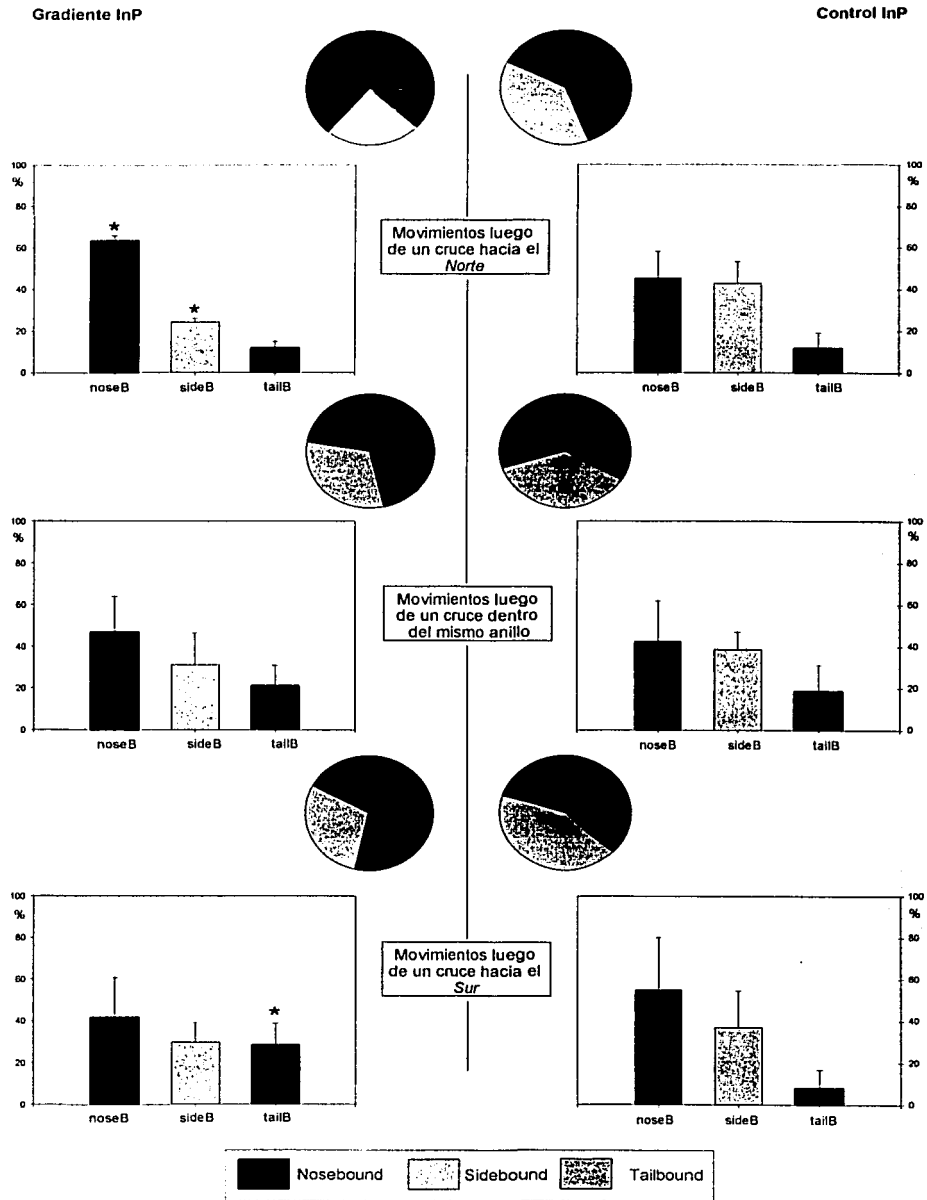


Gráfico 2ª. Se muestran los promedios y las desviaciones estándar para las distribuciones porcentuales de los movimientos ocurridos luego de un cruce sobre el gradiente para las condiciones iniciadas en la periferia de la arena.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

6.2.2 Gazapos InC

Dentro de los movimientos ocurridos luego de un cruce *northbound*, se encontró que la proporción de movimientos *nosebound* para conejos en la condición *Grad InC* fue significativamente mayor a la mostrada por los conejos de la condición *Ctrl InC* (*Grad* $\bar{x}=79.1$, D.E.=9.85, *Ctrl* $\bar{x}=51.91$, D.E.=8.96 *Mann-Whitney* $p=0.05$). Así mismo, los conejos en la condición *Grad InC* realizaron un porcentaje significativamente menor de movimientos *sidebound* que aquellos en la condición *Ctrl InC* (*Grad* $\bar{x}=12.13$, D.E.=5.8, *Ctrl* $\bar{x}=24.65$, D.E.=4.19 *Mann-Whitney* $p=0.05$). También el porcentaje de movimientos *tailbound* de la condición *Grad InP* es significativamente menor al porcentaje de los conejos en la condición *Ctrl InP* (*Grad* $\bar{x}=11.9$, D.E.=2.95, *Ctrl* $\bar{x}=23.4$, D.E.=5.42 *Mann-Whitney* $p=0.05$).

Evaluando las diferencias entre los porcentajes ocurridos luego de un cruce *nobound*, podemos observar que no existió ninguna diferencia significativa entre las condiciones *Grad InP* y *Ctrl InP* ya sea para *nosebound* (*Grad* $\bar{x}=47.87$, D.E.=5.8, *Ctrl* $\bar{x}=57.74$, D.E.=11.18 *Mann-Whitney* $p=0.44$) o para *sidebound* (*Grad* $\bar{x}=27$, D.E.=10.82, *Ctrl* $\bar{x}=20.56$, D.E.=5.37 *Mann-Whitney* $p=0.24$) e incluso *tailbound* (*Grad* $\bar{x}=25.12$, D.E.=14.7, *Ctrl* $\bar{x}=18.7$, D.E.=21.7 *Mann-Whitney* $p=0.24$).

Al revisar los porcentajes ocurridos luego de un cruce *southbound*, vemos que el porcentaje de conductas *nosebound* fue significativamente menor para *Grad InP* (*Grad* $\bar{x}=19.57$, D.E.=17.7, *Ctrl* $\bar{x}=54$, D.E.=7 *Mann-Whitney* $p=0.05$) y los porcentajes son mayores para los conejos *Grad InC* en los movimientos *sidebound* (*Grad* $\bar{x}=40.1$, D.E.=5.8, *Ctrl* $\bar{x}=18.9$, D.E.=9.7 *Mann-Whitney* $p=0.05$) y *tailbound* (*Grad* $\bar{x}=40.3$, D.E.=12, *Ctrl* $\bar{x}=27$, D.E.=3.9 *Mann-Whitney* $p=0.05$).

6.2.3 Resumen

Se puede distinguir un efecto de la temperatura sobre las distribuciones porcentuales en los gazapos *Grad* con respecto a los *Ctrl*. Primero, una preferencia por las conductas *nosebound* luego de un cruce *northbound*, así como un aumento en la conducta *tailbound* luego de un cruce *southbound*. También se nota que no existieron diferencias luego de un cruce *nobound*.

FALTA
PAGINA

41

7 Discusión: Obtención del algoritmo

Trabajando con la base de datos se obtuvo un algoritmo para describir la relación entre la temperatura y la conducta del conejo. La división del gradiente en anillos concéntricos permitió el aprovechamiento de la información sobre la distribución de las temperaturas. La forma en la que las trayectorias se encontraban registradas resultó conveniente pues permitió seguir el movimiento del conejo utilizando su eje corporal. El análisis de los movimientos por cruce trajo nuevas ideas sobre cómo la toma de decisiones lleva al conejo a producir una orientación basada en los cambios térmicos registrados. Con este análisis se obtuvo un algoritmo que describe hipotéticamente la relación entre temperatura y conducta.

Las limitaciones sobre la modificación del trabajo conductual que se obtienen forzosamente al revisar una base de datos estuvieron presentes también en este estudio. La definición espacial que se consiguió para la trayectoria de los conejos y para la distribución de las temperaturas en el gradiente se encontraban previamente establecida por el uso de la gradilla de medición. El análisis utilizando la gradilla trajo complicaciones matemáticas. Primero, el área de cada anillo no es igual, por lo que existe una relación particular de probabilidad en relación al área. Segundo, dentro de los posibles movimientos del gazapo, los *sidebound*, tienen menos probabilidad por tener representación en solo dos cuadros, mientras que los *nosebound* o *tailbound* pueden ocurrir cuando el conejo entra en cualquiera de tres. Tercero, existe un sesgo cuando un movimiento se ejecuta saliendo de cualquiera de anillos extremos, en la orilla o en el centro; de la orilla solo pueden salir movimientos hacia el centro y del centro únicamente pueden salir hacia la periferia. Sin embargo, estas complicaciones estaban presentes en todas las condiciones. Además, a pesar de estas complicaciones la existencia de una orientación persistió.

Otras complicaciones presentes son las suposiciones conductuales. En las trayectorias del conejo, no todas las conductas se realizaron con la misma coordinación. Según Pacheco-Cobos existen desplazamientos en los que el conejo gira panza arriba y cambia su posición (Pacheco-Cobos 2003^a). Estos tropiezos no reflejan un proceso de orientación, sino que resultan de errores de coordinación motora. El análisis no puede distinguir los errores por coordinación en los gazapos, pero cómo estos son muy esporádicos, fueron incluidos como parte de la trayectoria.

La trayectoria del conejo fue registrada utilizando la posición del hocico, lo que nos lleva a suponer que en la cabeza se halla el principal receptor de información térmica. Aunque la cabeza es una región sensorial importante para los conejos recién nacidos, no existe evidencia alguna de que se encuentre también una agregación espacial de receptores térmicos. Sin embargo, debido a la gran importancia que el hocico tiene en la recepción de la información relevante para su alimentación: olfatoria, táctil y térmica. Una de las funciones que puede tener la orientación por medio de gradientes de temperatura es encontrar el alimento. Los gazapos pueden guiarse, entre otras claves, por el gradiente térmico alrededor de los pezones de la madre, para encontrarlos y poder succionar leche (Hudson & Distel 1982, 1983). Por esta y otras razones podríamos creer que en la cabeza existen al menos algunos receptores sensibles a temperatura. Esto no descarta que los sensores térmicos se hallen distribuidos por el resto del cuerpo del gazapo. Por ejemplo, en los primeros días de vida, el vientre del gazapo se encuentra libre de pelo y en contacto directo con el sustrato, lo que resulta en una buena posición para registrar temperatura de superficie. Otra posibilidad no evaluada es que el conejo pueda, ante la información proveniente de sensores en lugares distintos del cuerpo, sentir una diferencia y utilizarla para orientarse.

La decisión de la inclusión de trayectorias fue un intento de reducir los estímulos táctiles que contiene la prueba. En las condiciones *Grad*, esto fue posible pues debido al frío los gazapos se mantuvieron la mayoría del tiempo alejados de la pared. Mientras que en las condiciones *Ctrl* los gazapos, al hallar la pared permanecían en contacto con la pared durante una gran parte de la prueba.

Utilizando la trayectoria de los gazapos, no se puede distinguir los momentos en los que el conejo estuvo pegado a la pared. Esto podría sugerir una orientación por la pared por parte de los conejos *Ctrl* y que la diferencia en la distribución de movimientos sea explicada como la imposibilidad para los conejos *Grad* de hallar la pared. Sin embargo, los datos sugieren una orientación hacia el estímulo térmico en los conejos *Grad* y una falta de orientación en los conejos *Ctrl*. Los conejos *Ctrl* se desplazan básicamente como caminantes aleatorios u agentes en la que la probabilidad de moverse hacia cualquiera de sus lados es la misma (Weisstein, 2003)

El estímulo térmico produce un cambio en la dirección del eje corporal en la dirección del gradiente, una verdadera *taxia* según se halla definida por Frankel & Gunn (Fraenkel & Gunn 1961). La diferencia en la calidad del estímulo es relevante: mientras que la temperatura en la arena provee un gradiente al cual orientarse, la pared sólo puede

estar presente o ausente, produciendo un contacto positivo pero una orientación del eje corporal nula.

Debido al poco conocimiento que se tiene sobre las estructuras neuronales que regulan la orientación térmica en el conejo neonato, ni el análisis, ni la construcción del algoritmo contienen un substrato neuronal. Nuestro algoritmo obtenido difiere otros, como los mencionados en los ejemplos en la introducción, en que realizaron hipótesis sobre los modos de toma de decisión solamente con base en observaciones conductuales. Los algoritmos construidos para conductas de otros animales están construidos con una extensa base neurofisiológica de modelos muy utilizados. Para ello es necesario comprender mucho mejor el circuito neuronal que una sensación y respuesta motora. Sin embargo, el intento de realizar un algoritmo puramente conductual puede plantear colusiones propias y adecuadas al modelo biológico.

A pesar de las limitaciones del análisis, los datos contienen sugerencias sobre la capacidad de orientación de los conejos. La primera instancia que llama la atención es que no se encuentran diferencias entre las distribuciones conductuales para los cruces con la misma dirección dentro de cada una condición. Sin embargo, encontramos diferencias al comparar los promedios de las distribuciones conductuales entre condiciones *Grad InP* vs. *Ctrl InP* y *Grad InC* vs. *Ctrl InC*. En conjunto estos datos sugieren la forma de los estímulos relevantes y la orientación que el conejo produce respecto a éstos. También nos sugiere información general sobre la conducta del conejo y sobre las prioridades fisiológicas que tiene la orientación térmica.

En el análisis de las distribuciones conductuales se encuentran algunas diferencias interesantes. La conducta *nosebound* resulta más frecuente luego de un cruce hacia el norte térmico. En ésta el eje corporal se halla alineado con la dirección del gradiente. Esta conducta está también representada en los demás tipos de cruces, pues resulta energéticamente más económica. En general, organismos con cabeza tienden a mostrar preferencia por desplazarse en la dirección en que la mayoría de sus órganos sensoriales se encuentran. Los movimientos *tailbound*, son más frecuentes luego de un cruce hacia el sur, cuando huyendo del sur, el eje corporal se halla en contra del gradiente. Los desplazamientos *sidebound* son un desplazamiento cuya intención es difícil de interpretar. Sin embargo, puede no resultar provechoso encontrar un significado a cualquier diferencia, ya que por ser porcentajes, las diferencias están asociadas, al modificarse una también se modifican las demás.

El algoritmo desarrollado contiene una hipótesis sobre la relación sensorimotora que describen las trayectorias de los conejos sobre un gradiente. Se entiende que debido a que se definieron sólo tres tipos distintos de cruces (cruces hacia el norte térmico, hacia el sur térmico y cruces dentro del mismo anillo) solamente existen tres tipos de información disponible: cambios de temperatura positivos, negativos y nulos. Cada diferencia de temperatura produce un cambio en la distribución conductual luego de ser registrada. La distribución porcentual que ocurre luego de un cierto cambio puede ser representada como el conjunto de probabilidades que tiene cada conducta de ocurrir. Esto es, luego de un cambio dado, digamos hacia el norte, la probabilidad de que ocurra una conducta *nosebound* es mayor a que una *sidebound* o una *tailbound*.

A pesar de comprobar una orientación en los conejos, existen dudas sobre si esta orientación realmente consiste en una verdadera *taxia*. En una termotaxia verdadera, los gazapos orientan sus sentidos en relación al estímulo. Podemos observar que los gazapos tienden a mantener su eje corporal apuntando en dirección al norte térmico, avanzando a favor del gradiente. Al observar las trayectorias y su alta variabilidad podemos preguntarnos por qué no son más determinísticas, así como por qué observamos que existe un alto grado de conductas que van en contra del gradiente. Aunque la conducta parece tener cierto grado de azar en su ejecución, existe la pregunta sobre si las probabilidades observadas son suficientes para que el gazapo logre permanecer en el centro del gradiente. Según Hayes (Hayes 2001) el azar es un recurso vital, que permite a los sistemas manejarse en un mundo adverso.

Derivando de la información que se obtuvo a partir de la base de datos, se realizó un algoritmo para describir la conducta de los conejos recién nacidos (Fig. 5). El algoritmo incluye las probabilidades individuales de las conductas bajo una regla de decisión basada en el cambio absoluto en el valor registrado. El algoritmo toma únicamente la dirección del cruce, a partir del valor del cambio de temperatura que se registra en un cruce. El cruce modifica la distribución de probabilidades con las que se ejecutará el siguiente desplazamiento. Utilizando la metodología biorrobótica podemos comprobar si la ejecución del algoritmo es condición suficiente para conseguir una apropiada orientación hacia el calor. En la siguiente sección de este estudio se continúa con la construcción de un robot para representar una hipótesis sobre la coordinación sensorimotora que producen en los gazapos así como generar más hipótesis sobre los determinantes sensorimotores relevantes para la orientación térmica.

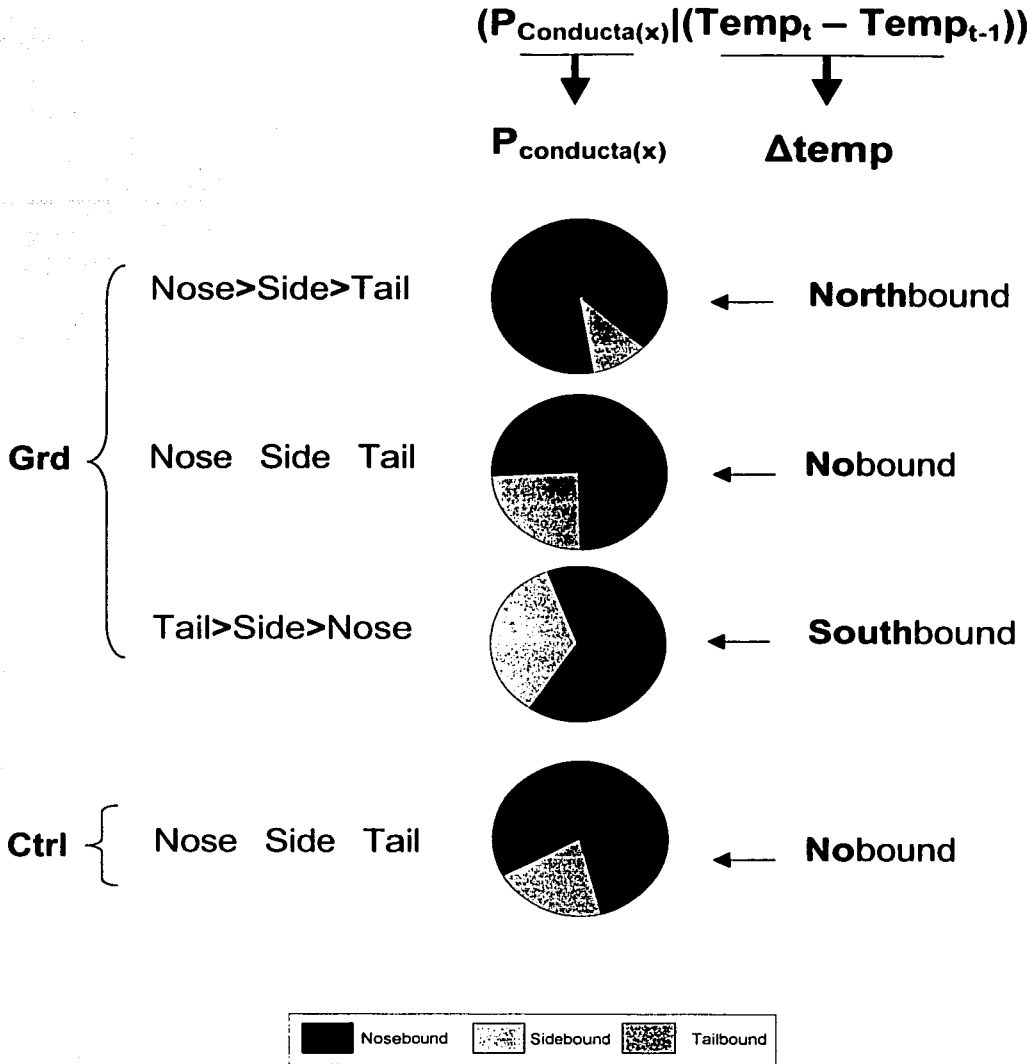


Fig. 5 - El algoritmo resultante del análisis de los datos conductuales: luego de un cruce se produce un cambio de temperatura que determina la probabilidad que tienen las distintas conductas de ocurrir.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Parte 2: Prueba del algoritmo

8 Metodología: Prueba del algoritmo

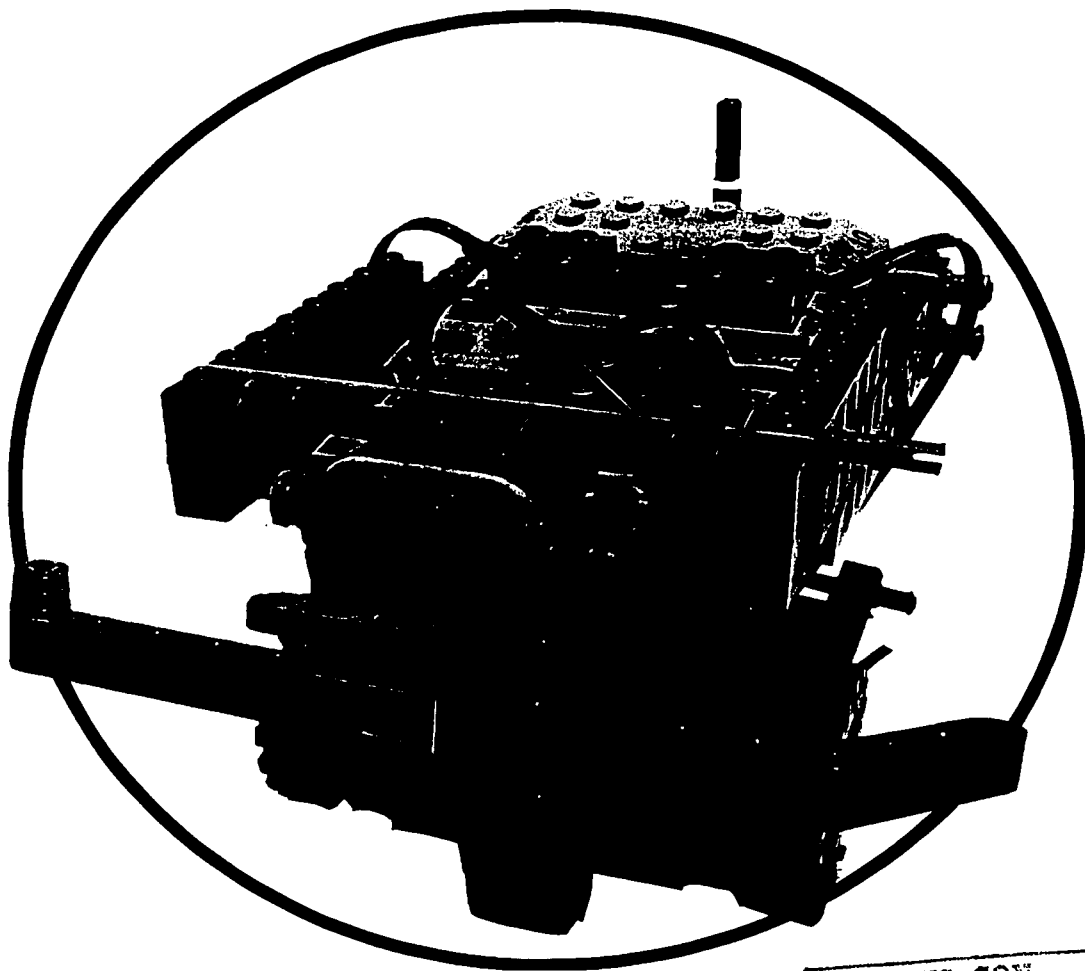
8.1 Materiales

8.1.1 Lenguaje de programación

La escritura del programa que contiene el algoritmo se realizó en lenguaje de programación Not Quite C (NQC) 2.5 (Baum 2000). Este lenguaje tiene una sintaxis basada en el lenguaje C y fue especialmente diseñado para programar robots de LEGO® Mindstorms[™]. Los códigos fueron escritos usando el Brick Command Center 3.3 (Binder 2003) una interfase en la que se puede programar, revisar los valores de las variables, descargar el sistema operativo del robot (LEGO® 2003) y otras funciones. Con el Brick Command Center se pueden transferir los programas al robot a través de un dispositivo infrarrojo.

8.1.2 Sistema robot

El sistema para probar el algoritmo fue un robot construido con el dispositivo de LEGO® MindStorms[™] Robotics Invention System[™] 1.5 (Fig. 6). Este robot puede procesar la entrada y salida de información de varios sensores de manera independiente. El ensamblado con bloques y otros componente LEGO® le otorgan una gran versatilidad a la forma y función de este robot. Tanto la programación como el armado de un robot de este tipo puede no requerir de gran experiencia, pues el sistema fue diseñado para educar infantes de 12 años (Klassner 2003). Existe amplia bibliografía acerca de cómo explorar el potencial completo de estos robots (Knudsen 1999, Baum 2000). El robot cuenta con dos motores de velocidad variable, un sensor que percibe diferencias en intensidad de luz, un sensor que reacciona al contacto físico y una computadora miniatura (RCX) capaz de procesar el programa, coordinando la interacción entre sensores y motores. Una pantalla de cristal líquido permite observar los estados de los motores o sensores, el programa en ejecución, los contadores de tiempo, etc. El robot cuenta también con un *data log* capaz de registrar valores de las variables utilizadas por el programa, mostradas más adelante. Detalles específicos sobre la forma y dimensiones del robot pueden consultarse anexadas al final del trabajo (*Apéndice 14.3*).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 6 - Robot genérico LEGO® en tamaño real, utilizado para simular la conducta de los gazapos. Pueden verse los motores y el sensor en la parte frontal.

8.1.3 Arenas de prueba

El robot cuenta con un sensor que registra distintas intensidades de luz reflejadas en superficie. Estos valores se modifican cuando se expone el sensor a superficies de distintos colores. Modificando sistemáticamente las variables de luminosidad, brillo y saturación, se encontraron los valores que cada color presenta al registro del sensor (Tabla 3). Esta información fue utilizada para construir las arenas de prueba; cada uno de los anillos tiene un color distinto, seleccionados con base en las diferencias que el sensor registra sobre el color. Las mediciones tomadas por el sensor tienen un error de ± 5 unidades. La escala que utiliza el robot está compuesta de unidades arbitrarias.

	Luminosidad	Brillo	Saturación	Lectura del Sensor
Azul	241°	80%	52%	750 \pm 5
Rojo	1°	85%	46%	733 \pm 5
Amarillo	60°	85%	73%	715 \pm 5
Blanco	40°	95%	1.24%	691 \pm 5

Tabla 3. Las características de los colores que componen cada uno de los anillos en el gradiente simulado y el valor que registra el sensor cuando se coloca sobre ellas.

La arena fue dibujada en Adobe Illustrator® 7.0. Posteriormente se realizaron impresiones en *plotter*, sobre papel *bond recubierto mate* de 75 grs. Cada arena mide 90 cm de diámetro. Esta medida se debe a que el robot mide aproximadamente 30% mas que un gazapo, por lo que la arena está en escala 1:1.3 correspondiente a la arena donde se probaron los conejos.

El gradiente de colores pretende simular el gradiente térmico de los conejos. A pesar de existir sensores térmicos para el robot, estos sensores no son capaces de registrar diferencias precisas con suficiente rapidez. La elección de un gradiente de luz trae como ventaja un registro del sensor inmediato y preciso, mas similar a lo que ocurre con los sensores térmicos de los mamíferos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El gradiente (Fig. 7) cuenta con cuatro anillos concéntricos, con colores cuyos valores incrementan de la periferia al centro. Una pared de cartón corrugado fue colocada sobre el anillo negro alrededor de la arena para evitar que el robot saliera de ésta.

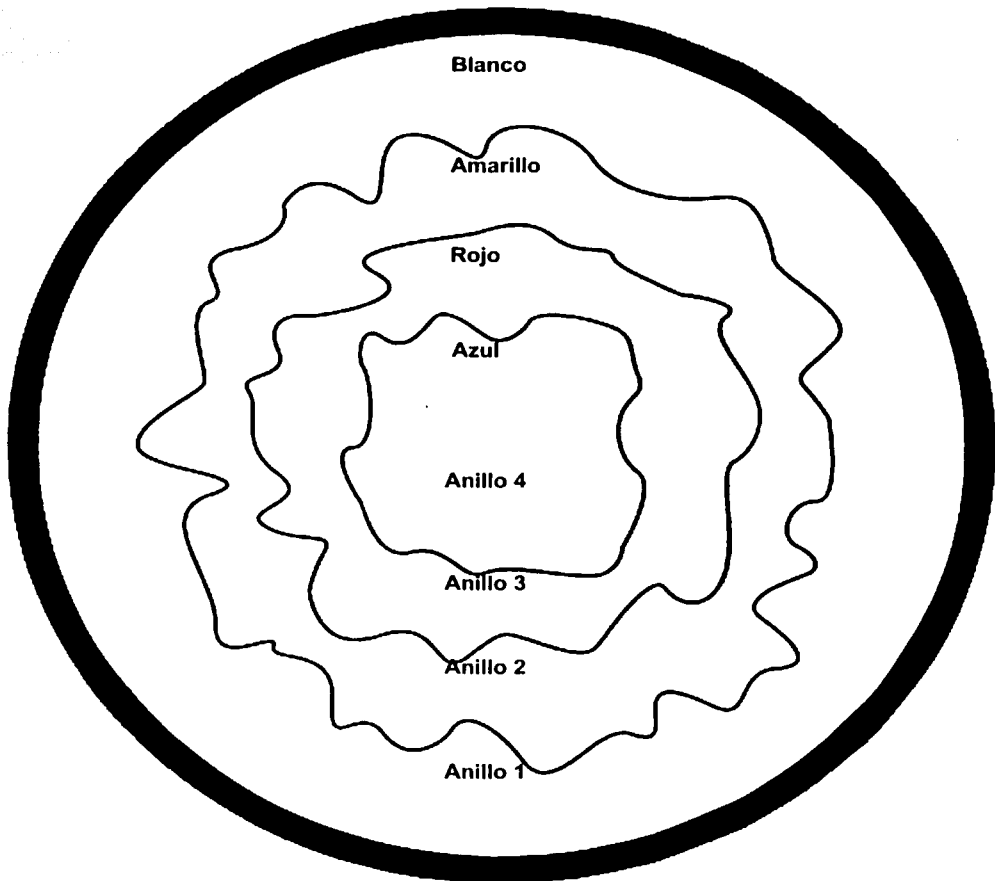


Fig. 7 - El gradiente concéntrico, de 90 cm de diámetro. Consta de 4 anillos concéntricos, cuyos valores incrementan en cada anillo, del centro a la periferia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8.2 Procedimiento

8.2.1 Programación del algoritmo

8.2.1.1 El programa *Termotaxia*

Este programa pone al algoritmo obtenido a partir de conejos *Grad* en una lógica computacional que el robot puede seguir. El algoritmo se programó en una estructura de cinco tareas que se ejecutan simultáneamente. Cada tarea es mutuamente excluyente, por lo que las distintas tareas se regulan mediante *semáforos*. Cuando una tarea se activa, las demás entran en un periodo de espera, cuando ésta termina todas son simultáneamente activadas. Tras un periodo de decisión, una se enciende y las demás continúan en espera. Cuando la tarea ejecutada termina, el ciclo comienza de nuevo (Fig. 8).

- 1) La tarea *Principal*: Esta tarea se encarga de configurar los motores, los sensores, inicializar las variables y los relojes internos del robot. También fija la capacidad del recolector de datos del robot o *datalog*. Esta tarea inicia la ejecución del resto de las tareas.
- 2) La tarea *Actualizar*: Esta tarea inicia un ciclo que, cada vez que termina una conducta vuelve a iniciar. Las medidas tomadas por el sensor se actualizan, se resta la medición de intensidad de luz previa a la conducta con la intensidad de luz tomada en ese momento, para obtener el cambio en la intensidad registrada. Produce un valor aleatorio y se le asigna a una variable. Una instrucción extra debió programarse, debido a la incapacidad del procesador del robot de producir nuevos valores aleatorios en cada prueba. La *semilla*, el número a partir del cual el procesador obtiene los valores al azar debe cambiarse manualmente antes de cada prueba. Otra función de esta tarea es asignar el valor de las variables: conducta ejecutada, tiempo y intensidad de luz y variable aleatoria al *datalog*.
- 3) Las tareas *Más Frío*, *Más Caliente* o *Sin Cambio*. Una vez que el robot detecta una diferencia con el primer movimiento, una de estas tareas tendrá acceso a los motores y podrá producir una conducta. Utilizando

el delta obtenido en *Actualizar*, una de las tareas se activará; si el delta es 0, se activara la tarea *Sin Cambio*, si el delta es mayor a 0 se activara la tarea *Más Caliente* y si el delta es menor a 0 se activara la tarea *Más Frío*. Una vez escogida una de las tareas se toma el valor aleatorio generado en *Actualizar* y en función de las probabilidades que cada conducta tiene de ocurrir, este valor determinará qué conducta será realizada. Una vez realizada la conducta, el semáforo detiene la ejecución de cualquiera de estas tareas y vuelve a la tarea de *Actualizar*.

- 4) La tarea *Evitar la Pared*. Esta tarea provee una respuesta en el caso de que el robot se pusiera en contacto con la pared de la arena. Esta tarea trabaja con un sensor de tacto, que detecta la pared y activa una conducta de giro de 90° . Esta tarea desplaza cualquier otra conducta que se esté realizando en ese momento. El programa completo se puede consultar anexo al final del trabajo. (*Apéndice 14.4*)

8.2.1.2 El programa *Control*

Este programa es prácticamente idéntico al programa de termotaxia. La única diferencia es en la tarea "Actualizar" no produce deltas, el delta en este programa es permanentemente igual a 0. Por lo tanto, no existen las tareas "Más Frío" o "Más Caliente", solo existe "Sin Cambio". También, las probabilidades de ocurrir que tiene cada conducta, están programadas a partir de los conejos *Ctrl*, no de los conejos *Grad*. Este programa, registra un *datalog* con las mismas variables que el programa "Termotaxia" para conocer el recorrido del robot. La siguiente figura (Fig. 8) muestra la lógica del programa.

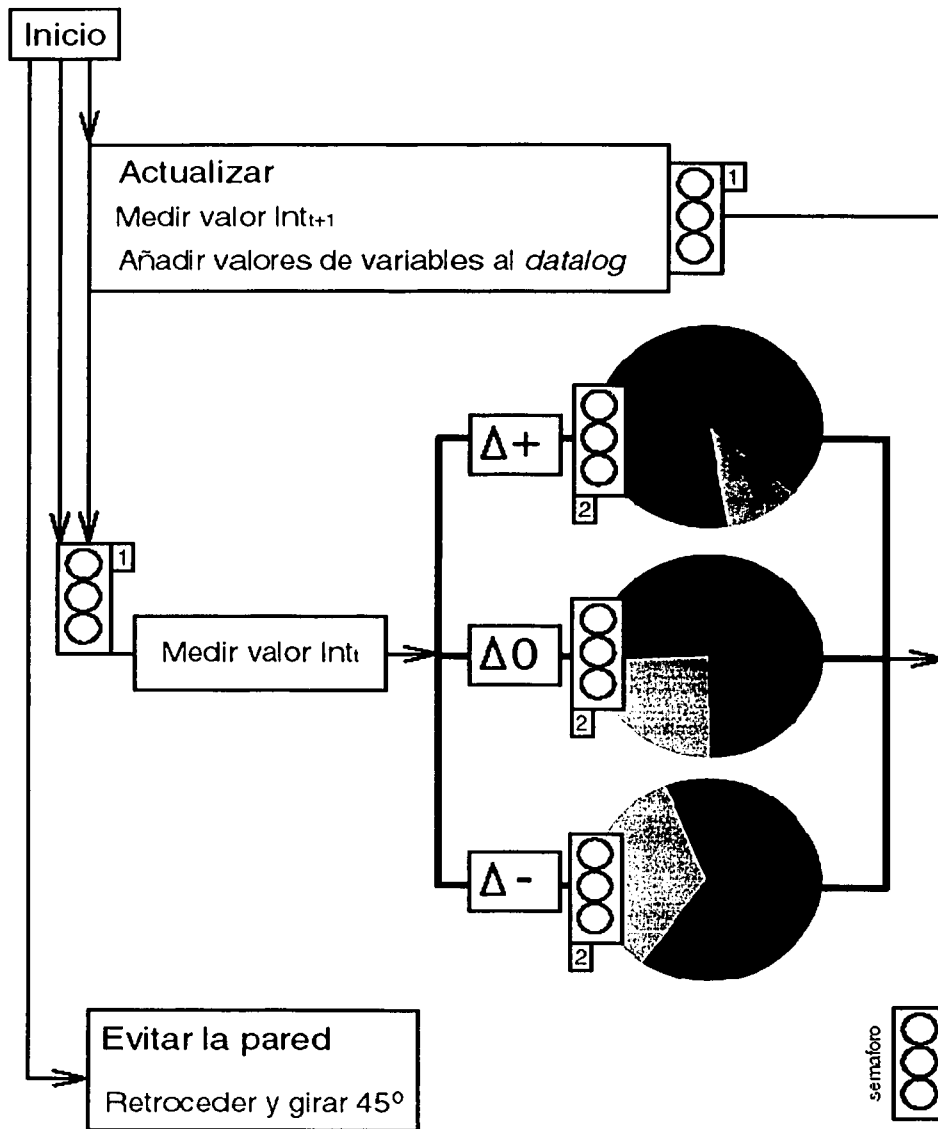


Fig. 8 - Flujo de información y regulación entre las distintas tareas en el programa *Termotaxia*. En el programa *Control* no existen las opciones "Delta -" (cambio southbound) o "Delta +" (cambio northbound)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8.2.2 Prueba del algoritmo

Para probar el algoritmo utilizando un robot se desarrolló el siguiente protocolo. Primero, se colocaron la arena y un segundero bajo una filmadora. El programa se transfirió al robot desde una computadora utilizando la interfase del Brick Command Center y un dispositivo infrarrojo. El robot se colocó sobre la arena alternando en cada prueba la orientación de su eje principal. El punto donde el robot inició la prueba cambio según las distintas condiciones de prueba: en el centro y en la periferia. Sobre el gradiente concéntrico al comenzar sobre la periferia, se colocó el robot sobre la superficie color blanco y al comenzar sobre el centro se comienza sobre la superficie azul. El robot se probó individualmente en ocho ocasiones para cada condición (Tabla 4).

	Inicio Periferia (<i>InP</i>)	Inicio Centro (<i>InC</i>)	Programa
Control (<i>Ctrl</i>)	<i>Ctrl InP</i> (n=8)	<i>Ctrl InC</i> (n=8)	<i>Control</i>
Gradiente (<i>Grad</i>)	<i>Grad InP</i> (n=8)	<i>Grad InC</i> (n=8)	<i>Termotaxia</i>

Tabla 4. Las distintas condiciones en las que están clasificados las pruebas del robot realizadas en el estudio.

8.2.3 Obtención y registro de datos

Al vaciar el *datalog* en la computadora, se obtuvo una base de datos con el recorrido del robot. El valor de intensidad de luz, la conducta ejecutada y el tiempo fueron obtenidas y almacenadas. Además, se obtuvieron videos de la conducta para observar la trayectoria y documentar las pruebas conductuales.

8.3 Estadística

Para analizar el desempeño obtenido por el robot se graficaron los datos de las trayectorias. Para poder comparar el desempeño de los conejos, las trayectorias de los gazapos se graficaron de la misma manera. Las graficas construidas (Fig. 9) indican el anillo o los anillos que el sujeto se encuentra cruzando en cada unidad de tiempo. Se realizó una gráfica para cada una de las pruebas del robot y una para cada gazapo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se obtuvo un grupo de parámetros a partir de las trayectorias. Primero, la *latencia* o tiempo que le toma a un sujeto llegar al centro para aquellas condiciones que iniciaron en la periferia o ala orilla para aquellas condiciones iniciaron en el centro. También se obtuvieron el número de *ascensos* u ocasiones en las que el sujeto ingresa a un anillo desde un anillo mas periférico. Así mismo, el número de *descensos* indica el número de veces que el sujeto llega a un anillo desde un anillo mas céntrico. Se cuantificó la duración total de los distintos ascensos y descensos. Por último se obtuvo el *área bajo la curva* (ABC) como un grueso estimado del desempeño en la orientación del sujeto. Por ejemplo un sujeto que muestra un ABC alto, llegó en más ocasiones y pasó más tiempo en los anillos centrales, lo que equivale a una buena orientación.

Los parámetros se compararon entre las condiciones (*Grad vs. Ctrl*) con el mismo punto de inicio. Se utilizó la prueba de Mann-Whitney para evaluar si existían diferencias significativas entre las grupos experimentales. Para el número de picos se realizó una prueba de Wilcoxon y una prueba *post hoc* de Dunn (Siegel 1998) para encontrar diferencias entre columnas. Cada uno de los parámetros se graficó por separado. Para la latencia y el ABC se utilizaron diagramas de *caja y bigotes*. Estos muestran mejor la distribución de los datos: la línea que divide la *caja* equivale a la mediana, los limites de la caja equivalen a los rangos cuartiles correspondientes a el 75% y 25% de la distribución y por último los *bigotes* equivalen en los datos en el 90% y 10% de la distribución.

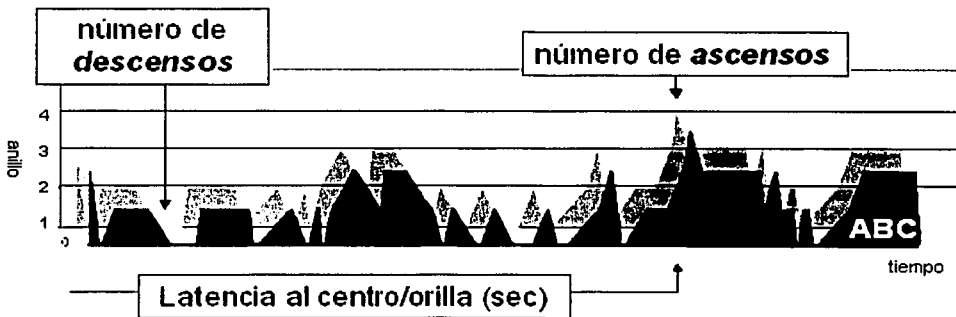


Fig. 9 - Muestra los parámetros derivados de las gráficas de trayectorias

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9 Resultados: Prueba del algoritmo

9.1 Sobre las trayectorias de los conejos

La gráfica (Graf. 3^a) muestra la trayectoria de 2 conejos de cada condición (*Grad InC*, *Grad InP*, *Ctrl InP* y *Ctrl InC*). Las trayectorias fueron elegidas para mostrar el desempeño de los conejos expuestos a distintas condiciones. El criterio en la elección de las gráficas fue mostrar los extremos de la individualidad expresada por los gazapos y la variación en las trayectorias. De estas trayectorias se obtuvo la *latencia* de arribo al anillo central para las condiciones *InP* y al anillo más externo en las condición *InC*. También se calculó el *área bajo la curva* así como la *duración* y *número de ascensos* y *descensos* para cada gazapo. Los parámetros obtenidos a partir de estas formas de graficar las trayectorias se utilizaron para comparar el desempeño de los gazapos de las distintas condiciones.

La gráfica (Graf. 3^b) muestran la trayectoria de 2 pruebas del robot en cada condición (*Grad InC*, *Grad InP*, *Ctrl InP* y *Ctrl InC*). Se muestran las trayectorias elegidas para poder comparar visualmente el desempeño del robot sobre en las distintas condiciones. Las gráficas fueron elegidas para mostrar que la alta variabilidad del programa que es expresada durante las pruebas con el robot. De estas trayectorias en las gráficas de área se obtuvo la *latencia* de arribo al anillo central para las condiciones *InP* y al anillo más externo en las condición *InC*. También se calculó el *área bajo la curva* así como la *duración* y *número de ascensos* y *descensos* para cada prueba. Los parámetros obtenidos a partir de estas formas de graficar las trayectorias se utilizaron para comparar la orientación del robot en las distintas condiciones.

Se pueden consultar todas las trayectorias individuales para los gazapos y el robot al final de este trabajo (*Apéndice 14.5^a* y *Apéndice 14.5^b*).

Conejos - Trayectorias por condición

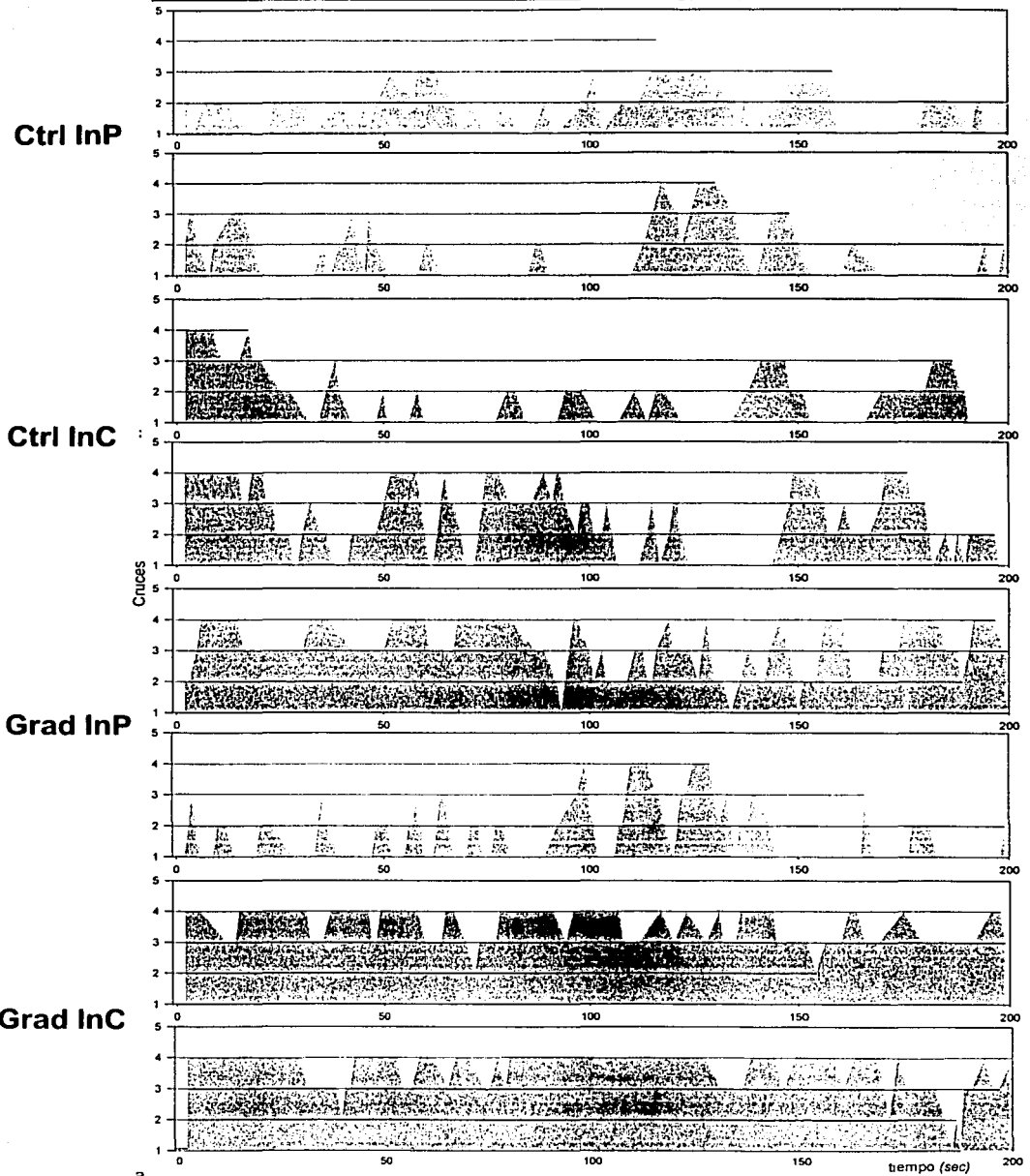


Gráfico 3^a Se grafican dos trayectorias por condición. Cada gráfica muestra la posición de un gazafo sobre el gradiente en el tiempo, utilizando el criterio de anillos.

TESIS C
FALLA DE C

Robot - Trayectorias por condición

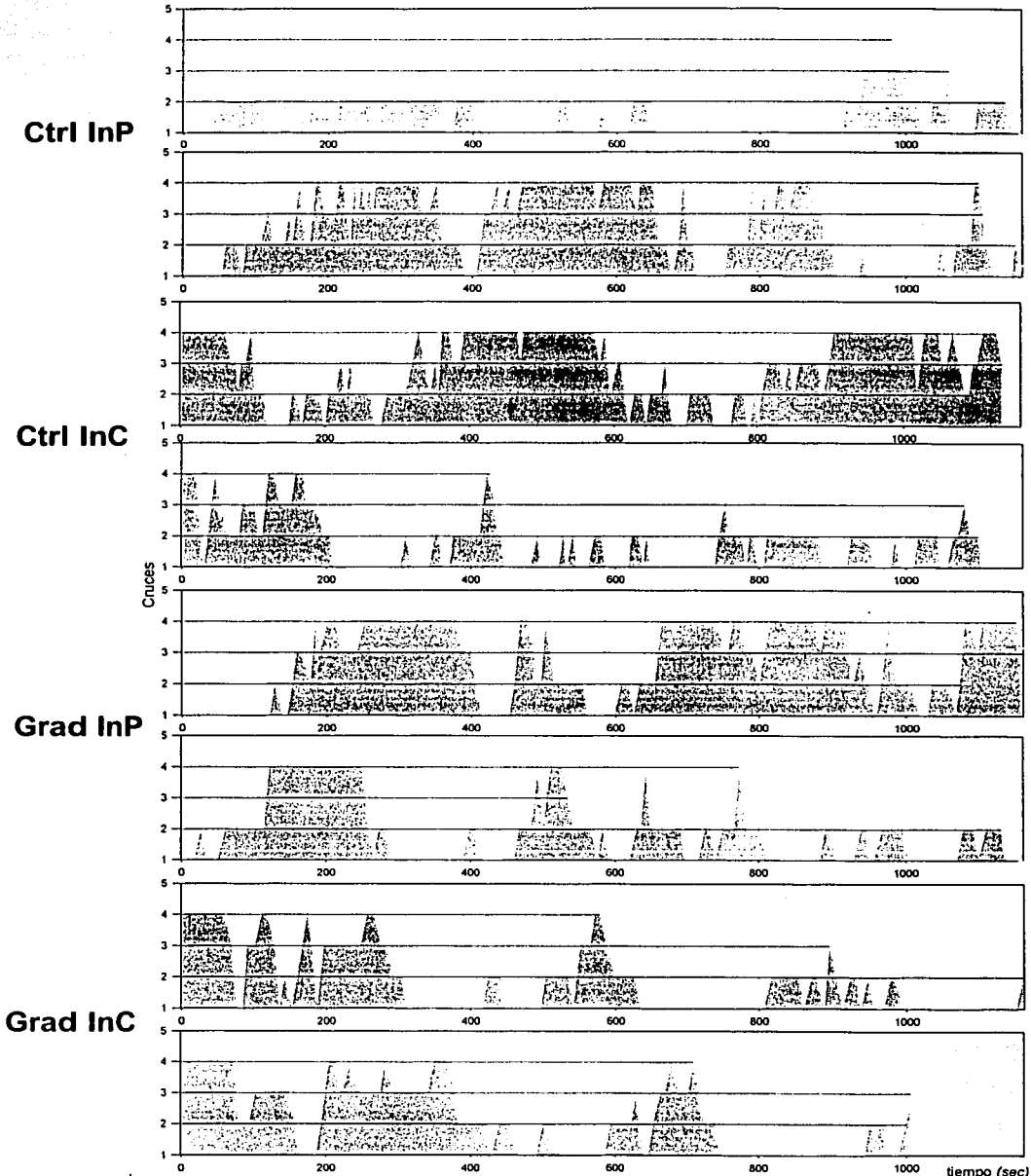


Gráfico 3^b Se grafican dos trayectorias por condición. En cada gráfica se muestra en una prueba distinta, la posición del robot sobre el gradiente en el tiempo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9.2 Sobre las trayectorias de los gazapos

9.2.1 Condición *InP*

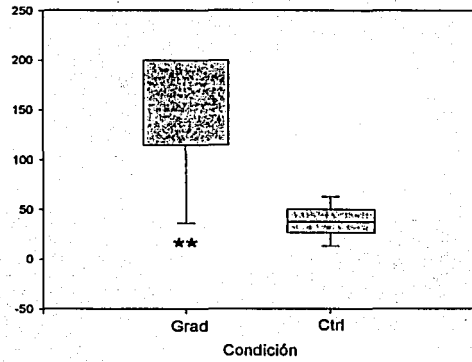
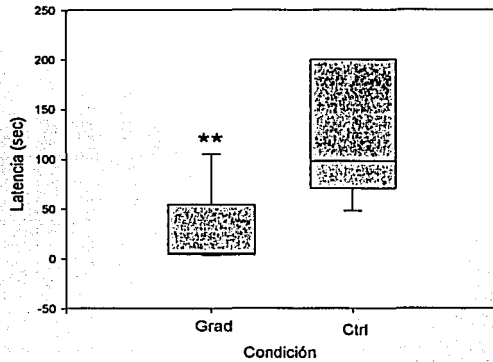
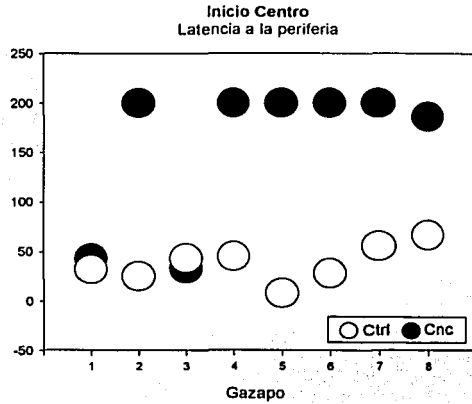
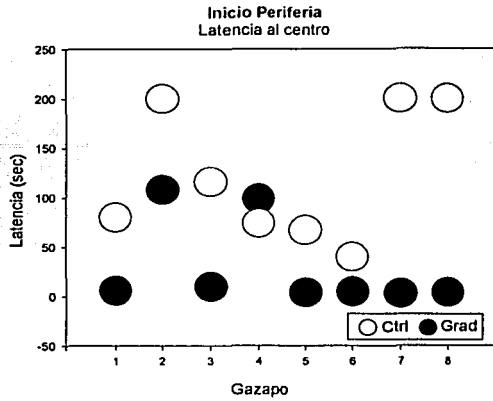
Si observamos las trayectorias (Graf. 3^a y 3^b) de los gazapos *Grad InP* y *Ctrl InP* se distinguen algunas diferencias en las trayectorias causadas por la presencia del gradiente. A los conejos *Grad* les lleva menor tiempo o *latencia* a llegar al anillo central por primera vez (*Grad* \bar{x} =29.9, D.E.=45.6, *Ctrl* \bar{x} =122.1, D.E.=67.7, *Mann-Whitney* p =0.0052). Tanto el número de *ascensos* para el anillo 4 (*Grad* \bar{x} =7.38, D.E.=3.5, *Ctrl* \bar{x} =1.88, D.E.=2.1, *Dunn* p <0.05) como la *duración* en el anillo 4 (*Grad* \bar{x} =6.13, D.E.=8.84, *Ctrl* \bar{x} =86, D.E.=56.1, *Dunn* p <0.01) es mayor para los conejos *Grad* que para los *Ctrl*. Aunque no existe diferencia en el número de *descensos* para el anillo 1 (*Grad* \bar{x} =3.75, D.E.=4.95, *Ctrl* \bar{x} =10.5, D.E.=2.78, *Dunn* p >0.05) y la *duración* de los descensos en el anillo 1 es mayor para los conejos *Ctrl* que para los *Grad* (*Grad* \bar{x} =26, D.E.=44.9, *Ctrl* \bar{x} =112, D.E.=41.5, *Dunn* p >0.001). Las trayectorias de los conejos *Grad* muestran un área bajo la curva (*Grad* \bar{x} =570.1, D.E.=167.2, *Ctrl* \bar{x} =319.5, D.E.=65.4, *Mann-Whitney* p =0.0052) mayor que las trayectorias de los conejos *Ctrl*.

9.2.1 Condición *InC*

En las trayectorias de los gazapos *Grad InC* y *Ctrl InC* podemos observar algunas diferencias en las trayectorias causadas por la presencia del gradiente. Los conejos *InC* tienen una mayor *latencia* para alcanzar la región más periférica. (*Grad* \bar{x} =157.8, D.E.=74.1, *Ctrl* \bar{x} =37.8, D.E.=18.3, *Mann-Whitney* p =0.0035) Aunque comenzados en el centro, en los gazapos *Ctrl* se puede distinguir una tendencia para avanzar hacia la periferia de la arena y permanecer en ésta, ya que aunque en el número de *descensos* al anillo 1 (*Grad* \bar{x} =2, D.E.=2.9, *Ctrl* \bar{x} =8, D.E.=2.7, *Dunn* p >0.055) no se encontraron diferencias significativas, en la *duración* de los descensos para el anillo 1 es mayor para los conejos *Ctrl* que para los *Grad* (*Grad* \bar{x} =3.9, D.E.=8.4X, *Ctrl* \bar{x} =99, D.E.=25.7, *Dunn* p <0.001) . La diferencia entre el número de *ascensos* al anillo 4 no fue significativa (*Grad* \bar{x} =10.5, D.E.=7.86, *Ctrl* \bar{x} =5.9, D.E.=2.4, *Dunn* p >0.05) y la *duración* de los ascensos tampoco resultó significativa (*Grad* \bar{x} =98.6, D.E.=54.4, *Ctrl* \bar{x} =31.5, D.E.=12.5, *Dunn* p >0.05). Las gráficas exhiben una área bajo la curva mayor para los conejos *Grad* que para los *Ctrl*. (*Grad* \bar{x} =633.6, D.E.=133.5, *Ctrl* \bar{x} =377.9, D.E.=48.4, *Mann-Whitney* p =0.0023).

Latencia

Gazapos



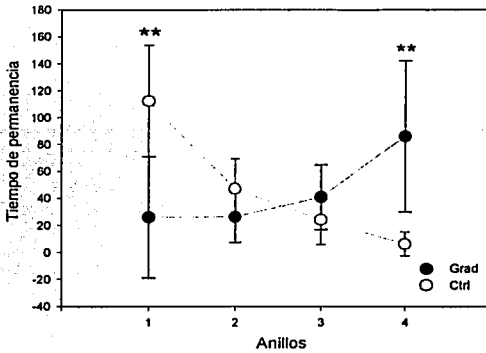
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Gráfico 4^a Arriba se muestra la latencia al centro para los conejos iniciados en la periferia y la latencia a la periferia para los conejos iniciados en el centro. Debajo se muestran diagramas de cajas y bigotes comparando el desempeño en cada condición.

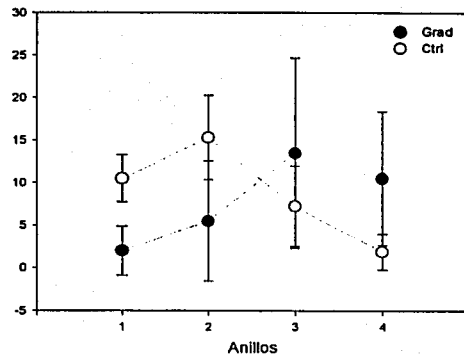
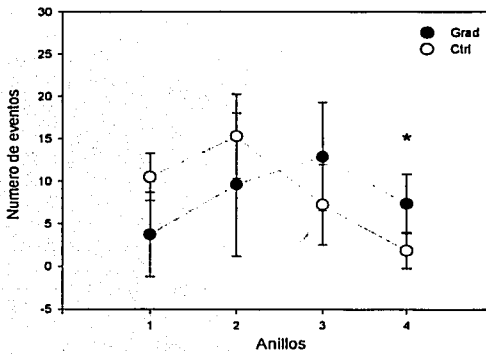
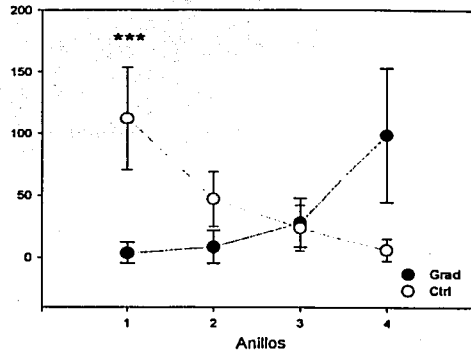
Ascensos y descensos

Gazapos

Inicio Periferia



Inicio Centro

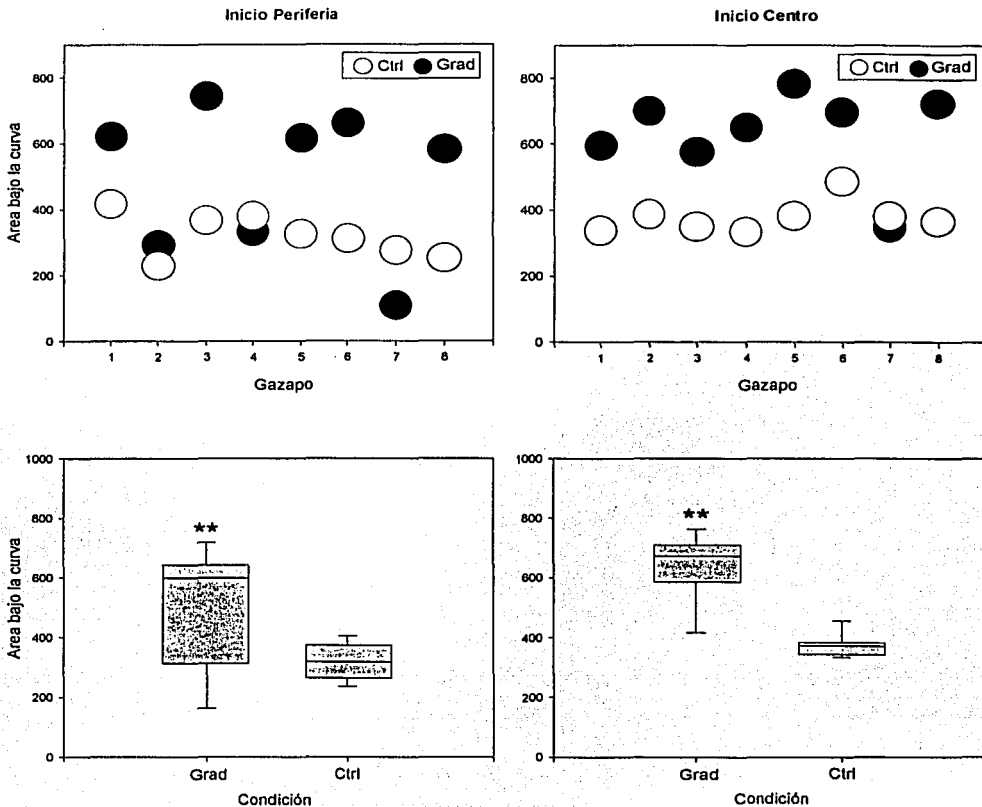


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfico 5^a Arriba, se muestran el promedio del tiempo de permanencia en cada anillo para todos los gazapos de cada condición. Debajo se muestran el promedio del número de veces que un gazapo ingresa a cada anillo en las distintas condiciones

Área bajo la curva

Gazapos



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfico 6^a Arriba, se gráficán los valores de área bajo la curva para cada gazapo. Debajo se comparan en gráficos de cajas y bigotes los valores para cada condición.

9.3 Sobre las trayectorias del robot

Se muestran los mismos parámetros y en el mismo orden para el robot, la latencia (Graf. 5^b), el número de *ascensos* y *descensos* así como la duración de estos (Graf. 6^b) y por último los área bajo la curva (Graf. 7^b). En cada gráfica se muestran los valores para la condición *InP* del lado izquierdo y los valores de *InC* del lado derecho.

9.3.1 Condición *InP*

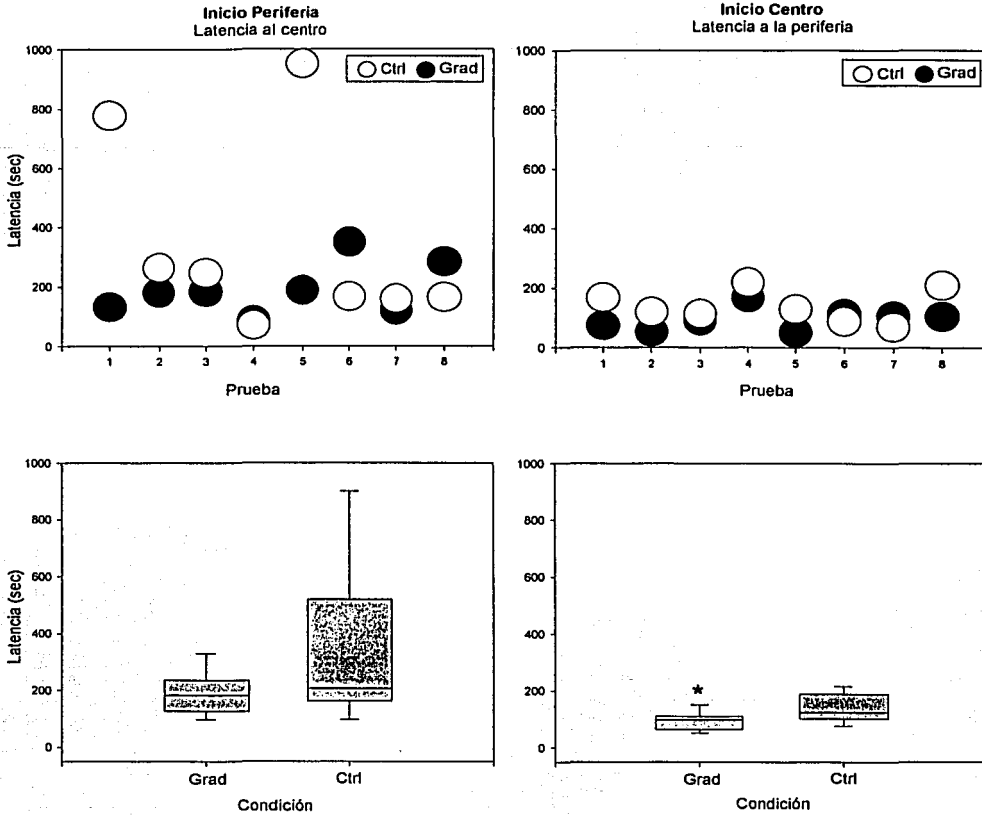
Para caso de los robots *InP*, no se encontraron diferencias en la *latencia* al centro (*Grad* $\bar{x}=190.8$, D.E.=87.3, *Ctrl* $\bar{x}=350.3$, D.E.=326.2, *Mann-Whitney* $p=0.323$) entre las condiciones *Grad* y *Ctrl*. Tampoco se pudieron registrar diferencias entre el número de *ascensos* al anillo 4 (*Grad* $\bar{x}=11.3$, D.E.=3.73, *Ctrl* $\bar{x}=7.75$, D.E.=6.04, *Prueba de Dunn* $p>0.05$) ni en la duración de los mismos (*Grad* $\bar{x}=197$, D.E.=115, *Ctrl* $\bar{x}=339$, D.E.=115, *Prueba de Dunn* $p>0.05$). Tampoco se encontró diferencias significativas en el número de eventos en los que el robot llegó al anillo 1 (*Grad* $\bar{x}=12.93$, D.E.=2.93, *Ctrl* $\bar{x}=13.3$, D.E.=2.71, *Prueba de Dunn* $p>0.05$) o en su duración (*Grad* $\bar{x}=325$, D.E.=132, *Ctrl* $\bar{x}=507$, D.E.=142, *Prueba de Dunn* $p>0.05$). Sin embargo, en la comparación del área bajo la curva si se encontró esta fue mayor para la condición *Grad* (*Grad* $\bar{x}=2673.1$, D.E.=297.5, *Ctrl* $\bar{x}=2277.6$, D.E.=299.5, *Mann-Whitney* $p=0.019$).

9.3.2 Condición *InC*

Para las gráficas de las pruebas del robot *InC*, la *latencia* a la periferia (*Grad* $\bar{x}=95.9$, D.E.=37.8, *Ctrl* $\bar{x}=140.1$, D.E.=54.1, *Mann-Whitney* $p=0.0415$) resultó significativamente menor para la condición *Grad*. Ni en el número de *descensos* al anillo 1 (*Grad* $\bar{x}=9.5$, D.E.=3.16, *Ctrl* $\bar{x}=14.8$, D.E.=3.37, *Prueba de Dunn* $p>0.05$) ni su duración (*Grad* $\bar{x}=516$, D.E.=216, *Ctrl* $\bar{x}=346$, D.E.=130, *Prueba de Dunn* $p>0.05$) se encontraron diferencias. Así mismo, tampoco se registraron diferencias significativas para el número de *ascensos* al anillo 4 (*Grad* $\bar{x}=4.63$, D.E.=2.26, *Ctrl* $\bar{x}=9.75$, D.E.=3.28, *Prueba de Dunn* $p>0.05$) ni su duración (*Grad* $\bar{x}=135$, D.E.=51.3, *Ctrl* $\bar{x}=290$, D.E.=120, *Prueba de Dunn* $p>0.05$). En el caso del área bajo la curva, ésta resultó significativamente menor para las pruebas *Grad* que para los *Ctrl*. (*Grad* $\bar{x}=2226.5$, D.E.=292.5, *Ctrl* $\bar{x}=2615.3$, D.E.=401.5, *Mann-Whitney* $p=0.00325$).

Latencia

Robot



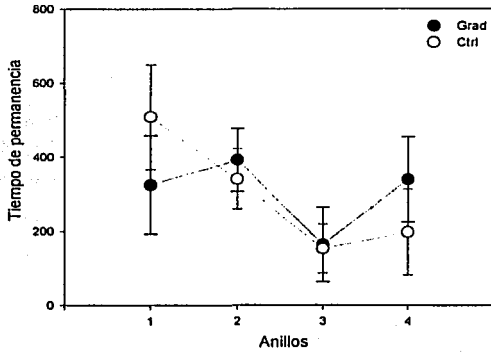
ELSES CON
FALLA DE ORIGEN

Gráfico 4^b Arriba se muestra la latencia al centro para las pruebas iniciadas en la periferia y la latencia a la periferia para las pruebas iniciados en el centro. Debajo se muestran diagramas de cajas y bigotes comparando el desempeño del robot en cada condición.

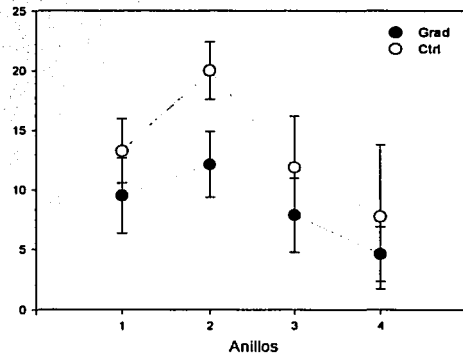
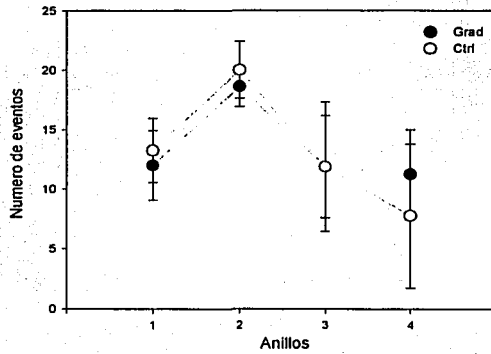
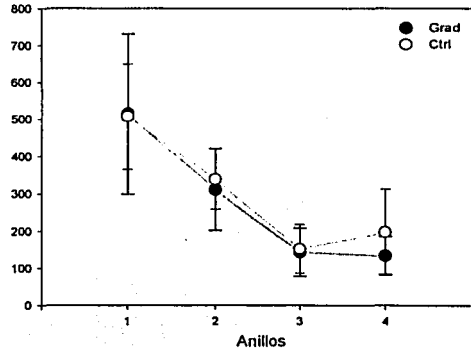
Ascensos y descensos

Robot

Inicio Periferia



Inicio Centro



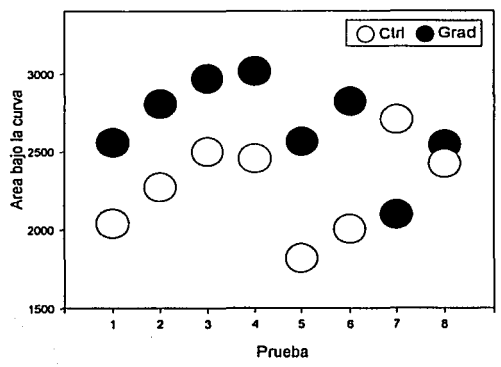
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gráfico 5^b Arriba, se muestran el promedio del tiempo de permanencia en cada anillo para todas las pruebas de cada condición. Debajo se muestran el promedio del número de veces que el robot ingresa a cada anillo en las distintas condiciones.

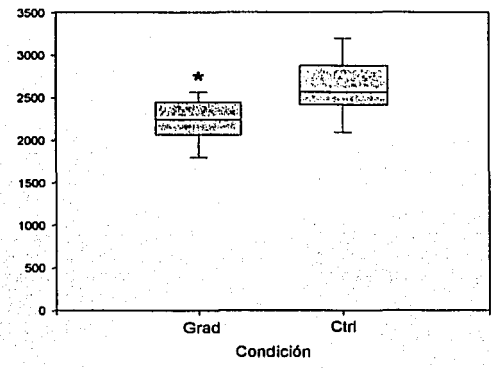
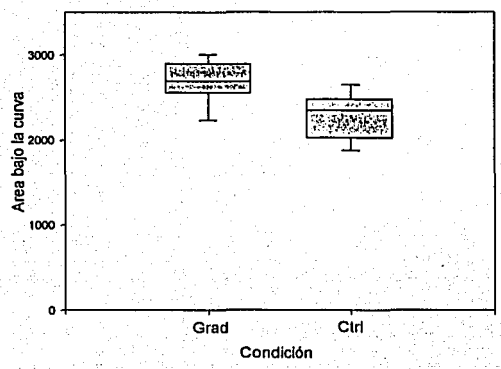
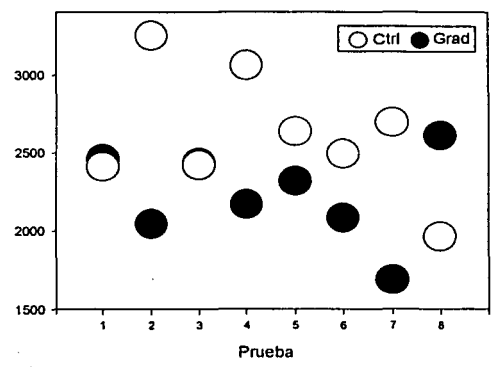
Área bajo la curva

Robot

Inicio Periferia



Inicio Centro



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfico 6^b Arriba, se grafican los valores de área bajo la curva para cada prueba. Debajo se comparan en gráficos de cajas y bigotes los valores para cada condición.

9.4 Resumen

9.4.1 Conejos

El análisis de los parámetros obtenidos a partir de las trayectorias de los conejos demuestra las diferencias causadas por la orientación térmica. Primero, los conejos *Grad* se orientan a la zona más cálida del gradiente: llegan más rápidamente al centro y si se encuentran allí no se acercan a la periferia o lo hacen más lentamente que los conejos *Ctrl*. Aunque, los conejos *Grad* exploran la arena, permanecen más tiempo y llegan más veces en el centro que los conejos *ctrl*. Aunque resulta en un estimado impreciso, podemos ver que el ABC para los conejos *Grad* es mayor que para los conejos *Ctrl*, confirmando lo que indican los demás parámetros.

9.4.2 Robots

El análisis de los parámetros obtenidos a partir de las trayectorias del robot muestra que no existen diferencias entre la conducta del robot *Grad* y el robot *Ctrl*. El robot *Grad* no logra llegar al centro más rápidamente que el robot *Ctrl*. En la condición *InC*, el robot *Grad* llega más rápidamente a la orilla que el robot *Ctrl*. Del mismo modo, ninguna de las condiciones muestra una preferencia por alguno de los anillos. El estimado general de las trayectorias, el ABC, es ligeramente mayor para el robot *Grad* en la condición *InP*, y es mayor para el robot *Ctrl* en la condición *InC*.

10 Discusión: Prueba del algoritmo

La mayoría de los objetivos planteados en este trabajo fueron cumplidos. Se logró programar el algoritmo que describe la conducta de los conejos *Grad* y *Ctrl*. Un robot con el algoritmo fue construido y luego probado en una arena simulando un gradiente térmico concéntrico. Así mismo, logró recabar la trayectoria del robot. Un análisis basado en los parámetros producidos por la trayectoria, se utilizó para comparar el desempeño del robot con el de los conejos.

El robot utilizado, un LEGO® genérico, resultó técnicamente suficiente para ejecutar modelar la conducta de los conejos. La diferencia en velocidad y duración en el par de motores proveen una amplia variedad de conductas con las que imitar el desplazamiento del conejo. Utilizando el estímulo adecuado, los sensores resultaron suficientemente sensibles a las diferencias en la intensidad de luz. Finalmente, la capacidad del robot para capturar los valores de las variables en un *data log* hace fácil y rápido el registro de las trayectorias. Un análisis de las trayectorias del robot confirmó que el robot se comportaba según las restricciones del algoritmo. La velocidad de procesamiento del robot fue suficiente para observar una trayectoria continua, a pesar del tamaño y complejidad del programa.

Los colores incluidos en las arenas proveen diferencias suficientes para la construcción de gradientes. La impresión en *plotter* de arenas las coloca como excelente opción para la construcción de nuevas pruebas experimentales. La posibilidad de construir arenas experimentales en forma de imágenes, permite enorme versatilidad en la forma, número y calidad de los estímulos involucrados. La construcción de las arenas requirió de la construcción de un catálogo de colores, con el que se obtuvieron los valores para toda un espectro de opciones para construir nuevas arenas. Se pueden construir nuevas arenas para explorar las posibilidades que la manipulación de gradientes de colores tienen en estudios conductuales. En el estudio de Morse (Morse 1998) se utilizó un gradiente de luz causado por un foco sobre un área blanca. Sin embargo, la utilización de colores para manipular más precisamente las variables de un gradiente es una contribución original de este estudio.

Mediante el análisis de los parámetros obtenidos a partir de las trayectorias, se pueden encontrar distintas propiedades en la orientación. Aunque no existe una forma universal para analizar trayectorias, ni de comparar el desempeño entre organismos y modelos robots, este análisis resultó adecuado y permitió obtener parámetros como base

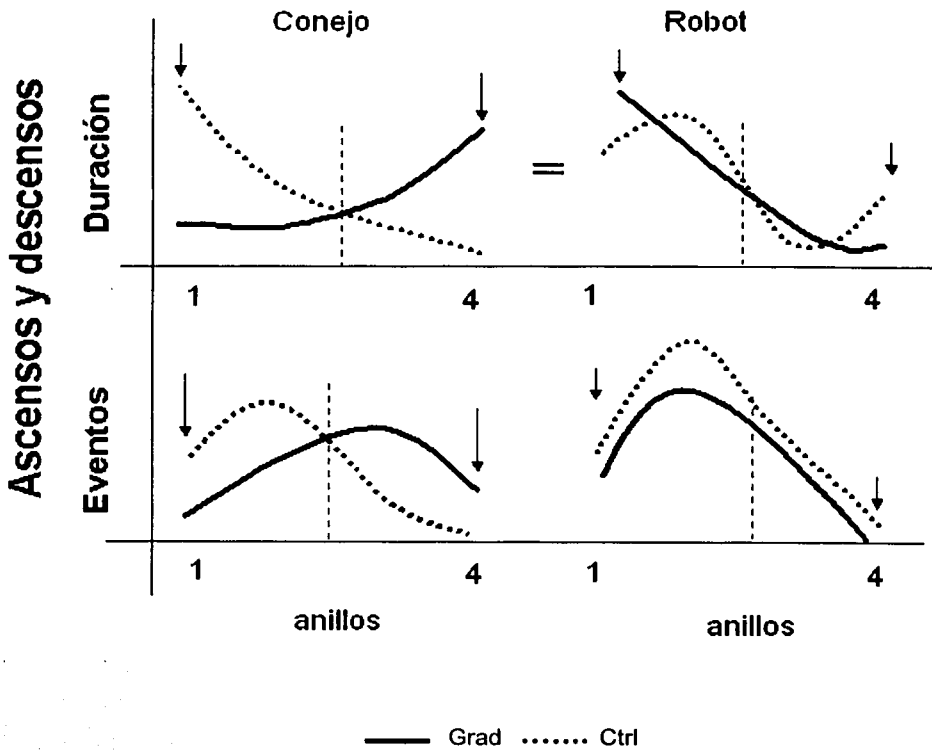
de comparación. La robustez de estos análisis es reforzada por la gran coherencia que se mantiene a lo largo del análisis sobre distintos parámetros. Aunque la comparación resulta indirecta, al menos para este modelo particular, los parámetros obtenidos a partir de las trayectorias resultan en suficiente información para probar la validez del modelo.

Este trabajo ayuda a confirmar la capacidad de orientación térmica que poseen los crías de conejo recién nacidas. Esta capacidad se describe en los estudios de (Jeddi 1971, Satinoff *et al.* 1976, Hull & Hull 1982) incluyendo el estudio de Pacheco-Cobos (Pacheco-Cobos 2003^a, *et al.* 2003^b) que generó la base de datos utilizada en este trabajo.

Al colocar el robot con el algoritmo programado sobre la arena y encenderlo, éste produjo una conducta. Sin embargo, según los parámetros analizados, la conducta del robot no es similar a la de los conejos. Existen dos grupos principales de razones por las que esto pudo suceder. Un primer grupo concierne al algoritmo y las suposiciones que se hicieron al construirlo son a causa de las limitaciones técnicas del robot. Una segunda opción es que el algoritmo no sea condición suficiente para que el robot se oriente correctamente y se requiere incluir otras características del sistema biológico.

Desde la comparación visual de las trayectorias, no podemos ver una diferencia clara entre los desplazamientos graficados para el robot con el algoritmo *Grad* y el robot *Ctrl*. El primer estimado, el área bajo la curva, resultó ser significativo, a pesar de presentar un solapamiento debido a la enorme variación. Sin embargo, a partir de este los demás parámetros, esta relación no fue significativamente distinta. Ni en la latencia al centro, ni en el número y duración de los eventos en los que el robot llegaba a al centro, el robot *Grad* era distinto del *Ctrl*. De estos parámetros, sólo algunos resultaron, en el caso del robot, distintos al control. Todo esto indica una deficiente orientación por parte del sistema artificial.

En el caso de el número y duración de los eventos en cada anillo, se observa una tendencia interesante (Fig. 10). Los conejos *Grad* tienden a encontrar el centro y permanecer allí mayor tiempo, mientras que los *Ctrl* tienden a alejarse del centro, encontrar la periferia y permanecer en ésta. El análisis de este parámetro muestra una simetría en las tendencias de los conejos. Sin embargo, esta tendencia no se observa en el robot. El robot, en ambas condiciones tiende a llegar un mayor número de veces y permanecer mas tiempo en la periferia. Esto sugiere que el robot, en la condición *Ctrl* puede comportarse como la condición *Ctrl* del conejo, lo que no sucede en la condición *Grad*.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 10 - Muestra las tendencias en la duración y el número de *ascensos* y *descensos* en las trayectorias de los conejos y el robot.

Algunas características del sistema robot pudieron contribuir a la incapacidad de emular la conducta de orientación del conejo. A pesar de las virtudes del robot, ciertos parámetros de su conducta son rígidos y difíciles de manipular. La velocidad es uno de estos parámetros; el robot decide y actúa con mucha más rapidez y frecuencia que el conejo, pero sólo sensa al inicio y final de una conducta. Una consecuencia directa de la alta tasa de decisiones del robot podría ser su inhabilidad por encontrar el centro, porque aunque lo encontrase, sólo volvería a salir. Sin embargo, si esto fuera cierto, podríamos observar un número de ascensos alto y con una duración baja, lo cual no se puede observar en los datos, por lo que debemos alegar otros factores para explicar la poca capacidad del robot.

Otra complicación fue el papel que jugaron los estímulos táctiles en la conducta del robot. Como ya se ha mencionado, la atracción de los gazapos por la pared no fue integrada en el algoritmo. Sin embargo, el robot debía mantenerse sobre el área y por ello se colocó una barrera física alrededor de esta. Un sensor percibía el contacto con la pared, al que el robot respondía de manera negativa, desplazándose ligeramente hacia atrás y girando 45° para seguir evitando el contacto. Existe la posibilidad de que la manera aberrante en que el robot está programado para reaccionar a los estímulos táctiles introdujera una confusión. Este efecto puede explicar la tendencia del robot con el algoritmo *Ctrl* de llegar al centro en igual número de ocasiones que el *Grad*. Esto sin embargo, no favorece mucho al algoritmo *Grad*, pues podría ser que sus arribos al centro hayan sido por el rechazo de la pared.

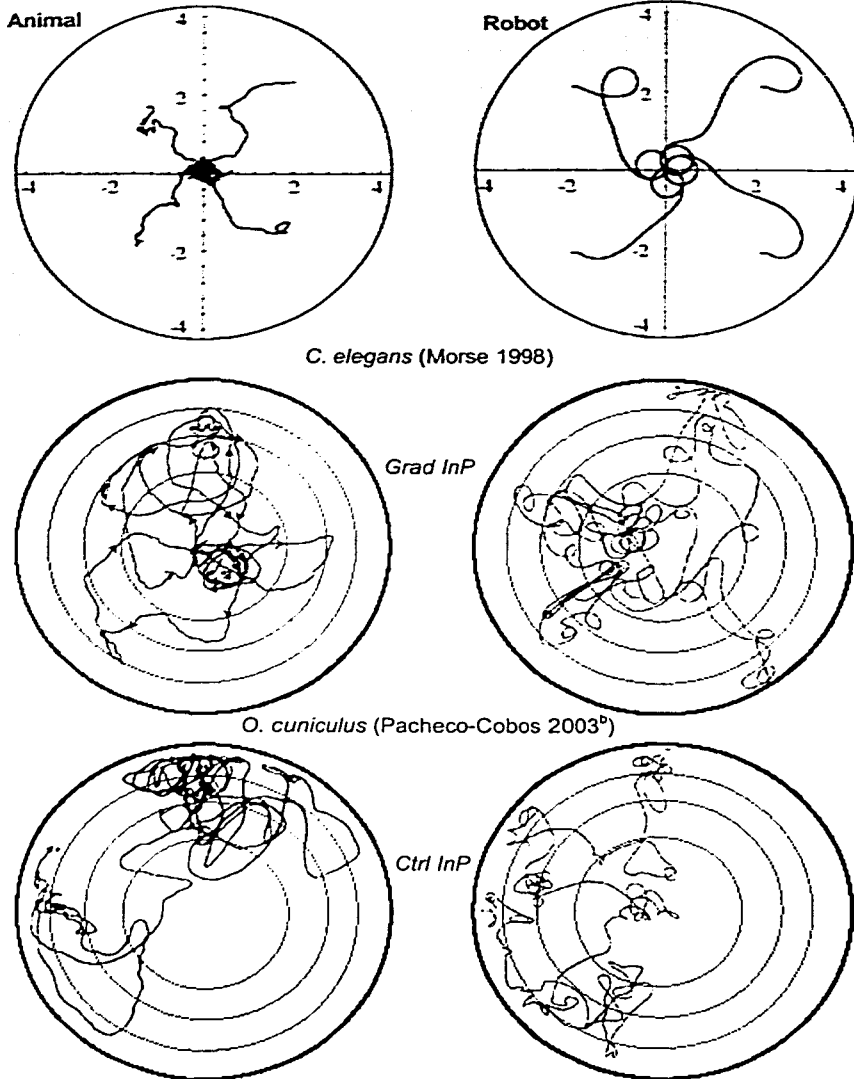
El número de pruebas realizadas en éste estudio fue solamente de ocho por condición. Debido a la falta de un procedimiento para analizar las trayectorias, el esfuerzo realizado se concentro en establecer la metodología. Sin embargo, una ventaja no explotada en este proyecto, es que al utilizar robots es posible aumentar el número de pruebas sin la necesidad del uso y sacrificio de animales. Además, el aumentar las pruebas también provee otras ventajas como la reducción del error y la aclaración de las tendencias que siguen los datos. En este caso particular, trabajando con un algoritmo probabilístico, es necesario aumentar el número de pruebas para develar la totalidad de posibilidades conductuales que el algoritmo ofrece.

Las maneras de evaluar el éxito de un modelo robot varían de estudio a estudio. La mayoría de los autores toman en cuenta la similitud de la forma de las trayectorias obtenidas. Aunque miden otros parámetros, en el estudio de Morse (Morse 1998) nos

muestran la clara similitud entre las trayectorias del robot y de los nemátodos. Así mismo conviene conocer el desempeño del robot en distintas condiciones y saber si el robot se equivoca en condiciones similares. En el modelo biorrobótico del grillo de Webb (Webb 1996) se muestra que al cambiar las características de la información en el estímulo el grillo no logra alcanzar la fuente de sonido y deambula entre los objetivos sonoros, lo que el robot también hace bajo las mismas condiciones. Finalmente, lo más importante es si el robot llega con éxito a su meta. Esto es particularmente claro en el trabajo de Srinivasan (Srinivasan 2000) en donde el robot debe alcanzar el suelo y aterrizar del mismo modo que la abeja.

Sin embargo medir el éxito de un modelo robot mediante estos parámetros puede resultar escaso. La variabilidad que el animal muestra y que resulta una de las características más difíciles de integrar en un modelo sigue faltando. En el estudio de Lockery (Morse 1998) se muestran las trayectorias del robot y las trayectorias de los nemátodos para una comparación visual (Fig. 11). Aunque en efecto son muy parecidas, las trayectorias del robot no contienen la variabilidad ni individualidad del organismo modelado. Recordemos que el sistema natural es el nemátodo *C.elegans*, sobre el que existe un enorme número de estudios y cuyo sistema nervioso se conoce por completo. Aún así, éste muestra variabilidad individual en su conducta. Los modelos no deben sólo responder como un organismo responde a un estímulo, sino preguntarse por que cada individuo la acción de cada individuo es diferente. Un modelo debe servir también para investigar las causas por las que los sistemas biológicos presentan variabilidad.

La variabilidad en la conducta es un tema de central importancia. La conducta es el producto de la interacción de varios niveles, genético, fisiológico y psicológico. La conducta es una propiedad emergente de los sistemas a través de la cual podemos expresar la máxima variabilidad. La variabilidad generada en la conducta emerge incluso sin un origen genético, incluso podemos observar estrategias de nado individuales en *Escherichia coli* (Levin 1998). Al ser producto de la interacción de tantos componentes, la conducta resulta siempre, compleja e interesante.



C. elegans (Morse 1998)

O. cuniculus (Pacheco-Cobos 2003^b)

Fig. 11 - Arriba y ala derecha, podemos observar las trayectorias de nemátodos sobre un gradiente químico y en la izquierda las trayectorias generadas por el modelo robot del nematodo (Trayectorias obtenidas de Morse (1998) Debajo vemos las trayectorias de gazapos sobre un gradiente concéntrico (Trayectorias obtenidas de Pacheco-Cobos (2003) Debajo y ala derecha se encuentra una trayectoria del modelo robot de la orientación termica de los gazapos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A pesar de su variabilidad, el gazapo puede orientarse hacia el calor. Sin embargo, lo hace de una manera variable y el algoritmo incorpora tanto su error como sus éxitos. Observando las trayectorias, podemos preguntarnos: ¿Qué es lo que hace *mal* el robot?. El robot avanza, evalúa la diferencia y decide en que dirección avanzar y continua este ciclo. La probabilidad de que ocurra una conducta en cada paso está dada por el conjunto de conductas obtenidas de los conejos. La hipótesis consiste en la relación entre la temperatura y la dirección del eje corporal. Aunque existen más características en la orientación de los gazapos que no se hallan programadas en el robot, es claro que algunos de los *errores* del robot son los *errores* de los gazapos.

Aunque la conducta de orientación hacia el calor parece básica, importante y vital, parece no ser la única preocupación de los gazapos. Por ello, debemos preguntarnos qué otras cosas ocurren en la toma de decisiones en un mamífero recién nacido. Esta interacción entre las distintas preocupaciones representa uno de los orígenes de la variabilidad en la conducta. La variabilidad que hace de los gazapos no autómatas termotáxicos, sino exploradores individuales con una respuesta altamente compleja a un problema. Existen muchas fuentes de posible individualidad como reacción a un gradiente térmico. Por ello, en los conejos recién nacidos la pregunta de por qué no se orillan al calor es casi tan válida como por qué si lo hacen.

Los conejos recién nacidos viven en ambientes complejos y aun al ya son criaturas complejas. Es difícil clasificarlos en términos térmicos, tienen tejido adiposo café y tienen termorregulación conductual. A pesar de los reportes sobre las temperaturas ante las que el gazapo termoregula conductualmente (Jeddi 1971, Satinoff *et al.* 1976, Hull & Hull 1982) podría pensarse que la razón por la que muestran una conducta termotáxica errática es por que el frío no les es suficientemente molesto, al menos no es igualmente molesto para todos. El panorama biológico de los primeros días de un gazapo sugiere que muestran múltiples preocupaciones simultáneas a a termorregulación. Por ejemplo, pueden hallarse realmente preocupados por el alimento. La leche materna, si la consiguen, solo la obtendrán una vez al día y lo anticipan conductual y fisiológicamente (Hudson & Distel 1982, Jilge & Hudson 2001). Tal vez el algoritmo contenga fuertes prioridades paralelas ala búsqueda de una temperatura termoneutra y por ello muestra sus trayectorias contengan tanta exploración. Otro factor, difícil de cuantificar pero cuya existencia no podemos descartar es la curiosidad. Aunque es un concepto psicológico

difícil de definir, podemos redefinirlo en términos conductuales. La curiosidad puede verse como una tendencia a explorar el ambiente mas allá de necesario, sin involucrar necesariamente una motivación de protección, alimentación o reproducción. Puede incluso contener riesgos innecesarios y comprometer la supervivencia. La curiosidad es uno de los principales orígenes de la individualidad y de la variabilidad en la respuesta a los problemas. La curiosidad lleva a los animales a desplazarse lejos de las medias poblacionales y es esa variación individual sobre la que actúa la selección natural.

Probablemente, la realidad sea una combinación de todas estas posibilidades en distintas medidas. Es justamente la combinación de tantos factores en tantos niveles la que produce el gran abanico de conductas individualidades que muestran los gazapos. Aunque existe la duda de que algún día podamos comprender la totalidad de los factores involucrados en los orígenes las características individuales de la conducta. Un esfuerzo es necesario para entender la individualidad, una característica que resulta de máxima importancia en cualquier fenómeno biológico.

11 Conclusiones

- La capacidad termotáxica del conejo quedó confirmada por un nuevo análisis, reforzando la idea de que los conejos pueden orientarse hacia el calor.
- Se desarrolló una metodología para probar hipótesis sobre relaciones sensorimotoras que puede ser utilizada en estudios biorrobóticos posteriores.
- Gracias a la prueba biorrobótica, se concluye que el algoritmo no resulta condición suficiente para simular la conducta de los conejos sobre el gradiente.
- Otras alternativas para explicar la orientación del gazapo surgen como resultado de la utilización de un modelo biorrobótico.
- El último punto confirma los beneficios que trae el establecimiento de una metodología biorrobótica dentro de los estudios de la conducta biológica.

12 Futuras direcciones

Este proyecto provee pocas respuestas y muchas preguntas. Se abre una línea de investigación que no sólo considera la orientación hacia el calor, sino la búsqueda de los algoritmos tras las distintas relaciones sensorimotoras de las crías de conejo. Primero se deben volver a plantear metodologías adecuadas para aislar y separar el efecto de los distintos estímulos. Por ejemplo, realizar experimentos con una arena sin pared o sobre una arena cóncava para evitar el contacto con la orilla y la subsecuente orientación por táctil. También, se sugieren experimentos con anestésico local y superficial para determinar la localización de regiones importantes que contengan sensores térmicos. Luego, se debe buscar el análisis más detallado posible para las trayectorias y contener el estímulo mapeado con gran definición. Todo esto produciría grandes bases de datos de enorme valor para modelar la conducta. Utilizando el mismo tipo de análisis, convendría reanalizar los videos y crear una base de datos para analizar las trayectorias utilizando otra estructura como punto de registro, por ejemplo el vientre.

Utilizando las nuevas bases se podrían construir nuevos algoritmos. Estos algoritmos deben incorporar de manera separada y luego junta los distintos estímulos a los que se averigüe que el conejo reacciona. Los nuevos algoritmos para la orientación al calor deben ir agregando, uno a uno incluir los aspectos que se tomaron como suposiciones, para conocer como éstos influyen sobre la trayectoria. Un vistazo a las trayectorias nos sugiere que los conejos se desplazan a distinta velocidad dependiendo de la parte del gradiente en la que se encuentren. Se debe analizar si los conejos disminuyen o aumentan su velocidad en algunas zonas del gradiente. El robot no considera los valores de cada anillo, sólo la direccionalidad de los cambios, hacia el norte, sur o ninguno de estos. El incorporar un componente de velocidad diferencial sería una forma de otorgarle un valor particular a la temperatura de cada anillo.

Con estos algoritmos se pueden construir nuevos robots. Manipulando la fricción de las llantas puede conseguirse que el motor avance más despacio. Otros sensores deben ser incluidos para probar hipótesis sobre la potencial localización de los receptores térmicos en los conejos. También se puede modificar la forma en que el robot se desplaza. El robot utilizado en este estudio contaba con un eje trasero y motores delanteros, del mismo modo de los conejos recién nacidos se desplazan mayormente con

sus patas delanteras. Estos nuevos robots pueden construirse sin demasiado esfuerzo pues los robots LEGO® permiten flexibilidad en su construcción y manipulación.

Los nuevos robots pueden utilizar nuevas y distintas arenas de prueba. En este estudio se obtuvo un catálogo de colores con el cual se pueden conocer los valores a los que el sensor del robot presenta sensibilidad. Para validar el modelo, se pueden realizar arenas y observar si el robot comete los mismos errores - y con la misma forma - que los conejos. También podemos construir arenas para mostrar gráficamente otros tipos de gradientes, a partir de la distribución de otros tipos de estímulos relevantes para los conejos.

Finalmente, podemos constatar la capacidad predictiva de los modelos construidos, para darles más validez y finalmente llegar a obtener un modelo completo para la orientación de las crías conejo europeo. Para esto será necesario resolver muchas preguntas antes de poder conseguir un conocimiento completo de la orientación en las crías de conejo. Este estudio provee una primera y modesta aproximación para establecer las bases de una metodología original y novedosa con el esfuerzo de entender la conducta. Ojalá el entusiasmo y aventura con que se realizó este trabajo permanezca y que con su ayuda, muchas más preguntas lleguen a una solución.

13 Bibliografía

- Atema J (1995) Chemical signals in the marine environment: Dispersal, detection and temporal signal analysis. *Proc Nat Acad Sci.* 92:62-66.
- Arbib M, Liaw J (1995) Sensorimotor transformation in the world of frogs and robots. *Artificial Intelligence* 72:53-79.
- Arkin R (1998) *Behavior-Based Robotics*. Cambridge, Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology Press.
- Ashby R (1956) *An Introduction to Cybernetics*, London: Chapman & Hall. Internet (1999). En: Heylighen F, Joslyn C, Turchin V (editores): *Principia Cybernetica Web* (Principia Cybernetica, Brussels).
<http://pccp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf>
- Basil JA, Hanlon RT, Sheikh SI, Atema J (2000) Three-dimensional odor tracking by *Nautilus Pompilus*. *J Exp Biol.* 203:1409-1414.
- Baum D (2000) *Baum's Definitive Guide to LEGO® Mindstorms*. Apress Emeryville California.
- Baum D (2000) *Not Quite C*.
- Bautista A, Drummond H, Martinez-Gomez M, Hudson R (2003). Thermal benefit of sibling presence in the newborn rabbit. *Dev Psychobiol.* Noviembre 43(3):208-15.
- Beer R, Chiel H, Sterling L (1990) A biological perspective on autonomous agent design. *Robotics and Autonomous Systems* 6:168-186
- Beer R, Chiel H, Quinn R, Espenschied S, Larsson P (1992). A distributed neural network architecture for hexapod robot locomotion. *Neural computation* 4, 356-365.
- Beer R, Chiel H, Quinn R, Ritzmann RE, (1998) Biorobotic approaches to the study of motor systems. *Current Opinion in Neurobiology* 8:777-782.
- Bertin R, van de Grind WA (1998) Phototactic foraging of the Archaeopaddler, a hypothetical deep-sea species. *Artificial Life* 4(2):157-181
- Binder J (2003) *Brick Command Center v3.3.7.5*
<http://hometown.aol.com/johnbinder/bricxcc.htm>
- Braitenberg V (1984) *Vehicles*. Cambridge, Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology Press.
- Daniel W (2000) *Bioestadística: Base para el análisis de ciencias de la salud*. 3ª edición. Limusa Noriega Editores México D.F.

- Dawkins M, Hull D (1964) Brown adipose tissue and the response of newborn rabbits to cold. *J Physiol* 172:216-238.
- Descartes R (1637) *Discurso del Método*. Edición de Editorial Porrúa Mexico D.F: (2000).
- Devezza R, Thiel D, Russell A, Mackay-Sim A (1994) Odor sensing for robot guidance. *The International Journal of Robotics Research* (13)3:232-239.
- Donnet J, Smithers T (1991) LEGO® vehicles: A technology for studying intelligent systems. *From Animals to Animats: Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, Massachusetts: The Massachusetts Institute of Technology Press.
- Elsner N, Huber F (1973) Neural principles of species-specific communication in orthoptera *Fortschr Zool*;22(1):1-48.
- Fraenkel G, Gunn D (1961) *The orientation of animals: Kineses, taxes and compass reactions*. New York: Dover Publications.
- Franceschini N, Pichon JM, Blanes C (1992) From insect vision to robot vision. *Phil. Trans R Soc Lond B* 337:383-294.
- Freeman JW (2001) Biographical essay on W. Grey Walter. *Encyclopaedia of Cognitive Science*. London: Nature Publishing Group.
- Frisch von K (1967) *The dance language and orientation of bees*. Cambridge Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press,
- Gershenson, C. (2001). *Artificial societies of intelligent agents*. Unpublished BEng thesis. Fundación Arturo Rosenblueth. México.
- Gonyou H (1994) Why the study of animal behavior is associated with the animal welfare issue. *J Anim Sci*. Agosto72(8):2171-7
- Grasso F, Consi T, Mountain D, Atema J (1996) Locating odor sources in turbulence with a lobster inspired robot. *From Animals to Animats: Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Grasso F, Consi T, Mountain D, Atema J (2000) Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges. *Robotics and Autonomous Systems* 30:115-131.
- Hacklander K, Arnold W, Ruf T (2002) Postnatal development and thermoregulation in the precocial European hare (*Lepus europaeus*). *J Comp Physiol B*. Febrero172(2):183-90.

- Hardman M, Hey E, Hull D (1969) Energy sources for thermogenesis in the newborn rabbit. *J Physiol* 201:84-85.
- Hayes B (2001) Randomness as a resource. *American Scientist*. Julio-Agosto 89:4
- Heylighen F. (1992) Principles of Systems and Cybernetics: an evolutionary perspective in: *Cybernetics and Systems 92'* R. Trappl (ed), World Science, Singapore. pp 3-10 in Heylighen F, Joslyn C, Turchin V (editors): *Principia Cybernetica Web* (Principia Cybernetica, Brussels) <http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/PrinciplesCybSys.pdf>
- Hogg D, Martin F, Resnick M (1991) Braitenberg Creatures_Epistemology and Learning Memo June 5:13. <http://fredm.www.media.mit.edu/people/fredm/papers/vehicles/>
- Hölldobler B (1995) The chemistry of social regulation: Multicomponent signals in ant societies. *Proc Natl Acad Sci USA*. Vol 92:19-22
- Horchler D, Reeve R, Webb B, Quinn R (2003) Robot phonotaxis in the wild: A biologically inspired approach to outdoor sound localization. *Proceedings of ICAR* (en prensa)
- Horridge, G (1977) Insects which turn and look. *Endeavour* 1: 7–17.
- Horridge, G (1987) The evolution of visual processing and the construction of seeing systems. *Proc R Soc Lond B* 230: 279–292.
- Hudson R, Distel H (1982) The pattern of behavior of rabbit pups in the nest. *Behavior* 79:255-271.
- Hudson R, Distel H (1983) Nipple location by newborn rabbits: Behavioral evidence for pheromonal guidance. *Behavior* 85:260-275.
- Hudson R, Cruz Y, Carillo P, Martinez-Gomez M (1998) Conducta maternal en el conejo europeo: Un recordatorio de la diversidad en mamíferos. En Velazquez-Moctezuma J (editores) *Biología de la reproducción*. UAM-I, México D.F. pp 419-439.
- Hull J, Segall M (1965) The contribution of brown adipose tissue to heat production in the newborn rabbit. *J Physiol* 181:458-467.
- Hull J, Hull D (1982) Behavioral thermoregulation in the newborn rabbits. *J comp Physiol Psychol* 96:143-147.
- Huntsberger T (2001) Biologically inspired autonomous rover control. *Autonomous Robots* 11:341-346.

- Ishida H, Nakamoto T, Moriizumi T, Kikas T, Janata J (2001) Plume-tracking robots: A new applications of chemical sensors. *Biol Bull (Abril)* 200:222-226.
- Jeddí E (1971) Thermoregulatory efficiency of neonatal rabbit search for fur comfort contact. *Int J Biometeor* 15:337-341.
- Jilge B, Hudson R (2001) Diversity and development of circadian rhythms in the European rabbit. *Chronobiol Int. Enero* 18(1):1-26.
- Kirchner WH, Towne WF (1994) The sensory basis of the honeybee's dance language. *Scientific American (Junio)* 52-59.
- Klassner F, Anderson SD (2003) LEGO MindStorms: Not Just for K-12 Anymore. *IEEE Robotics & Automation. Vol 9(2) Junio.*
- Knudsen EI (1983) "Subdivision of the inferior colliculus in the barn owl (*tyto alba*)," *J. Comp. Neur* vol(218)174–186 en Rucci M, Edelman GM, Wray J (1999) Adaptation of orienting behavior: From the barn owl to a robotic system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation (15)*1:96-110.
- Knudsen J (1999) The unofficial guide to LEGO® Mindstorms™ robots. O'Reilly& Associates, Inc. Sebastopol, California.
- Konishi M., Takahashi TT, Wagner H, Sullivan WE, Carr CE (1988) "Neurophysiological and anatomical substrates of sound localization in the owl," in *Auditory Function: Neurobiological Bases of Hearing*, Edelman GM, Gall WE, Cowan W M (editores) New York: Wiley pp. 721–744. en Rucci M, Edelman GM, Wray J (1999) Adaptation of orienting behavior: From the barn owl to a robotic system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation (15)*1:96-110.
- Krippendorff's K (1986) *A Dictionary of Cybernetics* en: F. Heylighen, C. Joslyn and V. Turchin (editores): *Principia Cybernetica Web (Principia Cybernetica, Brussels)* <http://pespmc1.vub.ac.be/ASC/KRIPP.html>
- Kuwana Y, Nagasawa S, Shimoyama I, Kanzaki R (1999) Synthesis of the pheromone-oriented behavior of silkworms moths by a mobile robot with moth antennae as pheromone sensors. *Biosensors & Bioelectronics* 14:195-202.
- LEGO® Mindstroms™ Robotics Invention System 1.5 (2003) Firmware 2.45 <http://mindstorms.lego.com/eng/community/resources/default.asp>
- Levin, MD, Morton-Firth CJ, Abouhamad WN, Bourret RB, Bray D (1998) Origins of individual swimming behavior in bacteria. *Biophysical Journal. Enero* 74:175-181.
- Levy S (1993) *Artificial Life*. New York: Vintage Books.

- Martin F (1995) The art of LEGO® design. The Journal for Robot Builders. 1 (2) Spring 1995 <ftp://cherupakha.media.mit.edu/pub/people/fredm/artoflego.pdf>
- Martin P, Bateson O (1993) Measuring behavior: An introductory guide. 2nd ed, Cambridge University Press, Cambridge.
- Menzel R, Hammer M, Muller U, Rosenboom (1996) H. Behavioral, neural and cellular components underlying olfactory learning in the honeybee. J Physiol Paris.;90(5-6):395-8.
- Morse TM, Ferrée, Lockery SR (1998) Robust spatial navigation in a robot inspired by chemotaxis in *C. elegans*. Adaptive Behavior 6:391-408.
- Mori I, Oshima Y (1995) Neural regulation of thermotaxis in *Caenorhabditis elegans*. Nature 376:344-348.
- Musser G (2003) Robots that suck. Scientific American. Febrero.
- Nakamoto T, Ishida H, Moriizumi, T (1999) A sensing system for odor plumes. Analytical Chemistry. Agosto:531-537.
- Office of Animal Care and Use, The (2003) <http://oacu.od.nih.gov/index.htm>
- Ogilvie DM, Stinson RH (1966) Temperature selection in *Peromyscus* and laboratory mice, *Mus musculus*. J Mammal. Noviembre;47(4):655-60.
- Pacheco-Cobos L (2003^a) Termotaxis en conejos neonatos (*Oryctolagus cuniculus*) expuestos a distintos gradientes térmicos. Tesis de licenciatura en biología Facultad de Ciencias, UNAM.
- Pacheco-Cobos L, Rosetti M, Hudson R (2003^b) To stay or not to stay: The contribution of tactile and thermal cues to coming to rest in newborn rabbits. J Comp Physiol A 189:383-389.
- Piña, B (2003) Programa simulador de estrategias reproductivas GALATEA. Tesis de licenciatura en biología. Facultad de Ciencias, UNAM. (en preparación).
- Resnick M (1993) Behavior construction kits. Communications of the AMC (36)7:68-71.
- Resnick M, Martin F, Sargent R, Silverman B (1996) Programmable bricks: Toys to think with. IBM systems Journal (35) 3&4: 443-451.
- Rucci M, Edelman GM, Wray J (1999) Adaptation of orienting behavior: From the barn owl to a robotic system. IEEE Transactions on Robotics and Automation (15)1:96-110.
- Satinoff E, McEwen GN Jr, Williams BA (1976) Behavioral fever in newborn rabbits. Science. Septiembre 17;193(4258):1139-40.

- Siegel S, Castellan N (1998) Estadística no paramétrica: aplicada a las ciencias de la conducta. 4ª edición, Trillas, Mexico D.F.
- Srinivasan MV (1994) An image interpolation technique for the computation of optic flow and egomotion. *Biol Cybern* 71:401-415.
- Srinivasan MV, Zhang SW, Chahl JS, Barth E, Venkatesh S (2000) How honeybees make grazing landings on flat surfaces. *Biol Cybern* 83:171-183.
- Srinivasan MV, Zhang SW, Chahl JS (2001) Landing strategies in honeybees, and possible applications to autonomous airborne vehicles. *Biol Bull* 200:216-221.
- Stricklin WR, de Bourcier P, Zhou JZ, Gonyou HW (1998) Artificial pigs in space: using artificial intelligence and artificial life techniques to design animal housing. *J Anim Sci Oct*;76(10):2609-13
- Sviderskii VL (1973) Functional characteristics of neurons in the insect central nervous system *Usp Sovrem Biol*. Julio-Agosto;76(4):145-56.
- Tsalik EL, Hobert O (2003) Functional mapping of neurons that control locomotory behavior in *Caenorhabditis elegans*. *J Neurobiol*. Agosto 56(2):178-97
- Tunstel E (2001) Ethology as an inspiration for adaptive behavior synthesis in autonomous planetary rovers. *Autonomous Robots*. 11:333-339.
- Walker VA, Peremans H, Hallam JTC (1998) One tone, two ears, three dimensions: A robotic investigation of pinnae movements used by rhinolophid and hipposiderid bats. *J. Acoust. Soc. Am.* 104(1):569-579.
- Ward S (1973) Chemotaxis by the nematode *Caenorhabditis elegans*: Identification
- Ward M (1999) *Virtual Organisms*. New York: St Martin Press.
- of attractants and análisis of the response by use of mutants. *Proc Natl Acad Sci USA* 40:817-821.
- Watts JM (1998) Animats: computer-simulated animals in behavioral research. *J Anim Sci Oct*;76(10):2596-604
- Weisstein, E (2003) "Random Walk" Eric Weisstein's World of Mathematics. <http://mathworld.wolfram.com/RandomWalk.html>
- Webb B (1996) A cricket robot. *Scientific American*. Diciembre 94-99.
- Webb B (1999) A framework for models of biological behavior. *Int J Neural Syst* Octubre;9(5):375-81
- Webb B (2000) What does robotics offers behavior? *Animal Behavior* 60:545-558
- Webb B (2001) Can robots make good models of biological behavior?. *Behavioral and Brain Sciences* (24)6:1033-1050.

- Webb B (2002) Robots in invertebrate neuroscience. *Nature* (417) Mayo 16:359-363.
- Wenner AM (1967^a) Honey bees: do they use the distance information contained in their dance maneuver? *Science* Febrero 17;155(764):847-9.
- Wenner AM, Johnson DL. (1967^b) Honeybees: do they use direction and distance information provided by their dancers? *Science* Noviembre ;158(804):1072-7.
- Wenner AM, Wells PH, Johnson DL. (1969) Honey bee recruitment to food sources: olfaction or language? *Science*. Abril 4;164(875):84-6.
- White J, Southgate E, Thompson N, Brenner S (1986) The structure of the nervous system of *C. Elegans*. *Phi Trans R Soc London*. 314:1-340.
- Wiener N (1948) *Cybernetics*. New York: The Technology Press, John Wiley & Sons.
- Zill NS, Seyfarth E (1996) Exoskeletal sensors for walking. *Scientific American* (Julio) 86-90.

Apéndice 14.1

Sobre la evaluación de los modelos biorrobóticos

La validez en el uso de modelos para explicar fenómenos biológicos, la utilidad relativa de los modelos construidos y la evaluación de los resultados obtenidos a partir de un modelo, son temas con poca unidad entre los autores de biorrobótica. En base a las posiciones de varios autores, Barbara Webb plantea una discusión sobre las dimensiones en las que deben ser evaluadas las características de los modelos biorrobóticos. A continuación se presenta un resumen de los argumentos de Barbara Webb y otros autores. (A partir de Webb 2000)

Relevancia biológica.

¿Está el sistema objetivo (blanco) claramente identificada? ¿El modelo genera hipótesis biológicas?

La relevancia biológica de un modelo esta dada por, hasta que punto, su intención consiste en representar un sistema biológico. Modelos que, en su inicio fueron biológicos, pueden haber sido desplazados tan lejos que es imposible conectar sus resultados con el sistema biológico que los inspiró y por ello son biológicamente irrelevantes. Para mantener la relevancia biológica en un sistema robot es importante tener un sistema biológico objetivo (blanco) preciso. El conocimiento del sistema biológico decidirá que construir y como construirlo, con la ayuda de investigadores del campo biológico que generalmente, un proyectos de biorrobótica debe incorporar. Así como en la construcción se incorpora información biológica, es crucial para la relevancia de un modelo biorrobótico que sus resultados puedan generar hipótesis biológicas.

Nivel

¿Cuáles son las unidades básicas del modelo?

El nivel de un modelo indica la jerarquía de niveles físicos o de procesamiento que un modelo puede intentar representar. En biología, los niveles de explicación pueden ir desde los desde átomos hasta las sociedades. El nivel no esta relacionado con la relevancia biológica. Un modelo nos da más información biológica solo por aumentar el numero de niveles en el modelo incluyendo por ejemplo mecanismos de niveles menores. Los niveles que usualmente se hallan modelados en biorrobótica son la transducción sensorial, el control motor o el procesamiento central. Los modelos biorobots requieren

específicamente de la integración de distintos niveles de explicación, por su énfasis en obtener del modelo un sistema que presente conducta. El contexto de la conducta de un organismo, siempre incluida en un modelo robot, actúa en contra de la tendencia de los estudios biológicos de perder de vista el contexto en estudios detallados de las partes de los mecanismos subyacentes. Algunos de los resultados más interesantes de la biorrobótica son demostraciones de cómo hipótesis de control sencillas al ser expuestas al ambiente, parecen ser suficiente para explicar lo que aparentemente son conductas complejas.

Generalidad

¿Cuántos sistemas blanco platea el modelo?

La generalidad de un modelo es mayor entre se pueda aplicar a más sistemas del mundo real. Sin embargo, existe gran discusión acerca de cómo llegar a obtener, si es que se puede obtener, un modelo general. Un problema en buscar generalidad, es que a medida que esta aumenta, la relevancia disminuye. Si distintos animales se comportan de distinta manera, un modelo que intente generalizar su conducta tendrá una relevancia mínima, pues no podrá hacer hipótesis sobre la conducta particular de ninguno de los animales. Una estrategia es tratar de entender sistemas específicos, de los que emergerán mecanismos más generales, si es que existen. En biorrobótica, los robots más exitosos son aquellos que modelan sistemas específicos, como conductas particulares de organismos particulares. Si existen factores importantes en una integración sensorimotora específica, para entender correctamente las bases de la conducta es necesario modelar las especificaciones del sistema en detalle suficiente.

Abstracción

¿Cuántos elementos y procesos del objetivo están incluidos en el modelo?

La abstracción involucra el número y complejidad de procesos incluidos en el modelo; un estudio más detallado producirá un modelo menos abstracto. La abstracción no es solo una medida de la simplicidad o complejidad del modelo sino su complejidad relativa al objeto de estudio. Cierta grado de abstracción necesariamente sucederá en la construcción de un modelo, pues por definición un modelo es la simplificación de un sistema para entenderlo mejor. Es justamente mediante la abstracción que los modelos se hacen útiles. Sin embargo, la abstracción contiene riesgos, como negar los efectos de alguna variable importante para el modelo. Además, la relevancia de un modelo se puede

disminuir por abstraer un modelo demasiado lejos del problema biológico. Se podría considerar que en la biorrobótica, para obtener modelos de mayor relevancia biológica debemos igualar el detalle en el organismo al detalle en el robot. Sin embargo, en la biorrobótica se han implementado distintas abstracciones, en relación con la construcción de robots. Existen modelos que contienen complejos sensores, pero utilizan desplazamientos de un motor de dos ruedas y no efectores de la misma complejidad. También existen modelos cuyo ambiente es muy complejo y otros con ambientes simplificados especialmente contruidos para el robot. Para evitar abstracciones intrínsecas a las limitaciones tecnológicas, se debe asegurar que las suposiciones que llevan a la abstracción están claras y justificadas. El nivel de abstracción, pues, queda a discreción del modelador y la representación del proceso y no de la naturaleza del proceso.

Certeza Estructural

¿Es el modelo una verdadera representación del objetivo?

La precisión es que tan fielmente los mecanismos del modelo reflejan los mecanismos reales del sistema biológico. No solo se debe producir la conducta observada en el sistema biológico sino que debe realmente reflejar la manera en que el sistema biológico opera para producir esta conducta (Zeigler *In* Webb 2001). Las imprecisiones de un modelo no deben afectar la confianza en el uso de del modelo para hacer inferencias sobre el sistema real (Rykel *In* Webb 2001). Si se conocen las suposiciones, el investigador puede determinar como y cuanto influyen en producir imprecisiones. (Ackroff *In* Webb 2001). Si el objetivo de la biorrobótica fuera obtener modelos con la precisión más alta posible, los sistemas existentes pueden ser criticados por varias razones. La mayoría de los sensores y efectores no son directamente comprables a los biológicos pues difieren en capacidad, precisión, rango, tiempo de respuesta, etc. Incluso en el proceso de hacer hipótesis suficientemente precisas para la implementación se requiera un número suposiciones que seguramente van más allá de lo que se sabe en biología. Por ello, el objetivo consiste en construir un sistema que logre conectar acción y sensación para lograr una conducta en el ambiente, incluso si esto limita la precisión individual de las partes particulares del modelo, por substituciones o interpolaciones.

Parecido

¿Hasta qué punto el modelo se comporta como el objetivo?

Al intentar una comparación directa entre un la conducta de un modelo y la conducta biológica existe demasiada variabilidad en relación con la naturaleza del parecido entre las conductas. ¿Que criterios existen para probar la similitud? ¿Se espera un pareció cualitativo o cuantitativo? ¿Puede el modelo reproducir o predecir datos? Como en cualquier otro modelo, una conducta similar no es suficiente para probar la similitud de los mecanismos. Sin embargo, con un modelo que no se comporta como el sistema biológico, podemos rechazar la hipótesis que llevo al modelo. De la misma manera, si el modelo corresponde con la conducta natural, la hipótesis tiene el apoyo por la improbabilidad que esa misma conducta pueda ser generada por causas distintas. Sin embargo, la comparación del modelo y la del sistema biológico puede ser tan complicada que sea imposible aplicar cualquiera de las opciones arriba mencionadas. La biorrobótica una tendencia es intentar repetidos experimentos con el mismo el mismo organismo y el mismo estímulo en distintas configuraciones.

Medio

¿De qué está construida la simulación?

En la biorrobótica se intentan probar hipótesis en un medio físico. La implementación de una hipótesis en hardware impone la necesidad de que todas las partes del sistema funcionen juntas produciendo un *output* real. Estudiar la integración sensorial y la respuesta utilizando robots tiene sentido porque tanto los robot como los organismos deben enfrentarse al mundo físico. Utilizar un medio físico para modelar requiere asegurar que las propiedades físicas del robot son suficientemente similares a los del animal involucrado en la pregunta biológica. Una parte esencial del problema esta en entender la conducta es conocer las condiciones ambientales en las que se ejecuta, así como sus límites y oportunidades. Por estas razones quedan descartados de la biorrobótica las simulaciones en software. Quinn & Espenscheid (*In* Webb 2001) resumen esto "Incluso en las simulaciones (computacionales) algunos efectos potencialmente importantes pueden ser negados, ignorado o modelado incorrectamente. Frecuentemente no es razonablemente el atender tomar en cuenta la complejidad y imprectibilidad del mundo real"

(Revisado en Webb B (2001) Can robots make good models of biological behavior? Behavioral and Brain Sciences (24)6:1033-1050.)

Apéndice 14.2

		Anillo 1		Anillo 2		Anillo 3		Anillo 4		
		Grad InP		(2-3,2-2,2-1)		(3-4,3-3,3-2)		(4-3,4-4)		
		(1-2,1-1)								
Northbound	+	Nosebound	12	80	23	88	53	69		
		Sidebound	1	7	3	12	14	18		
		Tailbound	2	13	0	0	10	13		
		Totales	15		26		77			
Nobound	0	Nosebound	4	44	13	57	44	46	107	44
		Sidebound	1	11	8	35	28	29	79	33
		Tailbound	4	44	2	9	23	24	56	23
		Totales	9		23		95		242	
Southbound	-	Nosebound			0	0	7	24	28	35
		Sidebound			7	47	11	38	29	36
		Tailbound			8	53	11	38	24	30
		Totales			15		29		81	

		Anillo 1		Anillo 2		Anillo 3		Anillo 4		
		Ctrl InP		(2-3,2-2,2-1)		(3-4,3-3,3-2)		(4-3,4-4)		
		(1-2,1-1)								
Northbound	+	Nosebound	20	65	30	61	38	66		
		Sidebound	7	23	12	24	15	26		
		Tailbound	4	13	7	14	5	9		
		Totales	31		49		58			
Nobound	0	Nosebound	60	68	28	54	20	33	62	35
		Sidebound	9	10	19	37	28	46	57	32
		Tailbound	19	22	5	10	13	21	58	33
		Totales	88		52		61		177	
Southbound	-	Nosebound			7	25	17	39	33	62
		Sidebound			10	36	15	34	10	19
		Tailbound			11	39	12	27	10	19
		Totales			28		44		53	

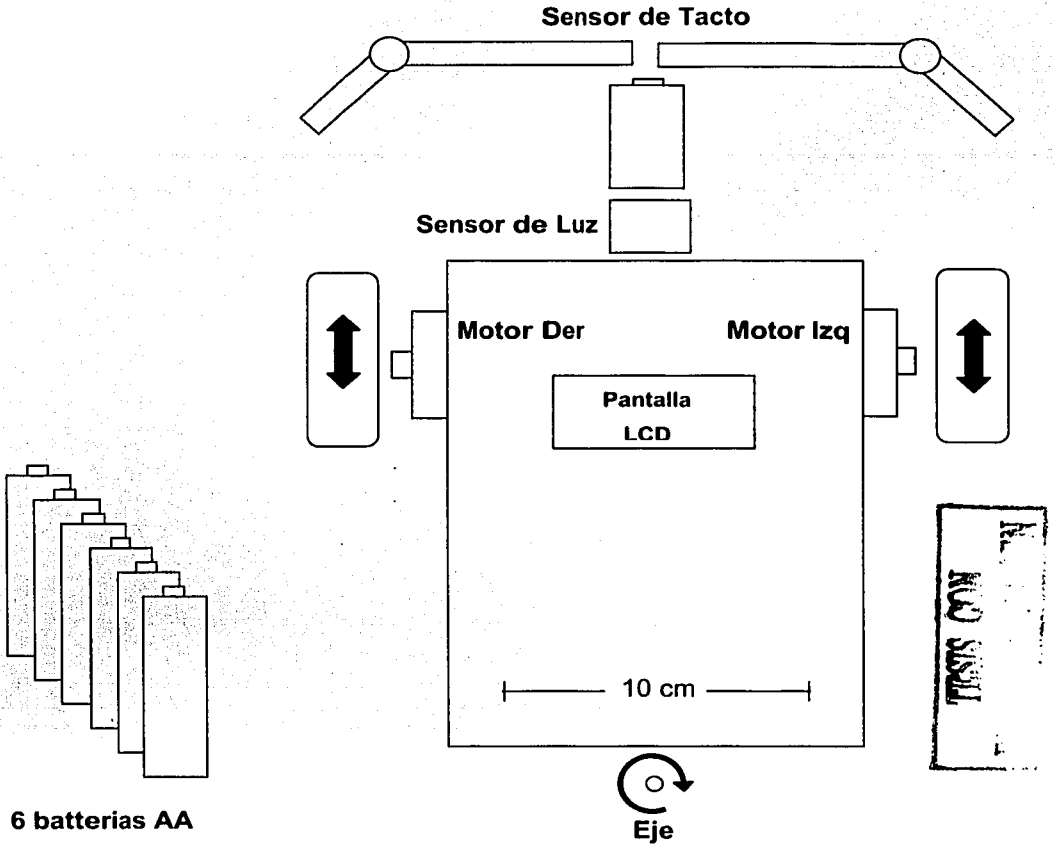
TRIS COM
FALLA DE ORIGEN

		Anillo 1	Anillo 2	Anillo 3	Anillo 4					
		Grad InC	(1-2,1-1)	(2-3,2-2,2-1)	(3-4,3-3,3-2)	(4-3,4-4)				
Northbound	+	Nosebound	12	80	23	88	53	69		
		Sidebound	1	7	3	12	14	18		
		Tailbound	2	13	0	0	10	13		
		Totales	15		26		77			
Nobound	0	Nosebound	4	44	13	57	44	46	107	44
		Sidebound	1	11	8	35	28	29	79	33
		Tailbound	4	44	2	9	23	24	56	23
		Totales	9		23		95		242	
Southbound	-	Nosebound			0	0	7	24	28	35
		Sidebound			7	47	11	38	29	36
		Tailbound			8	53	11	38	24	30
		Totales			15		29		81	

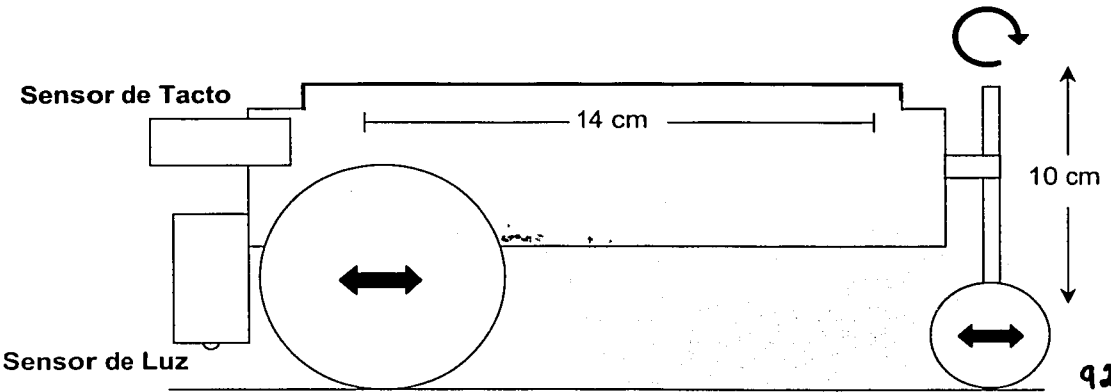
		Anillo 1	Anillo 2	Anillo 3	Anillo 4					
		Ctrl InC	(1-2,1-1)	(2-3,2-2,2-1)	(3-4,3-3,3-2)	(3-4,4-4)				
Northbound	+	Nosebound	36	62	14	45	16	48		
		Sidebound	12	21	9	29	8	24		
		Tailbound	10	17	8	26	9	27		
		Totales	58		31		33			
Nobound	0	Nosebound	171	74	21	48	28	54	54	56
		Sidebound	33	14	12	27	11	21	19	20
		Tailbound	28	12	11	25	13	25	24	25
		Totales	232		44		52		97	
Southbound	-	Nosebound			28	46	22	58	21	58
		Sidebound			18	30	4	11	6	17
		Tailbound			15	25	12	32	9	25
		Totales			61		38		36	

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Apéndice 14.3



6 baterias AA



Apéndice 14.4

Programa Termotaxia

```
/* Termotaxia Version 1.97 en NQC
Autor: Marcos Rosetti
Fecha Miercoles 21 de Abril 2003
*/
// Definiciones: Macros de Conductas
// Fwd = 1,1 x 30s
#define go_nose OnFwd(OUT_A); OnFwd(OUT_C); SetPower(OUT_A, 1); SetPower(OUT_C, 1); Wait (15);
// Strait Back = -1,-1 x 25s
#define go_avoid_wall OnRev(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 1); SetPower(OUT_C, 1); Wait (15);
// Back = 2,-2 x 50s
#define go_tail OnFwd(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (70);
// Up Right = 3,-1 x 35s
#define go_nose_right OnRev(OUT_C); OnFwd(OUT_A); SetPower(OUT_A, 1); SetPower(OUT_C, 3); Wait (35);
// Up Left = -1,3 x 35s
#define go_nose_left OnFwd(OUT_C); OnRev(OUT_A); SetPower(OUT_A, 3); SetPower(OUT_C, 1); Wait (35);
// Turn Right = 2,2 x 35s
#define go_side_right OnFwd(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (30);
// Turn Left = 2,2 x 35s
#define go_side_left OnRev(OUT_A); OnFwd(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (30);
// Down Right = 4,1 x 70s
#define go_tail_right OnFwd(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (50);
// Down Left = -1,4 x 70s
#define go_tail_left OnRev(OUT_A); OnFwd(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (50);
// Stop = 0,0 x 5s
#define smooth_stop Float(OUT_A); Float(OUT_C); Wait(5);
// Def de variables
int sterror=4,pre_behavior, post_behavior, delta, behavior_code; // var. sensor
int ran, dir, on_quieto=0, sem=0, sensor_value; //var.control

task main()
{
  SetSensorType(SENSOR_1, SENSOR_TYPE_TOUCH);
  SetSensorType(SENSOR_1, SENSOR_MODE_BOOL);
  SetSensorType(SENSOR_2, SENSOR_TYPE_LIGHT); //Sensor 2 de Luz
  SetSensorMode(SENSOR_2, SENSOR_MODE_RAW); //Modo Raw, mas definición

  pre_behavior = SENSOR_2;

  start update;
  start avoid_wall;
  start quieto;
}

task update()
{
  ClearTimer(0);
  ClearTimer(1);
  CreateDatalog(1000);
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

start no_change;
start got_colder;
start got_warmer;

while (true)
{
while (sem == 0)
{
ra_ra_random();

AddToDatalog(Timer(0));
AddToDatalog(behavior_code);
AddToDatalog(pre_behavior);
AddToDatalog(ran);

post_behavior = pre_behavior;
sensor_value = SENSOR_2;
pre_behavior = sensor_value;

delta = post_behavior - pre_behavior;

if (delta <= sterror & delta >= -sterror) delta = 0;
if (delta > sterror) delta = 1;
if (delta < -sterror) delta = -1;

sem = 1;
}
}

sub ra_ra_random()
{
// Se debe modificar la semilla de ran en cada prueba

dir = Random(1);
ran = Random(193);

while (ran > 100) // ran siempre entre 0 y 100
{
ran = Random(193);
}
}

task no_change()
{
while (true)
{
while (sem == 1 & delta == 0)
{
if (ran >= 0 & ran <= 28)
{
go_nose;
go_nose;
smooth_stop;
}
}
}
}

```

```

behavior_code = 10;
sem=0; break;
}
else
{
if (ran >= 29 & ran <= 40)
{
go_tail;
smooth_stop;
behavior_code = 20;
sem=0; break;
}
else
{
if (ran >= 41 & ran <= 66)
{
if (dir == 0)
{
go_side_left;
smooth_stop;
behavior_code = 30;
sem=0; break;
}
if (dir == 1)
{
go_side_right;
smooth_stop;
behavior_code = 40;
sem=0; break;
}
}
}
else
{
if (ran >= 67 & ran <= 88)
{
if (dir == 0)
{
go_nose;
go_nose_right;
smooth_stop;
behavior_code = 50;
sem=0; break;
}
if (dir == 1)
{
go_nose;
go_nose_left;
smooth_stop;
behavior_code = 60;
sem=0; break;
}
}
}
else
{
if (dir == 0)

```



```
sem=0; break;
}
if (dir == 1)
{
go_side_right;
smooth_stop;
behavior_code = 44;
sem=0; break;
}
}
else
{
if (ran >= 56 & ran <= 74)
{
if (dir == 0)
{
go_nose;
go_nose_right;
smooth_stop;
behavior_code = 55;
sem=0; break;
}
if (dir == 1)
{
go_nose;
go_nose_left;
smooth_stop;
behavior_code = 66;
sem=0; break;
}
}
else
{
if (dir == 0)
{
go_tail_left;
go_nose;
smooth_stop;
behavior_code = 77;
sem=0; break;
}
if (dir == 1)
{
go_tail_right;
go_nose;
smooth_stop;
behavior_code = 88;
sem=0; break;
}
}
}
}
}
}
}
```

```

}

task got_warmer()
{
  while (true)
  {
    while (sem == 1 & delta == -1)
    {
      if (ran >= 0 & ran <= 29)
      {
        go_nose;
        smooth_stop;
        behavior_code = 1;
        sem=0; break;
      }
      else
      {
        if (ran >= 30 & ran <= 34)
        {
          go_tail;
          smooth_stop;
          behavior_code = 2;
          sem=0; break;
        }
        else
        {
          if (ran >= 35 & ran <= 53)
          {
            if (dir == 0)
            {
              go_side_left;
              smooth_stop;
              behavior_code = 3;
              sem=0; break;
            }
            if (dir == 1)
            {
              go_side_right;
              smooth_stop;
              behavior_code = 4;
              sem=0; break;
            }
          }
          else
          {
            if (ran >= 54 & ran <= 94)
            {
              if (dir == 0)
              {
                go_nose;
                go_nose_left;
                smooth_stop;
                behavior_code = 5;
                sem=0; break;
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}

```



```

if (on_quieto == 0 && pre_behavior >= 760)
{
on_quieto = 1;
ClearTimer(1);
}
else
{
if (Timer(1) >= 1000 && pre_behavior >= 760)
{
AddToDatalog(Timer(1));
AddToDatalog(pre_behavior);
PlaySound(SOUND_DOUBLE_BEEP);
StopAllTasks();
}
}
}
}
}

```

Apéndice 2b

Programa Control

/* Control Version 1.8 en NQC
Autor: Marcos Rosetti
Fecha Miercoles 8 de Mayo 2003

```

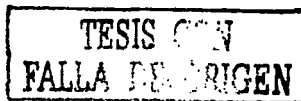
*/

// Definiciones: Macros de Conductas
// Fwd = 1,1 x 30s
#define go_nose OnFwd(OUT_A); OnFwd(OUT_C); SetPower(OUT_A, 1); SetPower(OUT_C, 1); Wait (15);
// Strait Back = -1,-1 x 25s
#define go_avoid_wall OnRev(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 1); SetPower(OUT_C, 1); Wait (15);
// Back = 2,-2 x 50s
#define go_tail OnFwd(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (70);
// Up Right = 3,-1 x 35s
#define go_nose_right OnRev(OUT_C); OnFwd(OUT_A); SetPower(OUT_A, 1); SetPower(OUT_C, 3); Wait (35);
// Up Left = -1,3 x 35s
#define go_nose_left OnFwd(OUT_C); OnRev(OUT_A); SetPower(OUT_A, 3); SetPower(OUT_C, 1); Wait (35);
// Turn Right = 2,2 x 35s
#define go_side_right OnFwd(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (30);
// Turn Left = 2,2 x 35s
#define go_side_left OnRev(OUT_A); OnFwd(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (30);
// Down Right = 4,1 x 70s
#define go_tail_right OnFwd(OUT_A); OnRev(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (50);
// Down Left = -1,4 x 70s
#define go_tail_left OnRev(OUT_A); OnFwd(OUT_C); SetPower(OUT_A, 2); SetPower(OUT_C, 2); Wait (50);
// Stop = 0,0 x 5s
#define smooth_stop Float(OUT_A); Float(OUT_C); Wait(5);

// Def de variables
int sterror=4, pre_behavior, post_behavior, delta, behavior_code; //sensor
int ran, dir, sem=0, sensor_value; //control

task main()
{
SetSensorType(SENSOR_1, SENSOR_TYPE_TOUCH);

```



```

SetSensorMode(SENSOR_1, SENSOR_MODE_BOOL);
SetSensorType(SENSOR_2, SENSOR_TYPE_LIGHT); //Sensor 2 de Luz
SetSensorMode(SENSOR_2, SENSOR_MODE_RAW); //Modo Raw, mas definición

pre_behavior = SENSOR_2;

start update;
start avoid_wall;
start quieto;

}

task update()
{
ClearTimer(0);
CreateDatalog(1250);

start no_change;

while (true)
{
while (sem == 0)
{
ra_ra_random();

AddToDatalog(Timer(0));
AddToDatalog(behavior_code);
AddToDatalog(pre_behavior);
AddToDatalog(ran);

post_behavior = pre_behavior; sensor_value = SENSOR_2; pre_behavior = sensor_value;
sem = 1;
}
}
}

sub ra_ra_random()
{
// Se debe modificar la semilla de ran en cada prueba

dir = Random(1);
ran = Random(199);

while (ran > 100) // ran siempre entre 0 y 100
{
ran = Random(199);
}
}

task no_change()
{
while (true)
{
while (sem == 1)
{

```

TESIS
FALLA LA PAGINA

```

if (ran >= 0 & ran <= 25)
{
  go_nose;
  go_nose;
  smooth_stop;
  behavior_code = 10;
  sem=0; break;
}
else
{
  if (ran >= 26 & ran <= 36)
  {
    go_tail;
    smooth_stop;
    behavior_code = 20;
    sem=0; break;
  }
  else
  {
    if (ran >= 37 & ran <= 68)
    {
      if (dir == 0)
      {
        go_side_left;
        smooth_stop;
        behavior_code = 30;
        sem=0; break;
      }
      if (dir == 1)
      {
        go_side_right;
        smooth_stop;
        behavior_code = 40;
        sem=0; break;
      }
    }
  }
  else
  {
    if (ran >= 69 & ran <= 87)
    {
      if (dir == 0)
      {
        go_nose;
        go_nose_right;
        smooth_stop;
        behavior_code = 50;
        sem=0; break;
      }
      if (dir == 1)
      {
        go_nose;
        go_nose_left;
        smooth_stop;
        behavior_code = 60;
        sem=0; break;
      }
    }
  }
}

```

TBSIC
FALL: 17 1953

```

    }
  }
  else
  {
    if (dir == 0)
    {
      go_tail_left;
      go_nose;
      smooth_stop;
      behavior_code = 70;
      sem=0; break;
    }
    if (dir == 1)
    {
      go_tail_right;
      go_nose;
      smooth_stop;
      behavior_code = 80;
      sem=0; break;
    }
  }
}
}
}
}

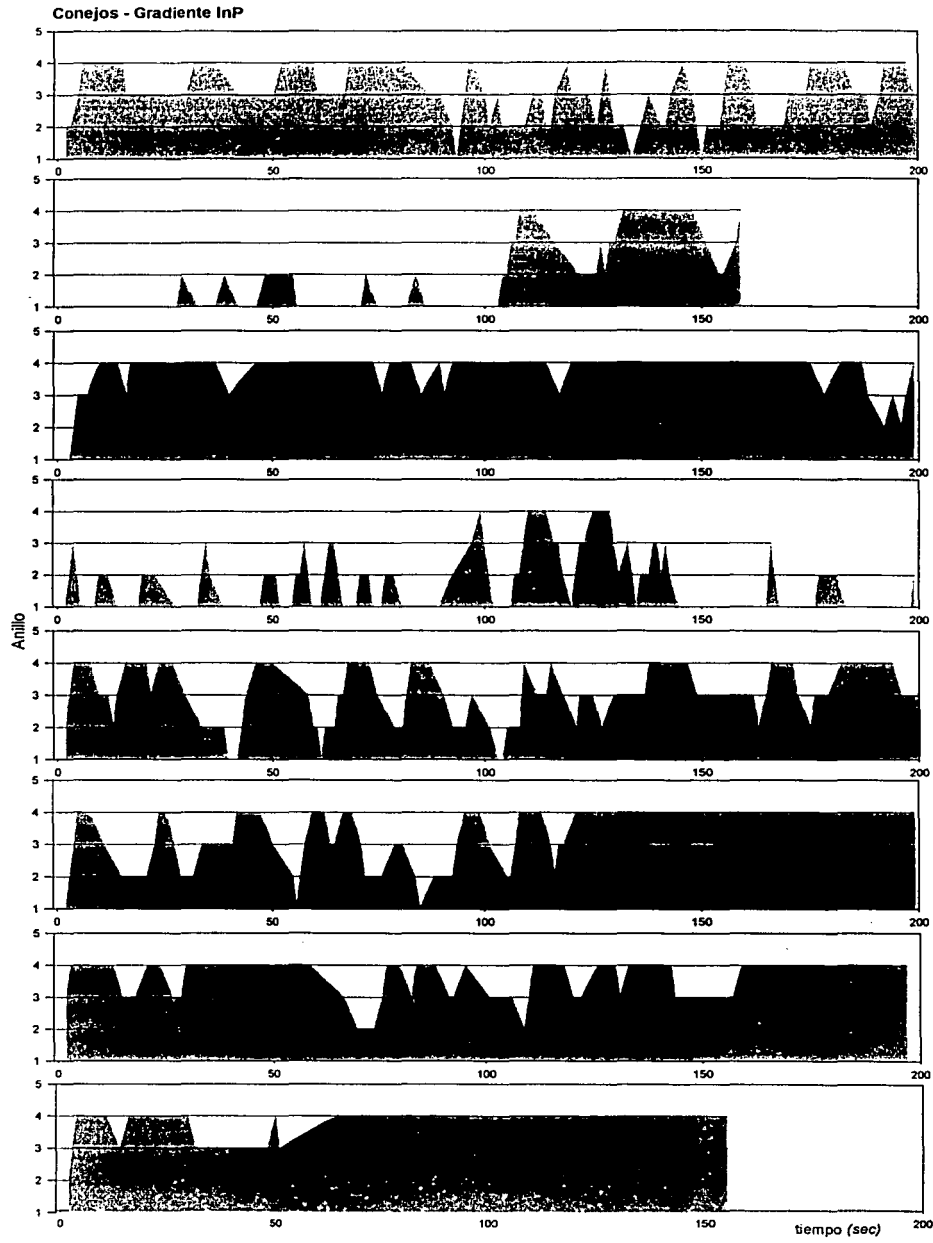
task avoid_wall()
{
  while (true)
  {
    while (SENSOR_1 == 1)
    {
      go_avoid_wall;
      if (dir == 0)
      {go_side_left; smooth_stop;}
      if (dir == 1)
      {go_side_right; smooth_stop;}
    }
  }
}

task quieto()
{
  while (true)
  {
    if (Timer(0) >= 2000)
    {
      AddToDatalog(Timer(0));
      PlaySound(SOUND_DOUBLE_BEEP);
      StopAllTasks();
    }
  }
}
}

```

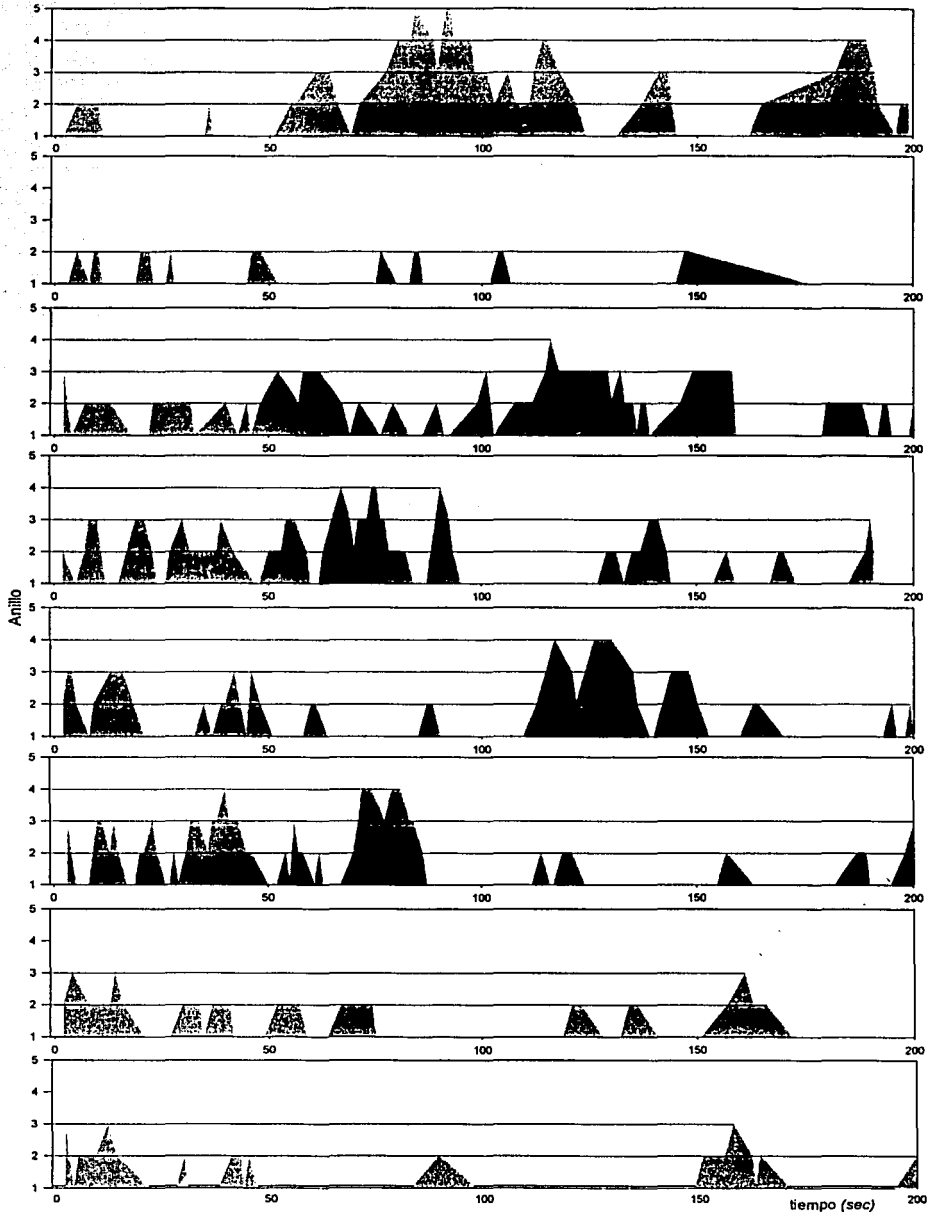
TES
 FALL GEN

Apéndice 14.5^a



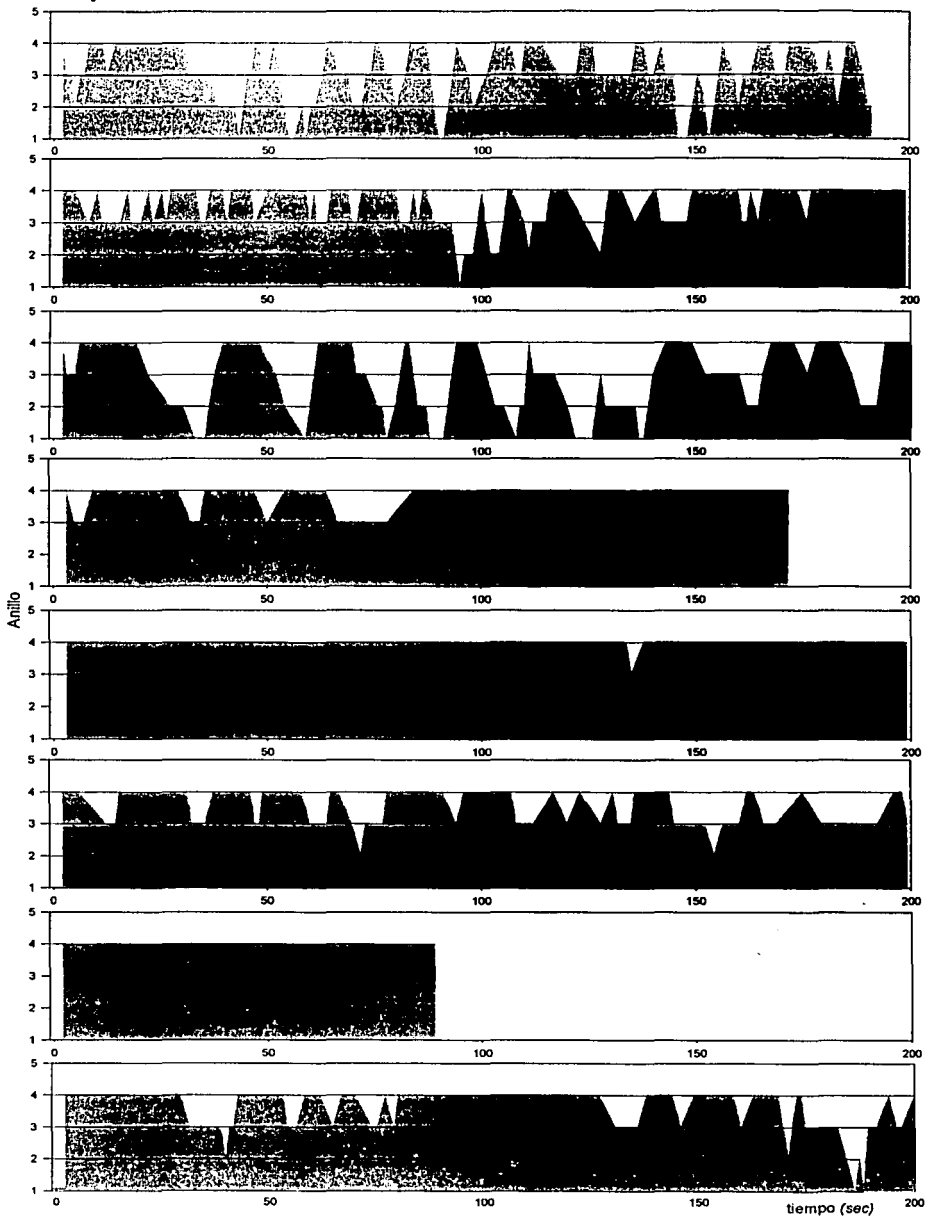
TESIS CON
FALTA DE CONTEN

Conejos - Control InP



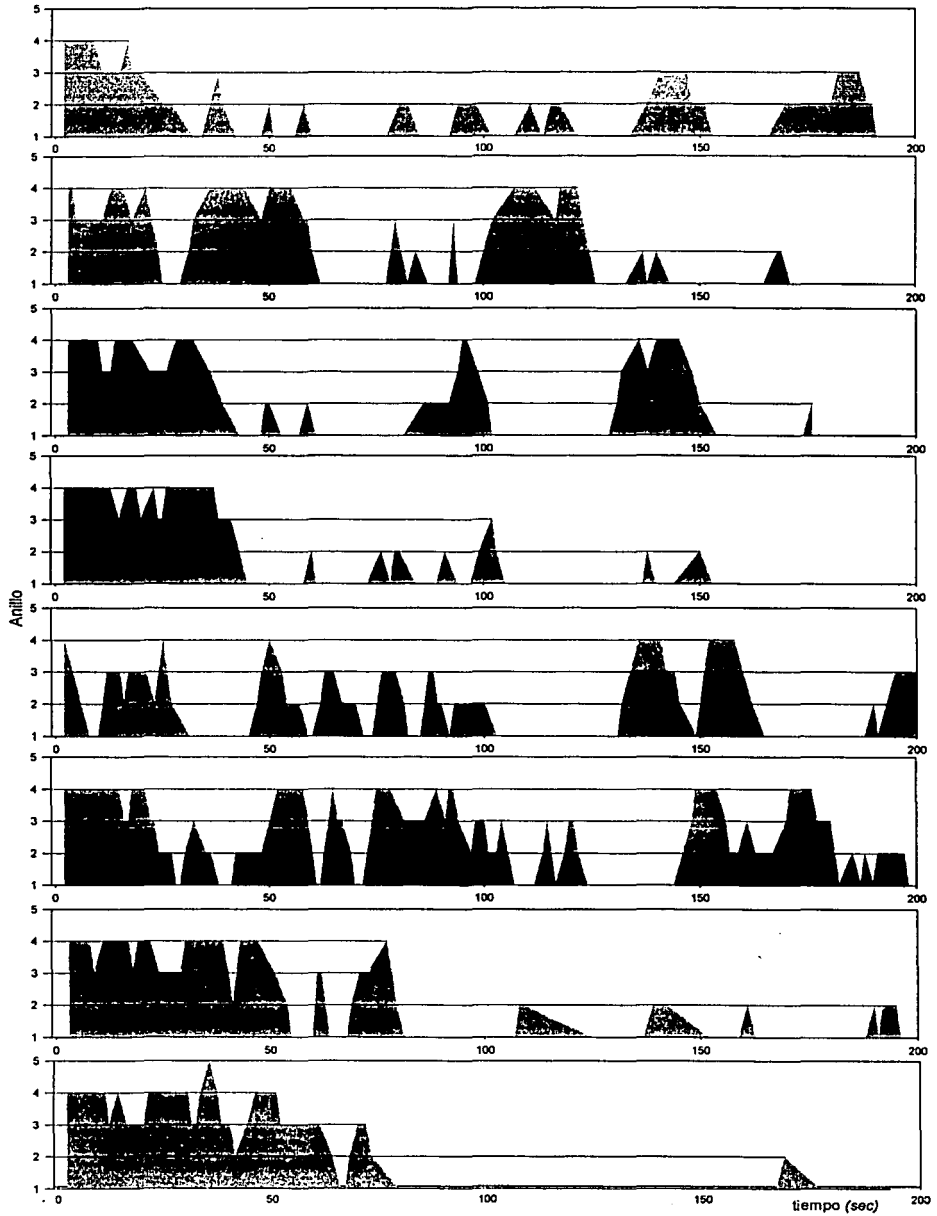
TESIS CON
FALLA DE CORTEN

Conejos - Gradiente InC



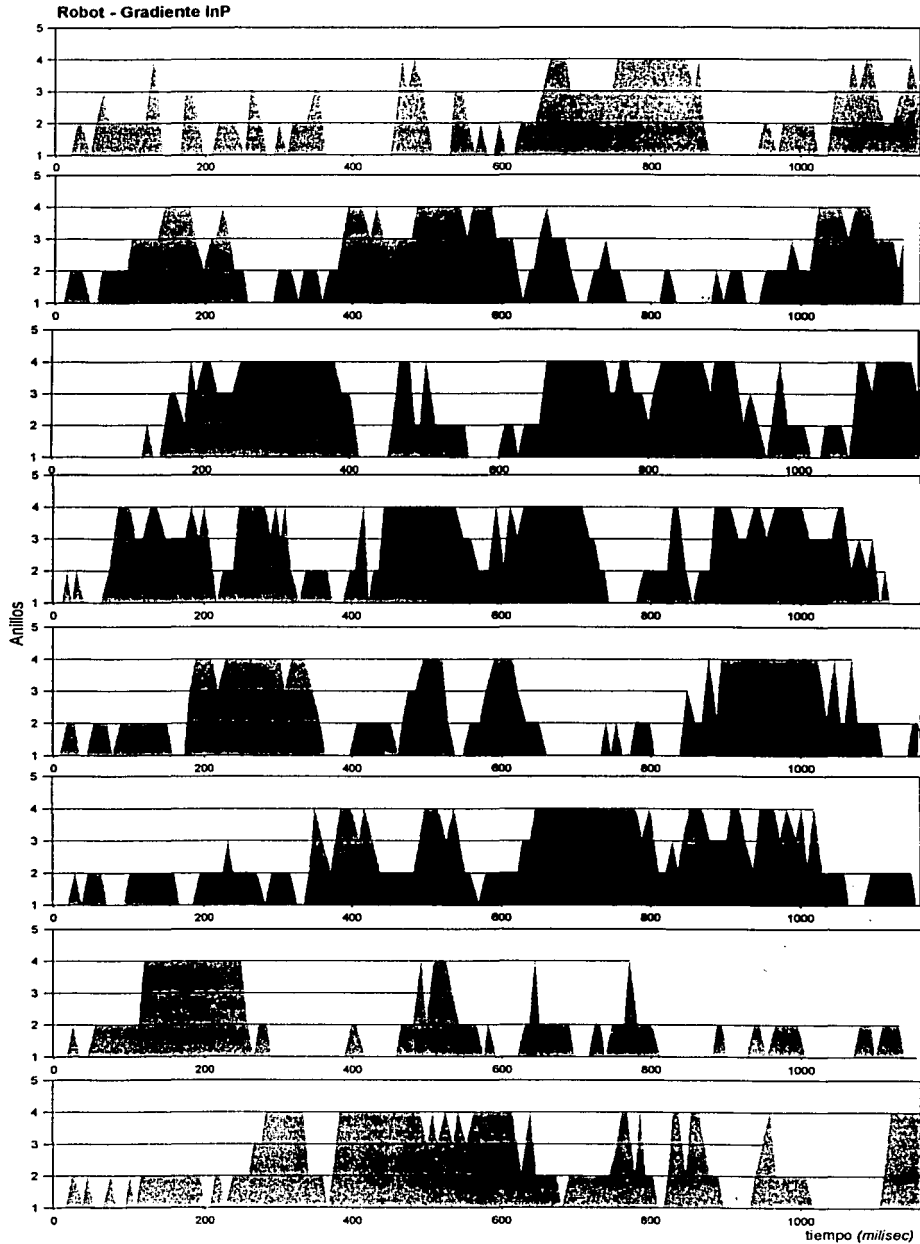
TESIS CON
PALA DE ORO

Conejos - Control InC



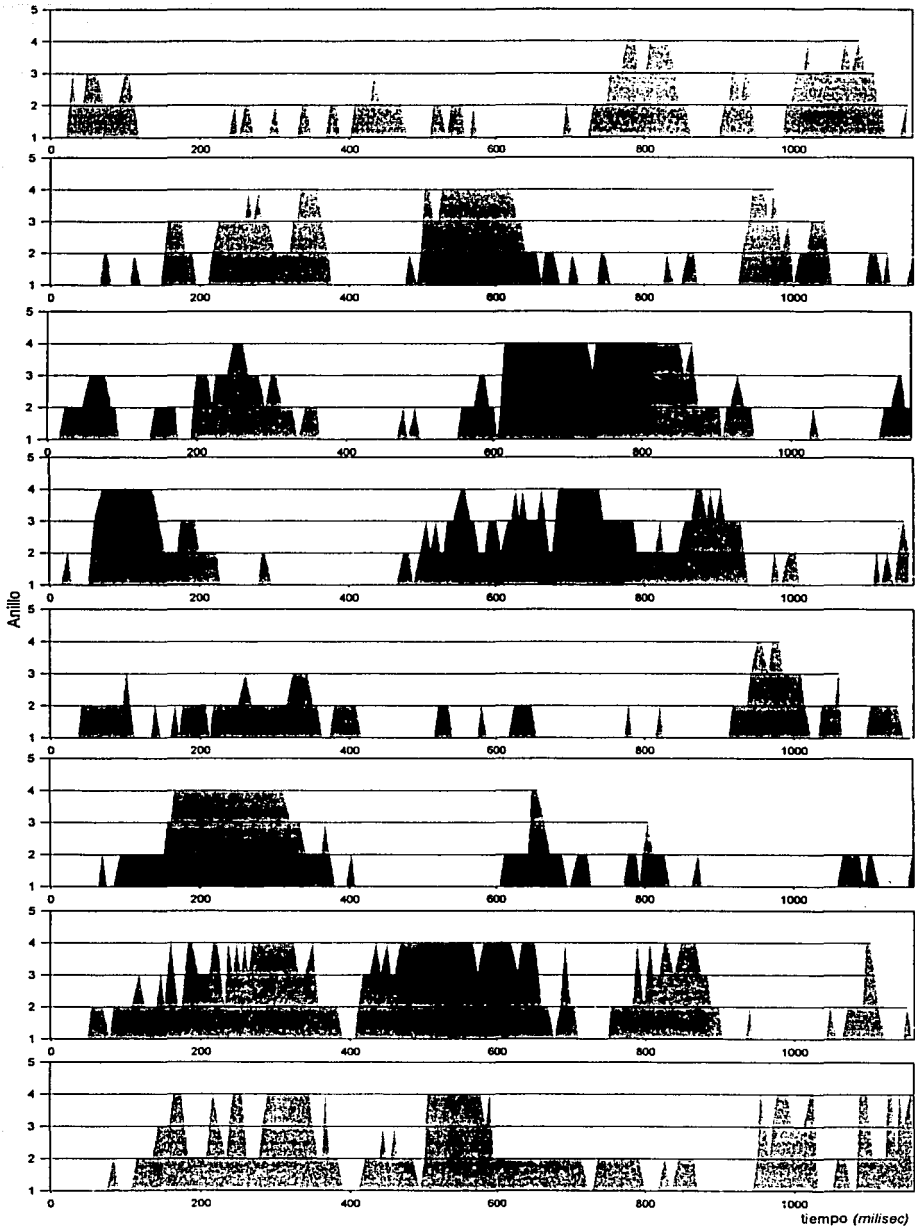
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Apéndice 14.5^b



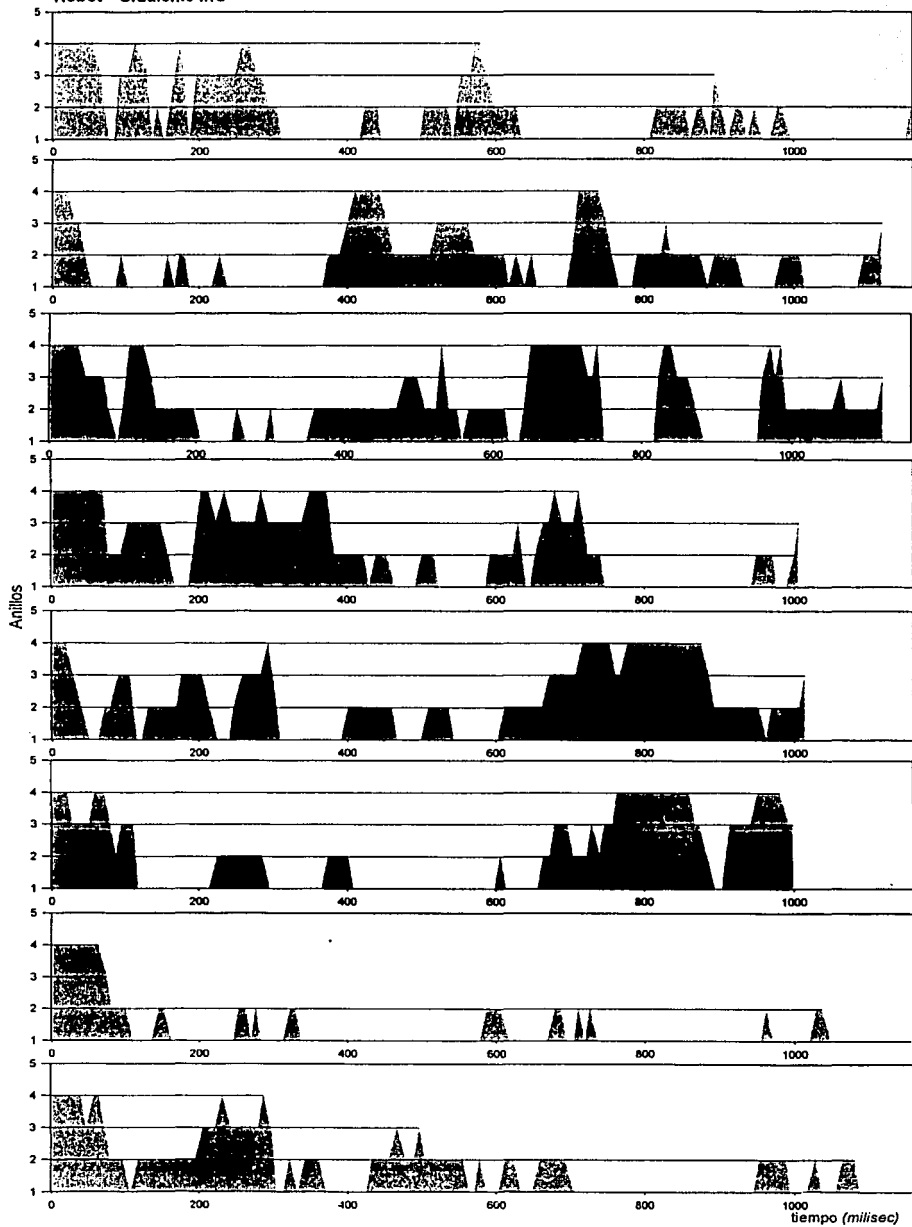
TESIS CON
PALMA

Robot - Control InP



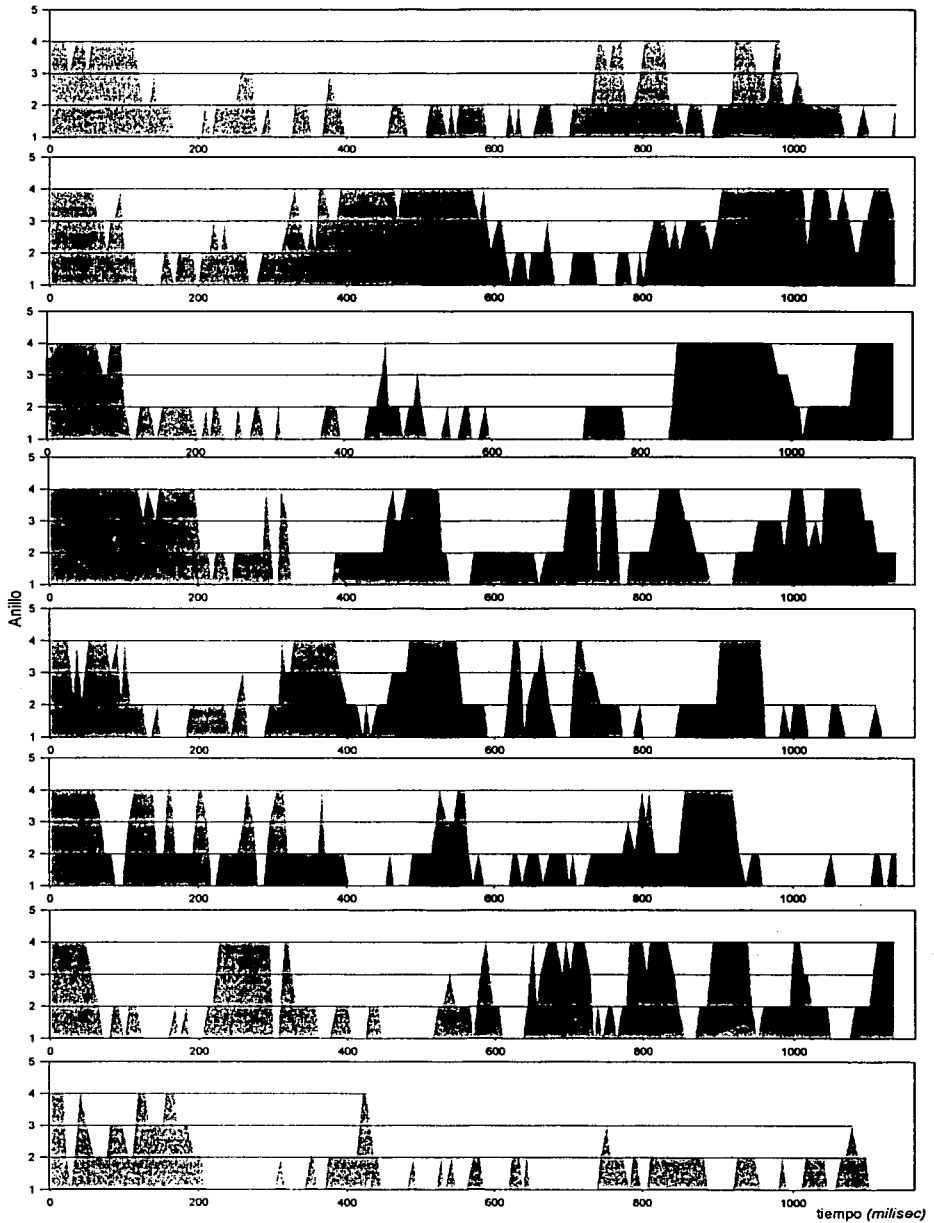
TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

Robot - Gradiente InC



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Robot - Control InC



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN