

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Facoltà di Scienze della Comunicazione e dell'Economia

Corso di Laurea Specialistica in Economia e Gestione delle Reti e dell'Innovazione

Economia della Complessità

Prof. David Avra LANE

Anno Accademico 2004/05

**Oltre le reti neurali
senso-motorie:**

***gli effetti del rumore
nell'apprendimento di task
complessi da parte di reti neurali
ecologiche che evolvono tramite
algoritmo genetico***

di:
Fabio Ruini
(matricola 7496)

Abstract

Questo lavoro si pone l'obiettivo di indagare un fenomeno, molto specifico ma potenzialmente estendibile ad ambiti più ampi, osservato durante l'elaborazione di un modello simulativo mirato all'evoluzione di comportamenti "depressivi" all'interno di popolazioni di reti neurali alle prese con task "complessi".

Ciò che si è notato è che l'introduzione di rumore, sia di tipo "direzionato" (utilizzo questo termine, che spiegherò in seguito, per evidenziare la differenza di questo tipo di rumore rispetto al più tradizionale "white noise", spesso inteso nel senso di "gaussian noise") che casuale, in input a reti neurali ecologiche che evolvono per via genetica, sembra produrre, perlomeno in un caso molto specifico come quello qui trattato, degli evidenti miglioramenti della performance media nell'esecuzione dei task cui queste reti neurali sono preposte.

Descrizione "quantitativa" del modello

L'ambiente all'interno del quale si svolge la simulazione è un mondo discreto, non-toroidale, formato da una matrice quadrata di 225 celle (15 per lato). Ciascuna di queste celle può essere "vuota", oppure contenere al suo interno un'unità di cibo.

All'interno di questo ambiente è presente un organismo, che a sua volta occupa lo spazio di una cella, il quale si muove con lo scopo di raccogliere quante più unità di cibo possibile. Ogni volta che l'organismo finisce su una cella contenente un'unità di cibo, infatti, questo cibo scompare. Esso viene "mangiato" dall'organismo.

Di tanto in tanto, sulla scena compare un altro tipo di agente. Si tratta di un predatore, che occupa a sua volta lo spazio di una cella ed il cui comportamento lo porta ad ignorare completamente il cibo, concentrandosi esclusivamente sull'organismo allo scopo di "catturarlo". La "cattura" ha luogo quando, in seguito ad un movimento (compiuto da uno qualsiasi dei due agenti della simulazione), organismo e predatore si trovano a stazionare sulla medesima cella.

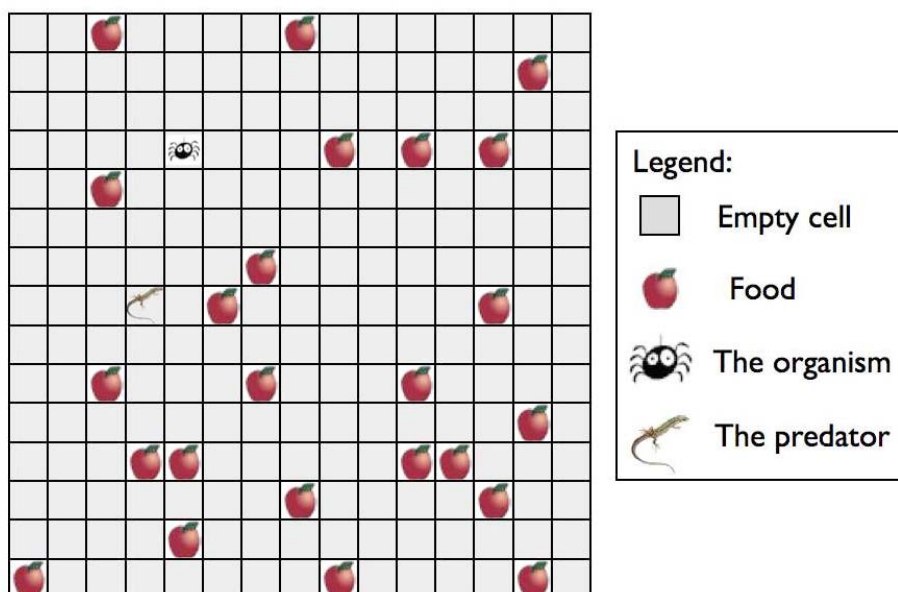


Figura 1 – Un esempio dell'ambiente all'interno del quale si svolge la simulazione. In questo caso nell'ambiente sono presenti 25 unità di cibo e convivono sia l'organismo che il predatore.

Gli organismi non condividono un medesimo schema comportamentale. Alcuni sono più efficienti nella ricerca di cibo, mentre altri risultano più abili ad eseguire il compito di fuggire dal predatore. Scopo di ciascun organismo è comunque quello di riuscire a miscelare in maniera efficiente l'esecuzione dei due task.

L'architettura neurale dell'organismo

Il comportamento dell'organismo è governato da una rete neurale di tipo feed-forward, strutturata in quattro neuroni di input (due relativi all'informazione sensoriale sull'unità di cibo più vicina, due riguardanti invece il predatore), nove neuroni nello strato intermedio e due neuroni di output. La figura 2 mostra da un punto di vista grafico l'architettura neurale in questione:

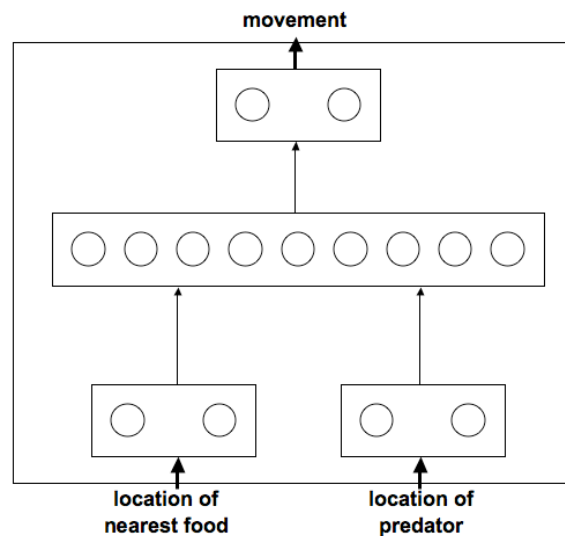


Figura 2 – Schema grafico della rete neurale che “modella” gli organismi.

Nel dettaglio, i quattro neuroni di input e i nove che costituiscono l'hidden layer sono di tipo continuo, mentre i due neuroni di output sono booleani e possono pertanto assumere i soli valori 0 o 1. I clusters neurali di input non hanno alcuna funzione di trasferimento; lo strato intermedio è dotato di una funzione di trasferimento sigmoidale, mentre l'output layer, per uniformarsi ai neuroni booleani che lo costituiscono, adotta invece una funzione di trasferimento a gradino.

In ciascun momento, nel corso della simulazione, l'organismo percepisce l'unità di cibo più ad esso più vicina. L'informazione sensoriale che riceve in ingresso alla sua rete neurale si divide in due categorie, ciascuna delle quali si traduce nel valore di attivazione di uno dei due neuroni relativi all'input del cibo:

- distanza: misurata attraverso la cosiddetta “distanza di Manhattan” (o “distanza del taxi”), viene calcolata a partire dalla cella in cui si trova l'organismo per arrivare alla cella all'interno della quale è contenuta l'unità di cibo. La formula per calcolare la distanza di Manhattan è la seguente:

$$M.D. = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

dove x_1 ed y_1 sono le coordinate dell'organismo, mentre x_2 ed y_2 sono le coordinate dell'unità di cibo in riferimento alla quale si sta misurando la distanza.

La figura 3 mostra graficamente alcuni esempi di calcolo della distanza di Manhattan tra due punti.

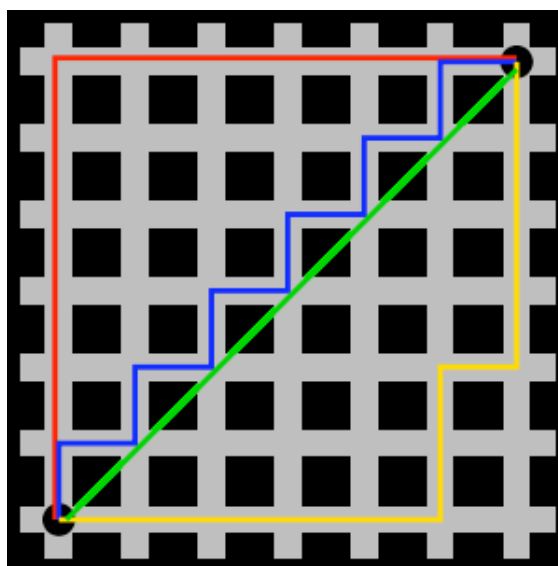


Figura 3 – Esempio di calcolo della distanza di Manhattan tra i due punti ai vertici opposti del reticolo. Le linee rossa, blu e gialla hanno tutte la stessa lunghezza (12). La linea verde rappresenta invece la distanza euclidea tra i due punti.

- angolo: misurato mediante il calcolo dell'arcotangente tra il punto in cui si trova l'organismo e quello in cui è situata l'unità di cibo. La figura 4 mostra un esempio del calcolo dell'arcotangente su di un piano cartesiano.

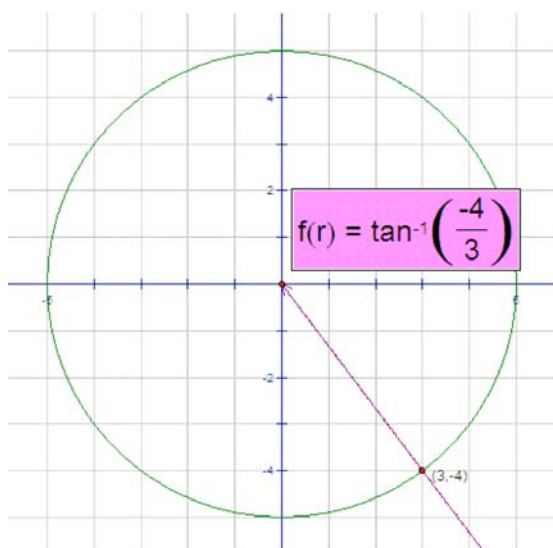


Figura 4 - Esempio di calcolo dell'arcotangente tra il punto di coordinate (0,0) e quello avente coordinate (3,-4).

Entrambi i valori, sia quello riferito alla distanza sia quello relativo all'angolo, una volta calcolati vengono normalizzati (seppur all'interno di due intervalli distinti: l'intervallo $[0,1]$ per quanto riguarda la distanza, l'intervallo $]0,1]$ per quel che concerne l'angolo) e quindi inseriti in input alla rete neurale.

Relativamente alla distanza, la normalizzazione avviene senza vincoli particolari. La distanza massima assume il valore 1, la minima il valore 0. Per quanto concerne invece l'angolo, la situazione è leggermente più complessa. L'organismo, oltre che da una propria posizione

nell'ambiente (identificata dalle coordinate x ed y), è contraddistinto da un certo orientamento spaziale. Esso può in sostanza essere rivolto verso uno qualunque dei quattro punti cardinali e ciò influenza la percezione dell'angolo che lo separa dalla più vicina unità di cibo.

La funzione $\text{atan2}()$ di C++, utilizzata per ottenere l'angolo tra il punto in cui si trova l'organismo e quello in cui è situata l'unità di cibo più vicina, restituisce come risultato il valore 0° se la posizione dell'unità di cibo ha la stessa coordinata x dell'organismo, ma un valore di y maggiore. Ciò che serve ai nostri fini è che il valore restituito da $\text{atan2}()$ sia relativo all'orientamento dell'organismo. Se scegliamo, per convenzione, che il valore 0 debba riferirsi ad una "cosa" (unità di cibo o predatore) che si trova "di fronte" all'organismo (vedi figura 5), quando quest'ultimo è rivolto verso est risulta allora sufficiente fornire direttamente in input alla rete neurale il valore (post-normalizzazione) restituito dalla suddetta funzione. Negli altri casi occorre invece "adattare" il valore ottenuto all'orientamento dell'organismo.

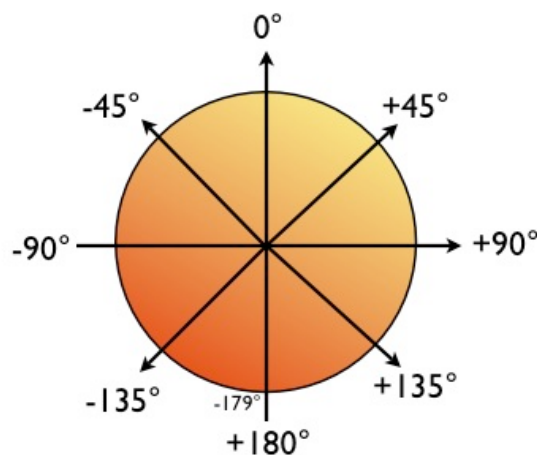


Figura 5 – L'angolo che separa l'organismo dall'unità di cibo più vicina, riferito ad un ipotetico organismo orientato in direzione nord.

Il valore $-179,9^\circ$ viene normalizzato in un numero molto piccolo, tendente a 0 . Il valore $+180^\circ$ diventa invece il valore normalizzato 1 . Si noti che, utilizzando questo tipo di codifica, due unità di cibo che si trovano entrambe "alle spalle" dell'organismo ed a poca distanza l'una dall'altra possono essere normalizzate con due valori opposti nell'intervallo $]0,1]$. La codifica scelta, che pone questa "soglia" alle spalle dell'organismo (dunque in una posizione "poco comoda"), cerca di mitigare questa potenziale fonte d'errore.

Lo stesso discorso fatto sinora per l'input sensoriale relativo al cibo deve essere esteso a quello riguardante il predatore. Quando il predatore è presente all'interno dell'ambiente, infatti, l'organismo processa l'informazione relativa alla sua posizione/distanza in maniera analoga a quanto fa nel caso del cibo. In assenza del predatore, l'input netto dei due neuroni che dovrebbero codificarne la collocazione nell'ambiente viene impostato, al contrario, sul valore 0 .

Una volta ricevuto l'input sensoriale nella sua interezza, la rete neurale processa questa informazione trasmettendola allo strato intermedio e da qui all'output layer. I due neuroni booleani di output codificano le quattro possibili risposte comportamentali dell'organismo. Nel dettaglio, queste sono:

- 00: nessun movimento;
- 01: rotazione di 90° in senso orario;
- 10: rotazione di 90° in senso antiorario;

- 11: spostamento in avanti di una cella lungo la direzione verso la quale l'organismo è orientato.

Come già accennato in precedenza, l'ambiente all'interno del quale si svolge la simulazione non è toroidale. Per questo motivo, in maniera tale da non rendere eccessivamente complicata la gestione del movimento da parte degli organismi, è stato fatto in modo che, un movimento che teoricamente porterebbe un organismo al di fuori dei confini spaziali, si traduca in realtà in una rotazione di 180°.

Per quanto riguarda il predatore, il suo comportamento è "hardwired". Esso percepisce in qualsiasi momento la posizione dell'organismo e si muove automaticamente in quella direzione. Il predatore gode di un vantaggio rispetto alla sua preda, in quanto può muoversi liberamente in una qualsiasi cella adiacente a quella in cui si trova (purché il movimento non avvenga in diagonale), senza dover preliminarmente ruotare il suo corpo nella direzione verso la quale intende in seguito spostarsi. La potenziale eccessiva efficienza del predatore nei confronti dell'organismo viene mitigata dall'introduzione di un po' di "rumore" casuale, il quale può portare il predatore a compiere mosse che lo allontanano dall'organismo invece che avvicinarlo ad esso.

Il funzionamento della simulazione

La simulazione elaborata prevede l'evoluzione, ottenuta tramite un algoritmo genetico, di una popolazione di organismi del tipo finora descritto. All'inizio del processo evolutivo, ciascuno dei 100 organismi che compongono la generazione 0 riceve in dotazione un set di pesi sinaptici casuali, il valore di ognuno dei quali è compreso tra 0 ed 1.

Ciascun individuo della generazione corrente viene "testato" singolarmente per un totale di 2'500 "passi", suddivisi in 5 epoche da 100 passi ciascuna, ripetute in 5 ambienti tra loro differenti. Gli ambienti differiscono tra loro in virtù di una diversa disposizione iniziale del cibo (nel momento in cui l'ambiente viene creato, ciascuna cella ha probabilità 0,15 di contenere al suo interno un'unità di cibo), mentre a variare, tra un'epoca e l'altra, sono la posizione e l'orientamento di partenza dell'organismo. Il predatore, in ogni epoca, compare casualmente in uno dei 100 step (all'interno di una cella vuota, scelta in maniera altrettanto casuale) e vive per 25 passi (o meno, nel caso in cui la sua comparsa avvenga dopo il 75° step). Una volta che tutti gli organismi terminano i 2'500 passi "regolamentari", viene valutata, attraverso una formula di fitness, la performance fatta registrare da ciascuna rete neurale. La formula in questione è estremamente semplice:

$$fitness = food\ amount\ collected - (number\ of\ captures\ suffered * capture\ damage)$$

Essa tiene conto di entrambe le componenti importanti per la vita di un organismo: la capacità di raccogliere cibo e l'abilità nell'evitare la cattura da parte del predatore. Osservando questa formula è immediatamente evidente, aspetto che verrà poi approfondito nel seguito, come giochi un ruolo estremamente importante la variabile *capture damage*, la quale indica "quanto dannoso" per l'organismo sia il subire una cattura.

In base ai risultati ottenuti, al termine della generazione 0 i 20 organismi che realizzano i migliori valori di fitness si riproducono dando origine ciascuno a 5 nuovi individui. La riproduzione avviene per clonazione, ma nel momento in cui viene generato un figlio ciascun peso sinaptico ereditato ha probabilità 0.25 di subire una mutazione, la quale si traduce in una modifica casuale del suo valore di una quantità compresa tra -1 ed 1. I 100 organismi "figli" vanno a costituire la popolazione della generazione 1. L'intero processo ("testing", selezione, riproduzione con mutazione) si ripete fino ad originare complessivamente 200 generazioni di individui.

I grafici che seguono (tutti ricavati dalla media di 10 seeds diversi) mostrano i risultati ottenuti con un valore di *capture damage* uguale a 10.

Ciò che si osserva con il passare delle generazioni, innanzitutto, è il miglioramento del livello di fitness (sia medio che massimo) degli organismi, i quali risultano progressivamente “più adatti” all’ambiente all’interno del quale vivono.

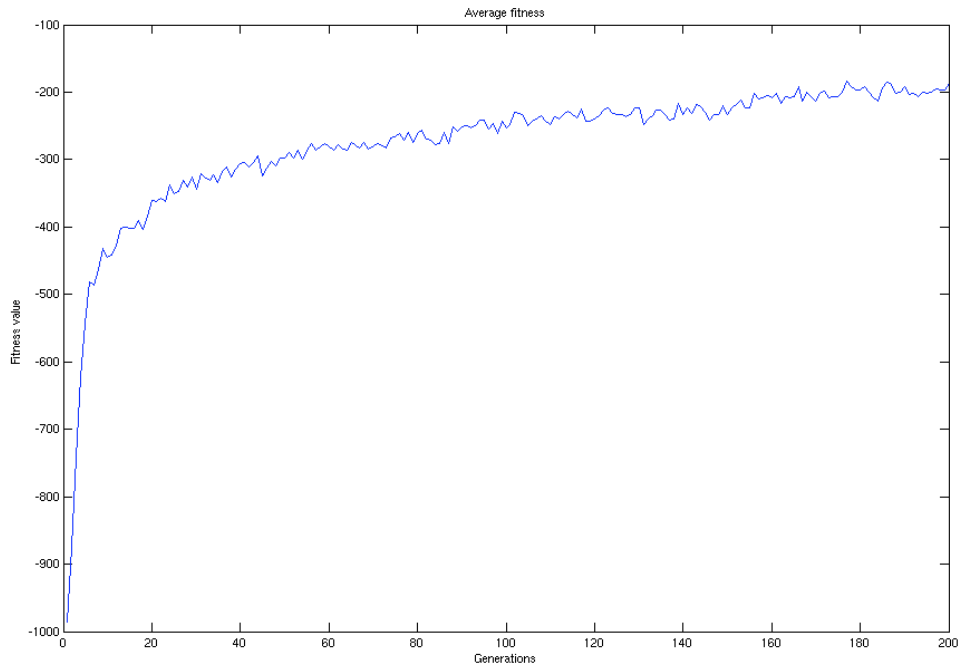


Figura 6 – Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni (media di 10 seeds).

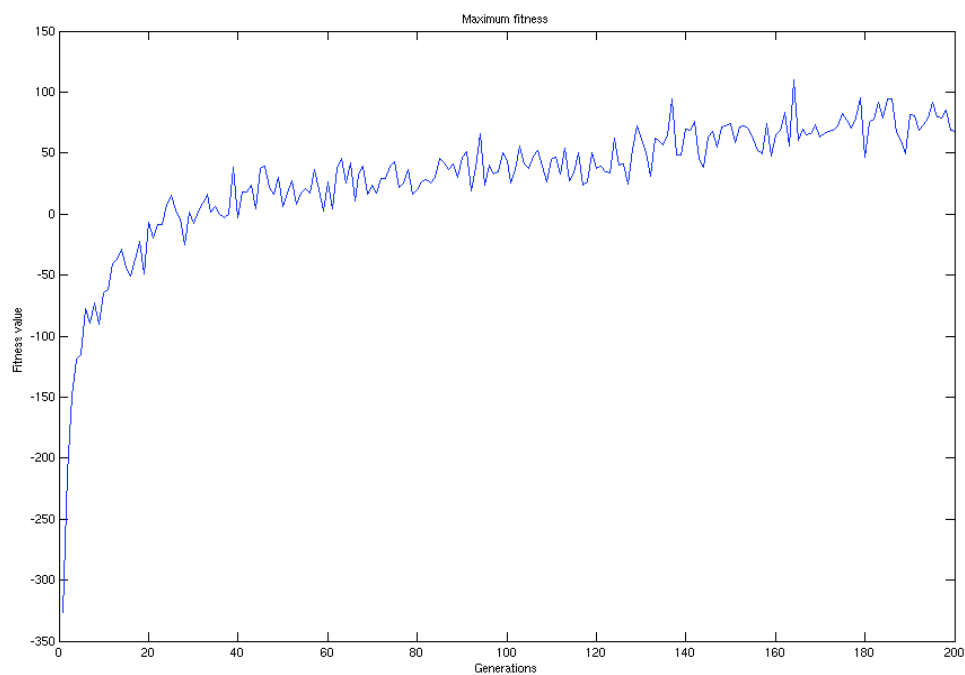


Figura 7 – Valore della fitness dell’individuo migliore lungo le 200 generazioni (media di 10 seeds).

La fitness di un individuo, come abbiamo mostrato in precedenza, tiene conto di due componenti: la capacità di raccogliere cibo e l'abilità di fuggire dal predatore. I grafici seguenti mostrano come gli organismi ottengano progressivi ed evidenti miglioramenti nell'esecuzione di entrambi i task.

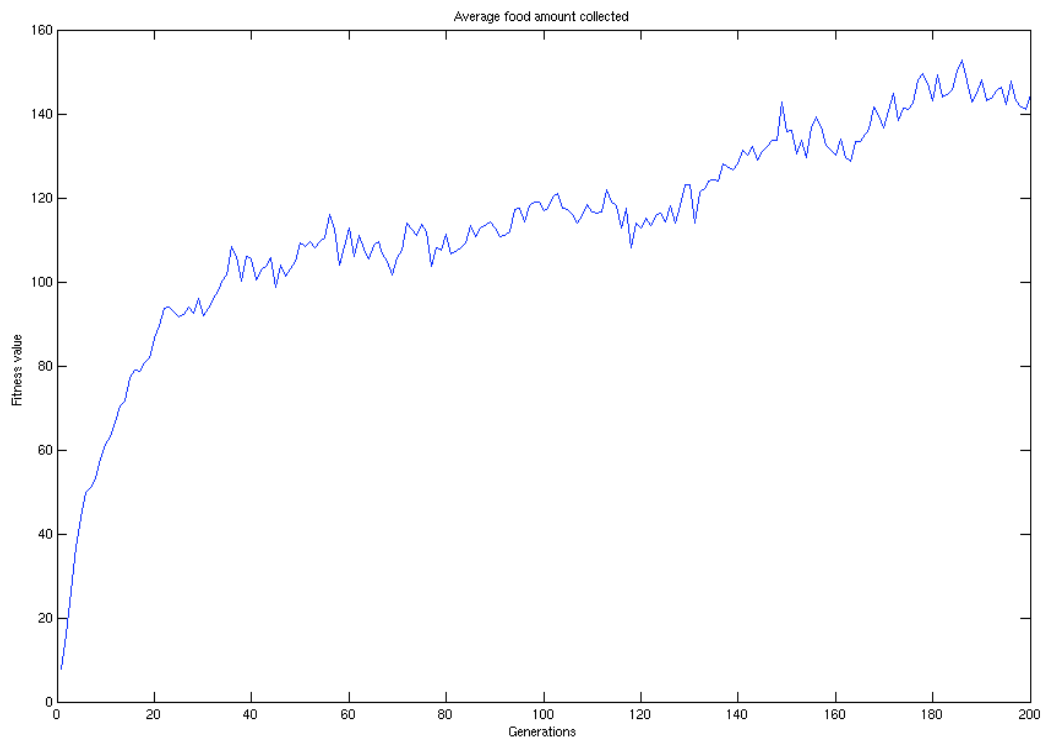


Figura 8 – Ammontare medio di cibo raccolto dai singoli individui lungo le 200 generazioni (media di 10 seeds).

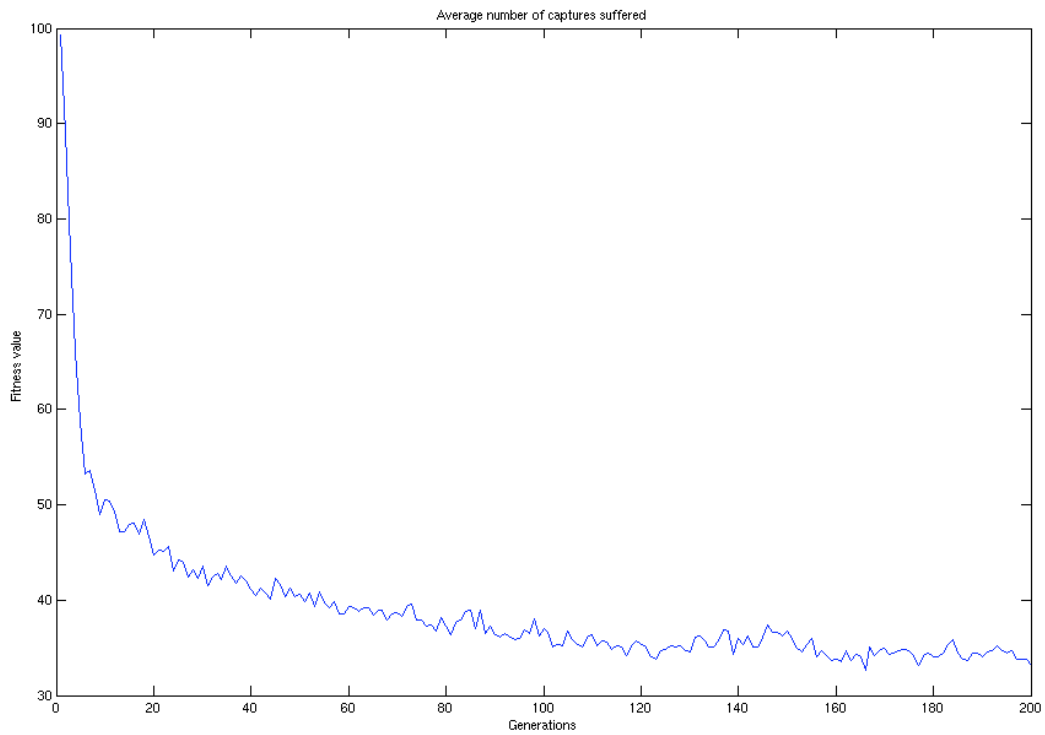


Figura 9 – Numero medio di catture subite dai singoli individui lungo le 200 generazioni (media di 10 seeds).

L'ammontare di cibo raccolto dagli individui può essere poi ulteriormente scomposto in due componenti: la quantità catturata quando nell'ambiente è presente il predatore e quella raccolta quando il predatore è assente.

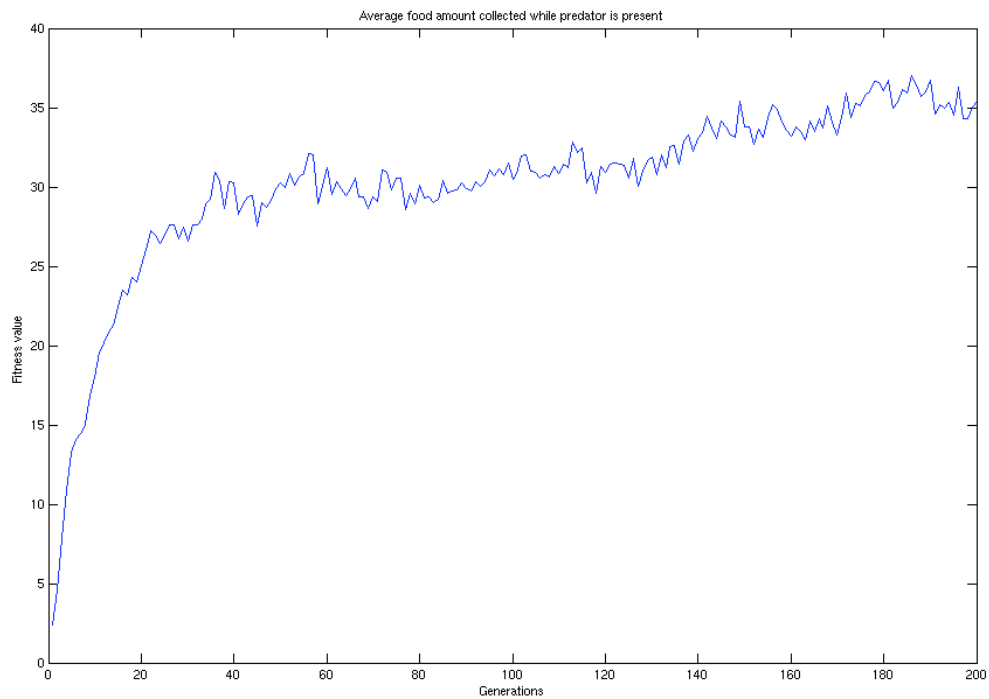


Figura 10 - Ammontare medio di cibo raccolto dai singoli individui, quando il predatore è presente, lungo le 200 generazioni (media di 10 seeds).

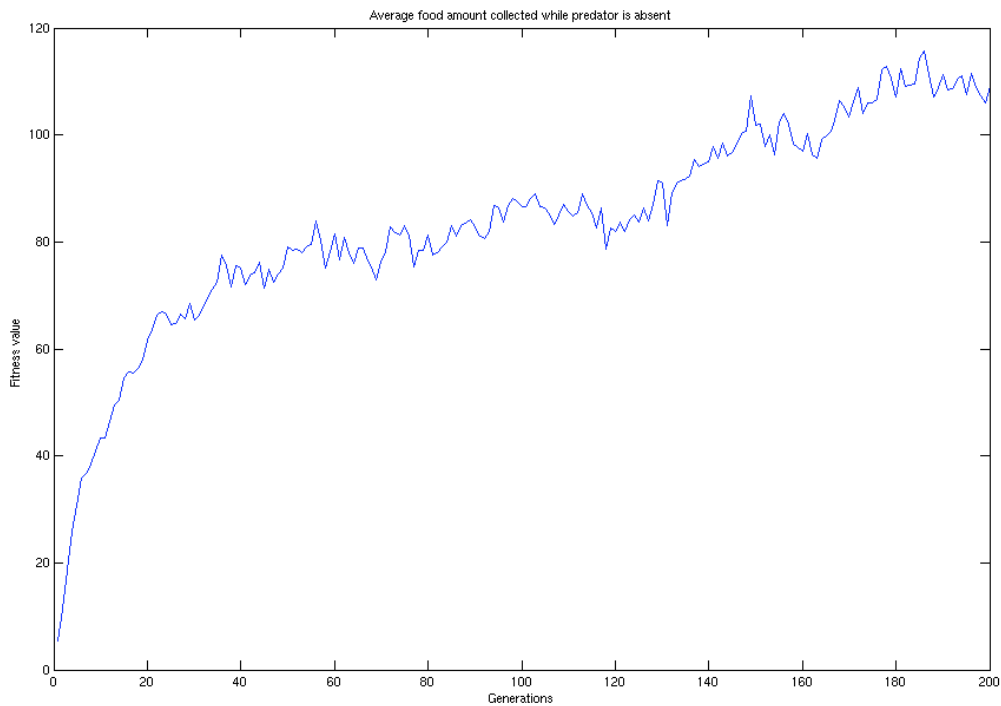


Figura 11 - Ammontare medio di cibo raccolto dai singoli individui, quando il predatore è assente, lungo le 200 generazioni (media di 10 seeds).

La sensibilità della simulazione al variare del parametro *capture damage*

Da un punto di vista evolutivo, la variabile *capture damage* riveste un'importanza fondamentale. A seconda del suo valore, infatti, gli organismi possono evolvere un modello comportamentale caratterizzato da una maggior propensione a raccogliere cibo, dando meno importanza ad un'eventuale cattura da parte del predatore quando questa è poco dannosa o, viceversa, possono non diventare abili raccoglitori di cibo, compensando tale carenza con una miglior abilità nel fuggire dal predatore quando questo è potenzialmente molto pericoloso.

Per valori di *capture damage* particolarmente “alti” o “bassi”, non esistendo un “vincolo” stringente che costringa gli organismi ad eseguire entrambi i task (ad esempio un ammontare di cibo minimo che devono raccogliere per sopravvivere, oppure un numero massimo di catture che possono sopportare), essi finiscono solitamente per specializzarsi nell'esecuzione di uno soltanto di questi due compiti.

Un valore di *capture damage* medio, al contrario, favorisce lo sviluppo contemporaneo di entrambe le abilità. Si tratta di un comportamento sicuramente più complicato rispetto a quello “specialistico”, in quanto gli organismi devono imparare a “switchare” tra due tipi di risposte comportamentali: cercare cibo quando il campo è libero, fuggire quando appare il predatore (o quando esso si avvicina in maniera preoccupante). Tale maggior sofisticatezza comportamentale viene però ripagata in termini di fitness.

I fenomeni appena descritti sono perfettamente visibili nei grafici che seguono, nei quali è mostrata la comparazione tra i risultati ottenuti da simulazioni effettuate con diversi valori di *capture damage*: uguale a 5 (predatore “poco pericoloso”), uguale a 10 (predatore “mediamente pericoloso”: il caso precedentemente osservato) ed uguale a 50 (predatore “estremamente pericoloso”).

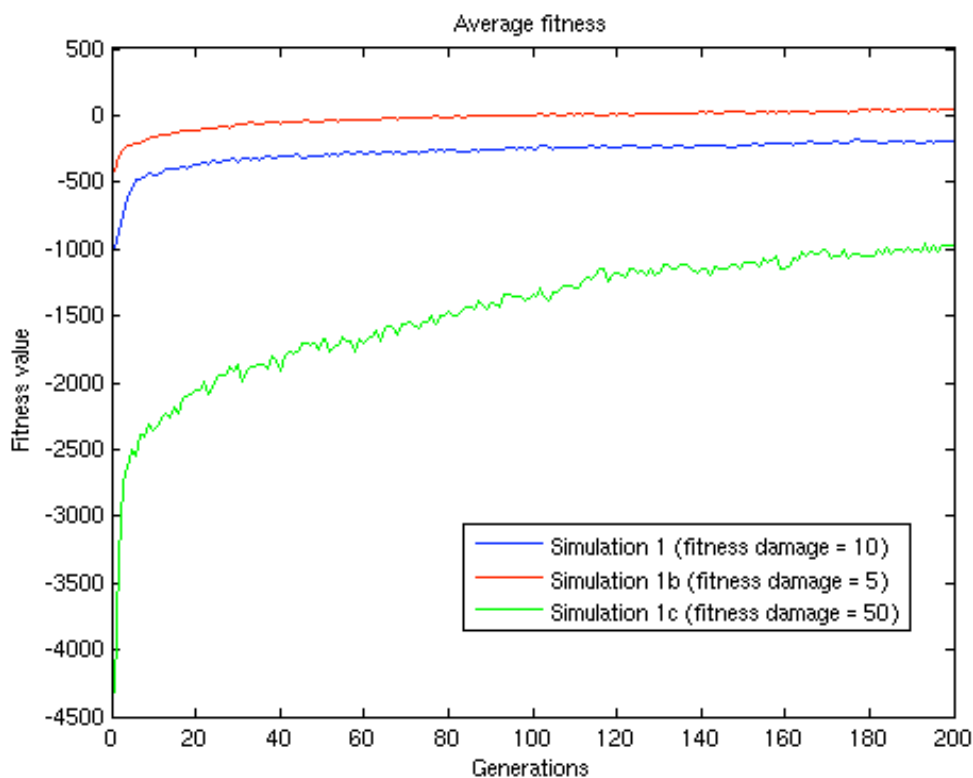


Figura 12 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra simulazioni svolte con diversi valori di *capture damage* (medie di 10 seeds).

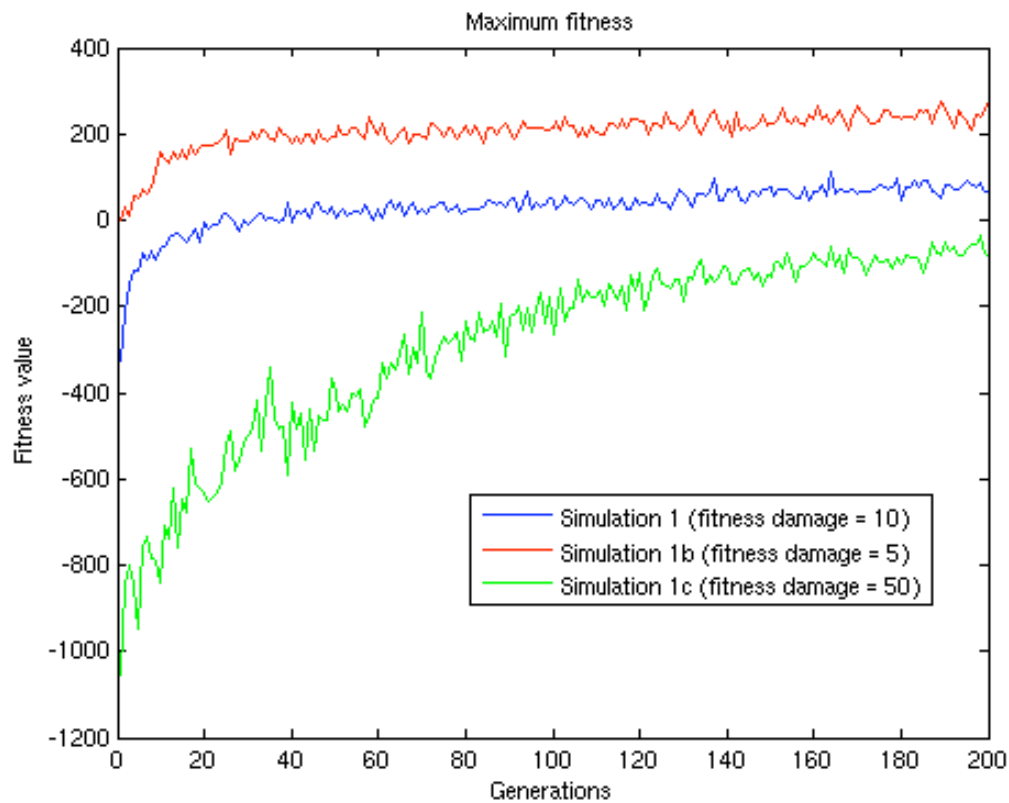


Figura 13 - Valore di fitness del miglior individuo lungo le 200 generazioni: confronto tra simulazioni svolte con diversi valori di *capture damage* (medie di 10 seeds).

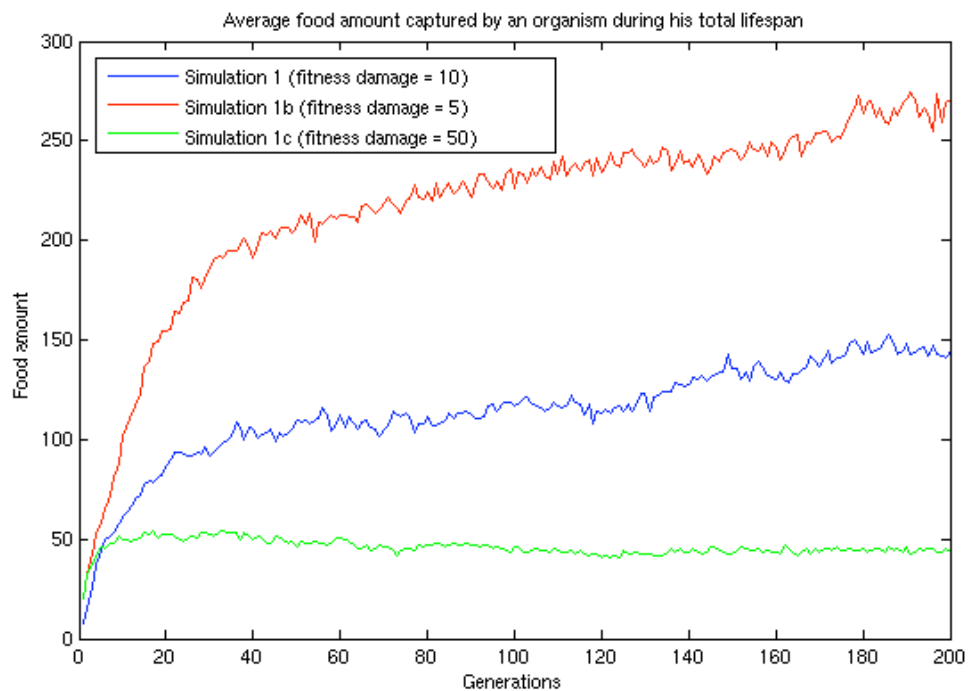


Figura 14 - Ammontare medio di cibo raccolto dai singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra simulazioni svolte con diversi valori di *capture damage* (media di 10 seeds).

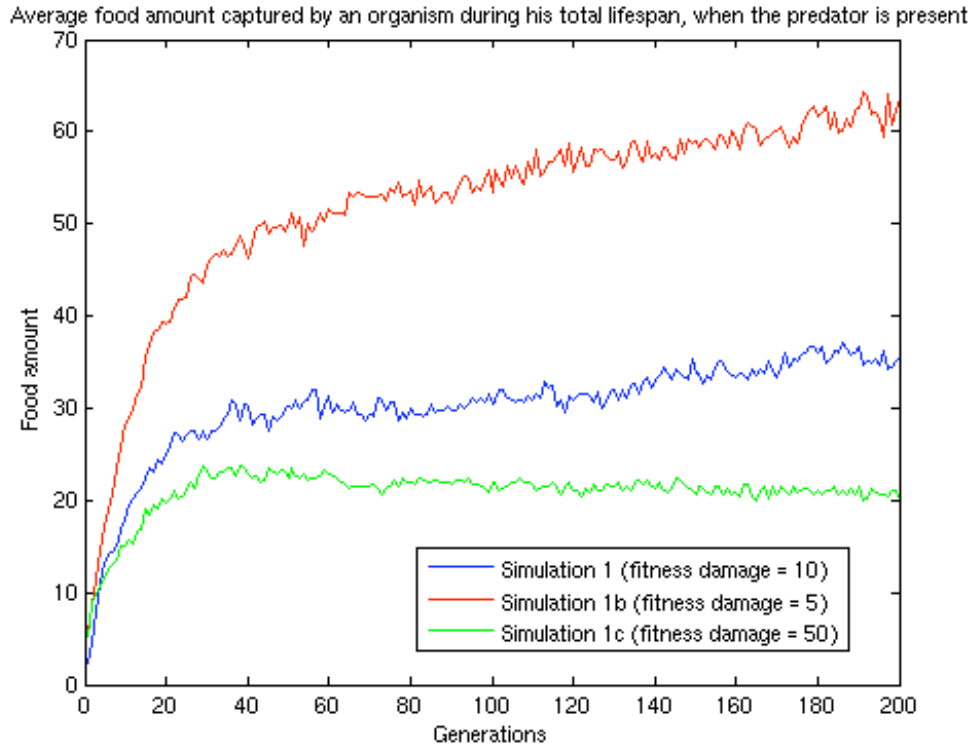


Figura 15 - Ammontare medio di cibo raccolto dai singoli individui, in presenza del predatore, lungo le 200 generazioni: confronto tra simulazioni svolte con diversi valori di *capture damage* (media di 10 seeds).

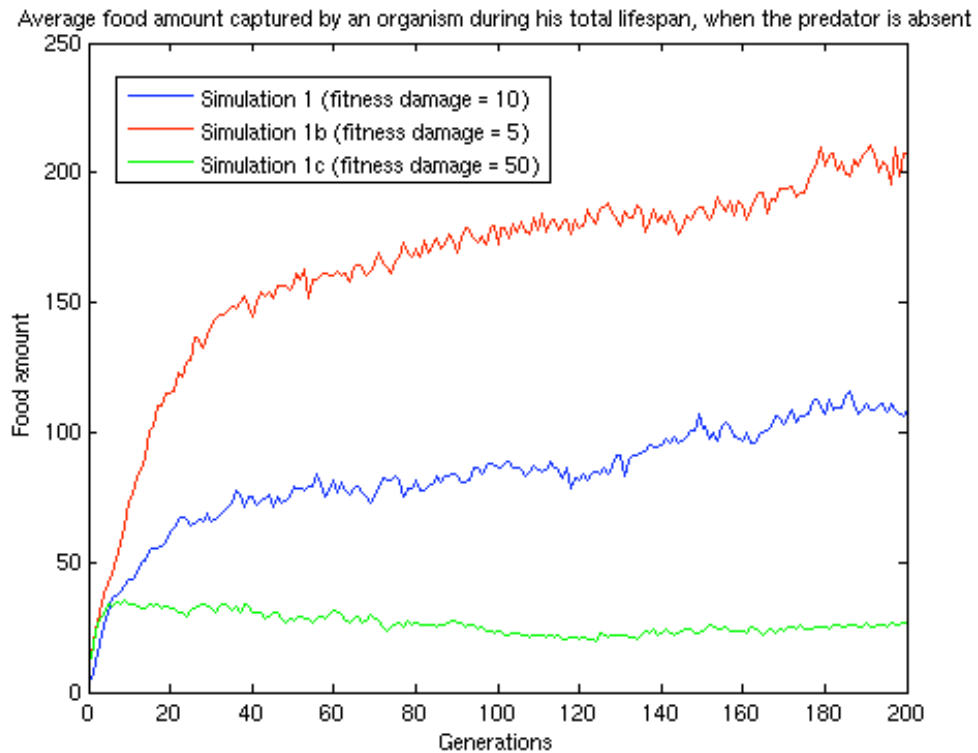


Figura 16 - Ammontare medio di cibo raccolto dai singoli individui, in assenza del predatore, lungo le 200 generazioni: confronto tra simulazioni svolte con diversi valori di *capture damage* (media di 10 seeds).

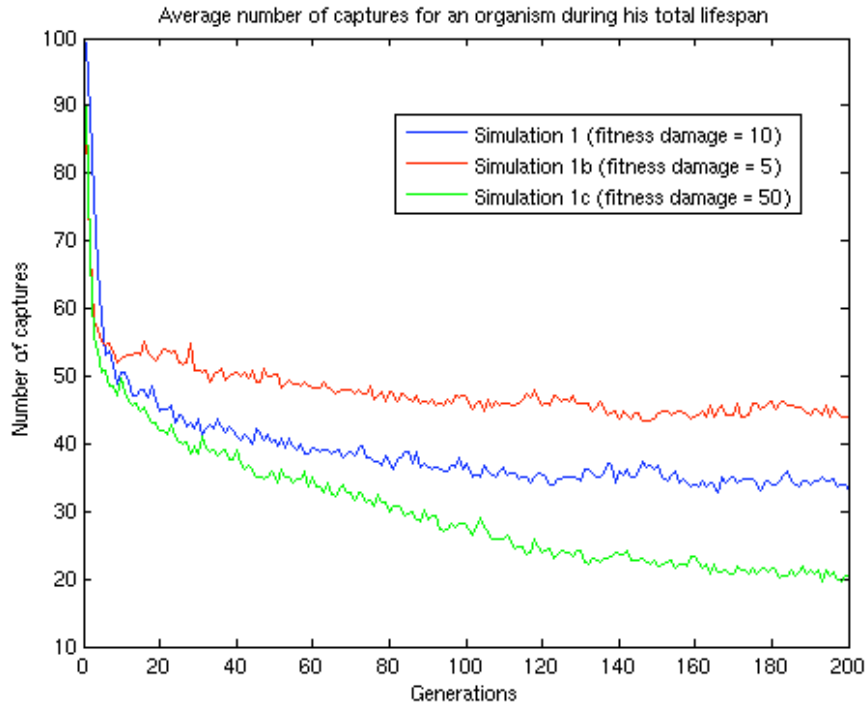


Figura 17 - Numero medio di catture subite dai singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra simulazioni svolte con diversi valori di *capture damage* (media di 10 seeds).

Capture damage uguale a zero

Particolare è la condizione nella quale il predatore non provoca alcun danno all'organismo in caso di cattura. In questa situazione, pertanto, il predatore agisce semplicemente come un "disturbatore", una fonte di rumore che va a creare "confusione" nell'input sensoriale dell'organismo.

Nei grafici che seguono sono riportati i risultati della simulazione svolta con *capture damage* = 0

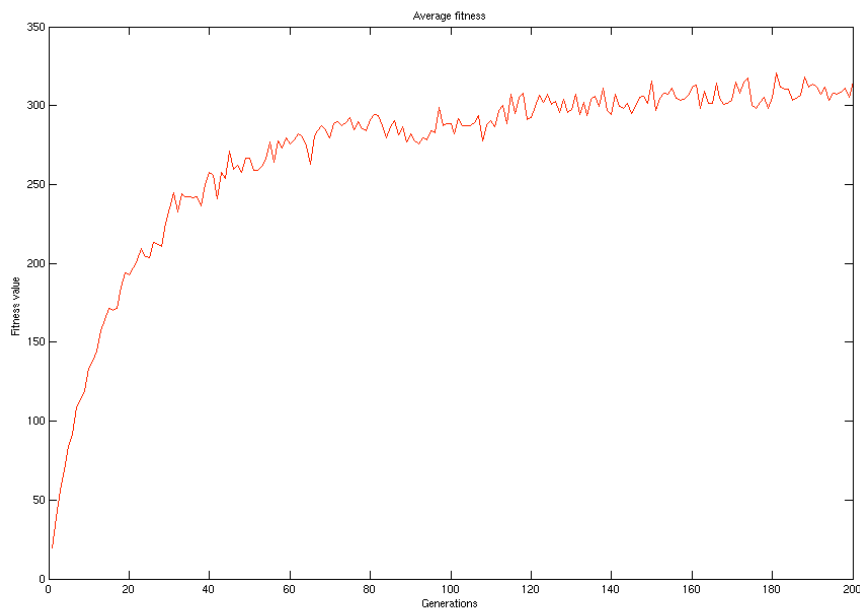


Figura 18 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni, con *capture damage* = 0 (media di 10 seeds).

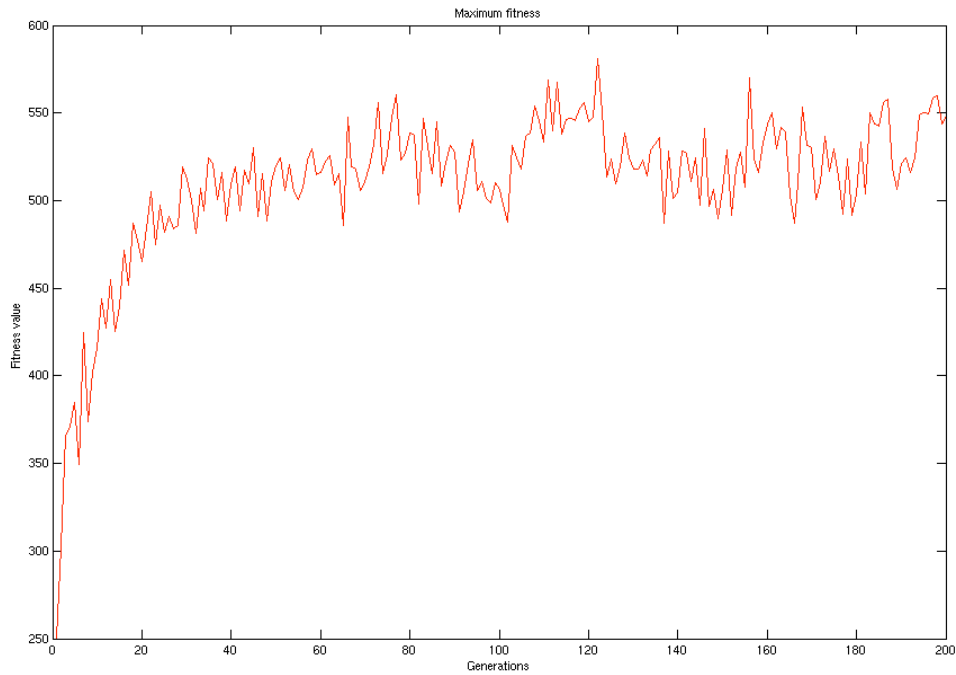


Figura 19 - Valore di fitness del miglior individuo lungo le 200 generazioni, con *capture damage* = 0 (media di 10 seeds).

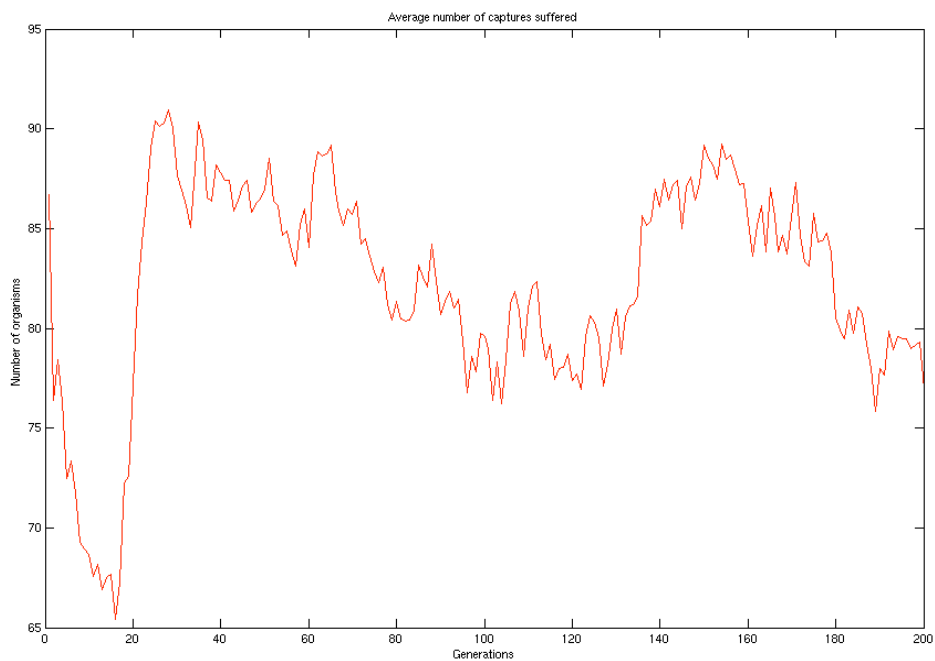


Figura 20 - Numero medio di catture subite dai singoli individui lungo le 200 generazioni con *capture damage* = 0 (media di 10 seeds).

Senza più il “danno” rappresentato dalle catture da parte del predatore, i grafici ricavati da questa simulazione riportano valori di fitness, media e massima, nettamente superiori rispetto a quelli fatti registrare nelle precedenti situazioni sperimentali.

Mancano, rispetto alle simulazioni osservate in precedenza, i grafici relativi all'ammontare di cibo mangiato dagli organismi. Questo perché, con un valore di *capture damage* = 0, la seconda parte della formula di fitness utilizzata assume sempre valore 0. La fitness di un organismo, di conseguenza, equivale alla quantità di cibo da lui mangiata.

Interessante infine osservare la curva relativa al numero di catture, la quale, sebbene non ci fornisca informazioni inattese, mostra in maniera molto evidente come la tendenza, osservata negli altri casi, all'evoluzione di organismi progressivamente più bravi nel fuggire dal predatore, ora non abbia più luogo. Le precedenti curve, tendenzialmente decrescenti, lasciano il posto ad un nuovo andamento vagamente sinusoidale. Il risultato è perfettamente in linea con le nostre previsioni: non essendo più esercitata una pressione selettiva sul "comportamento di fuga" esso si sviluppa semplicemente come un "prodotto derivato" dell'evoluzione e la curva che ne descrive l'andamento con il passare delle generazioni conosce pertanto un alternarsi di "alti e bassi".

Una comparazione

Nella situazione appena simulata, in linea di principio, gli organismi non hanno la necessità di essere dotati di un'architettura neurale particolarmente sofisticata. Potendo infatti ignorare senza alcuna ripercussione l'informazione sensoriale proveniente dal predatore, tutto quello che essi devono fare è muoversi in funzione della propria percezione sensoriale relativa ad oggetti la cui posizione nell'ambiente è perfettamente stabile.

Per avere conferma della bontà di questa tesi è stata pertanto elaborata una nuova simulazione in una condizione più semplice rispetto a quella vista fino a questo momento. Ciò che si è fatto è stato rimuovere totalmente l'apparizione del predatore e "semplificare" di conseguenza la rete neurale degli organismi, eliminando i due neuroni di input preposti a recepire l'informazione sensoriale relativa appunto al predatore.

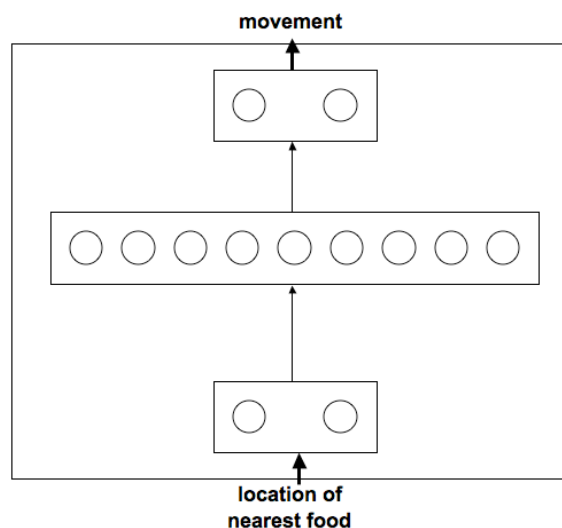


Figura 21 – Rappresentazione grafica dell'architettura della rete neurale che "modella" gli organismi in questa variante della simulazione. Rispetto all'architettura neurale utilizzata in precedenza sono stati rimossi i neuroni di input deputati a codificare la posizione del predatore.

Quello che ci si aspettava di osservare era che i risultati di questa nuova situazione sperimentale fossero, se non migliori rispetto a quelli ottenuti nella situazione in cui il valore di *capture damage* era stato impostato sul valore zero, perlomeno fortemente simili ad essi.

I grafici che seguono, evidenziano effettivamente una sostanziale somiglianza nell'andamento delle curve relative alla fitness media ed a quella massima, tra questa simulazione e la precedente.

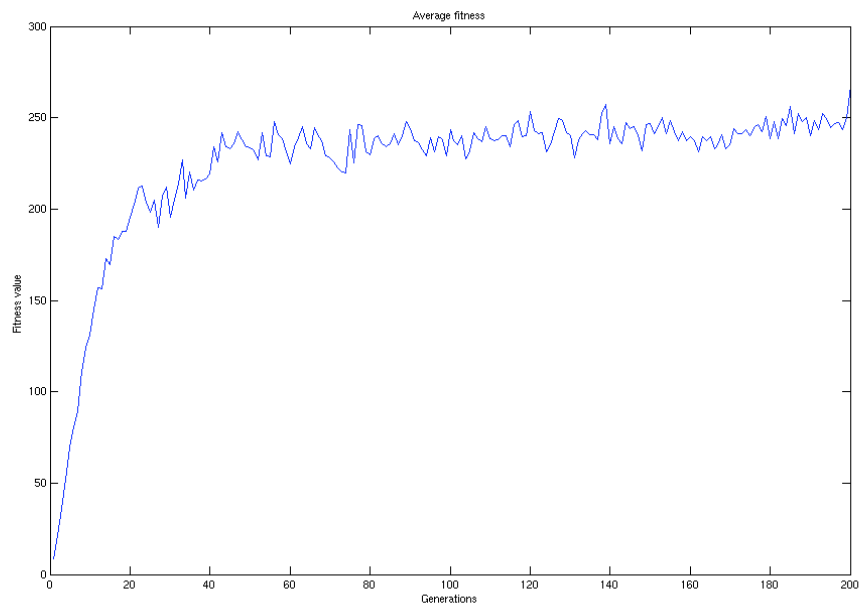


Figura 22 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni, in assenza del predatore (media di 10 seeds).

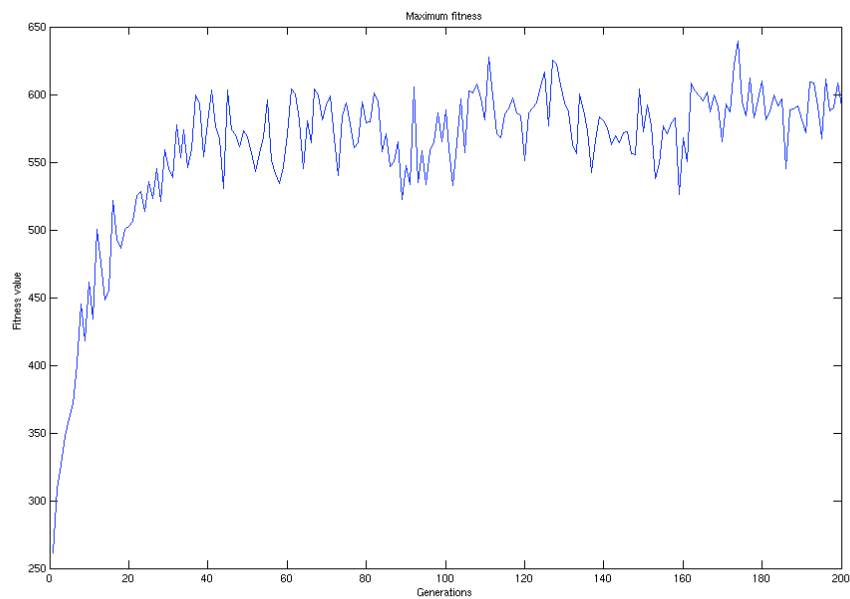


Figura 23 - Valore di fitness del miglior individuo lungo le 200 generazioni, in assenza del predatore (media di 10 seeds).

Un'analisi un po' più attenta, però, mette in luce come, in questa seconda situazione sperimentale, le curve si attestino su livelli differenti rispetto al caso visto in precedenza in cui la variabile *capture damage* era impostata sul valore 0.

Per quanto riguarda la fitness del miglior individuo, in assenza del predatore si registrano valori nettamente più alti rispetto a quando il predatore è presente ma non provoca danni all'organismo. Se interpretiamo la presenza di un predatore "innocuo" (ossia con *capture damage* = 0) come puro e semplice "rumore", questo risultato non può sorprenderci: in una situazione ambientale "pulita",

l'organismo impara a dirigersi in maniera più efficace verso il cibo, non essendo "disturbato" da una seconda percezione derivante dalla presenza del predatore.

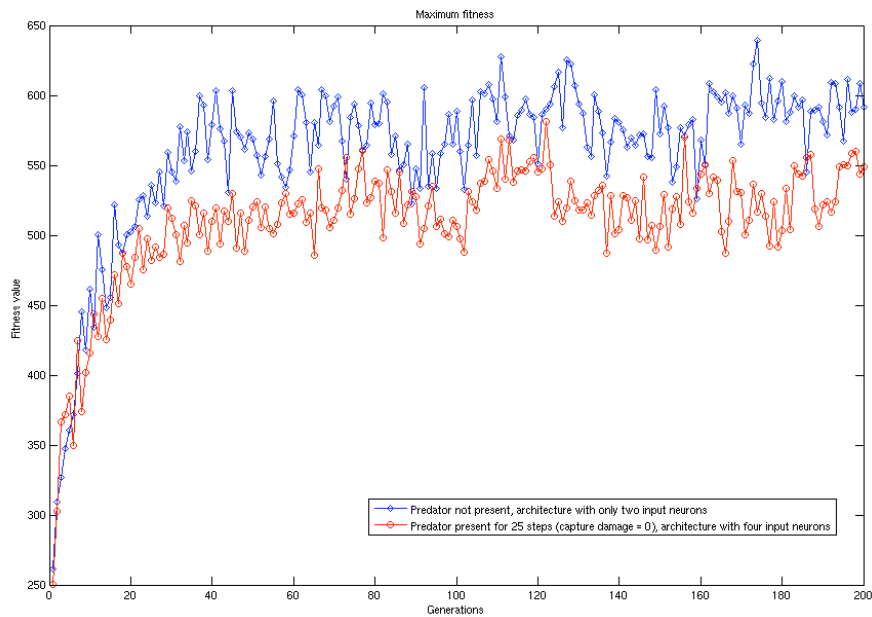


Figura 24 - Valore della fitness del miglior individuo lungo le 200 generazioni: confronto tra la situazione in cui il predatore è assente e quella in cui è presente, ma il valore di *capture damage* è uguale a zero (medie di 10 seeds).

Sorprende, al contrario, il dato relativo alla fitness media. Come evidenziato nella figura 25, infatti, essa si attesta su valori notevolmente inferiori nella situazione in cui il predatore non entra mai in gioco. Mediamente, dunque, gli individui ottengono punteggi di fitness migliori quando sono alle prese con un compito che, sulla carta, sembrerebbe essere più difficile: distinguere l'input sensoriale relativo al predatore da quello legato al cibo, ignorare il primo e muoversi basandosi esclusivamente sul secondo.

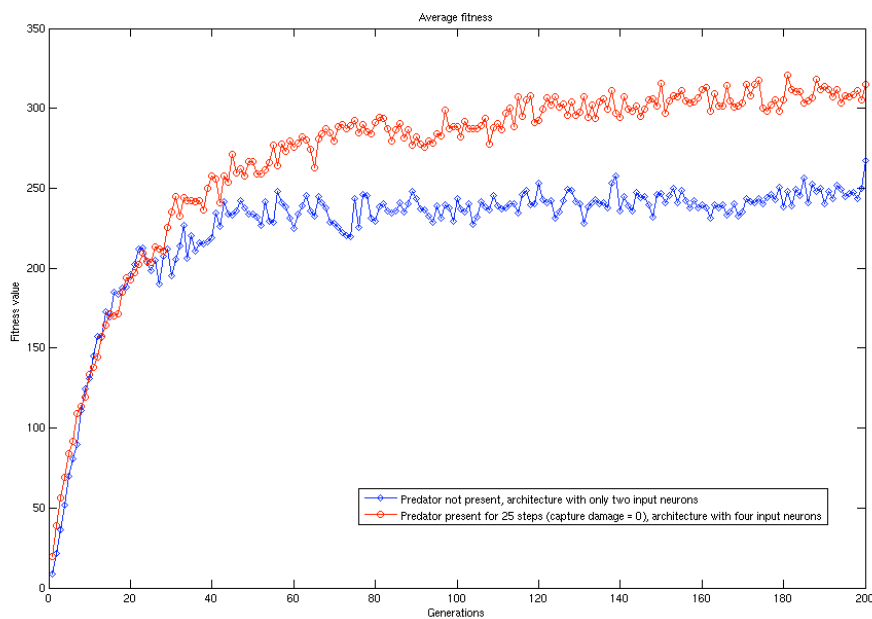


Figura 25 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra la situazione in cui il predatore è assente e quella in cui è presente, ma il valore di *capture damage* è uguale a zero (medie di 10 seeds).

Il fenomeno appena descritto trova conferma anche nei risultati restituiti da un'ulteriore simulazione, sviluppata ad hoc, nella quale il predatore, pur sempre innocuo (ossia con *capture damage* = 0), non appare soltanto per il 25% del tempo complessivo, ma risulta essere sempre presente all'interno dell'ambiente.

In questa nuova situazione, la fitness massima risulta essere peggiore rispetto ai due casi precedenti, a conferma del fatto che un maggior quantitativo di "rumore" impedisce l'evoluzione di comportamenti tanto efficaci quanto quelli che gli organismi riescono ad apprendere in un ambiente più "pulito". La relazione, a questo punto, appare sufficientemente chiara: tanto minore è il rumore ambientale, tanto più efficiente è il comportamento di approvvigionamento che i migliori organismi di una generazione riescono ad evolvere.

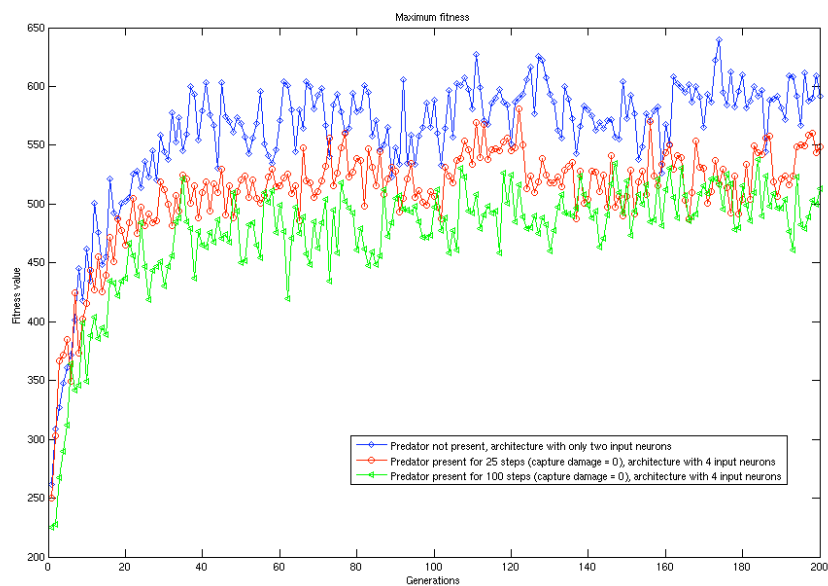


Figura 26 - Valore della fitness del miglior individuo lungo le 200 generazioni: confronto tra la situazione in cui il predatore è assente, quella in cui è mediamente presente per 25 passi in ciascuna epoca, e quella in cui è sempre presente (il valore di *capture damage*, in entrambi i casi, è uguale a zero) (medie di 10 seeds).

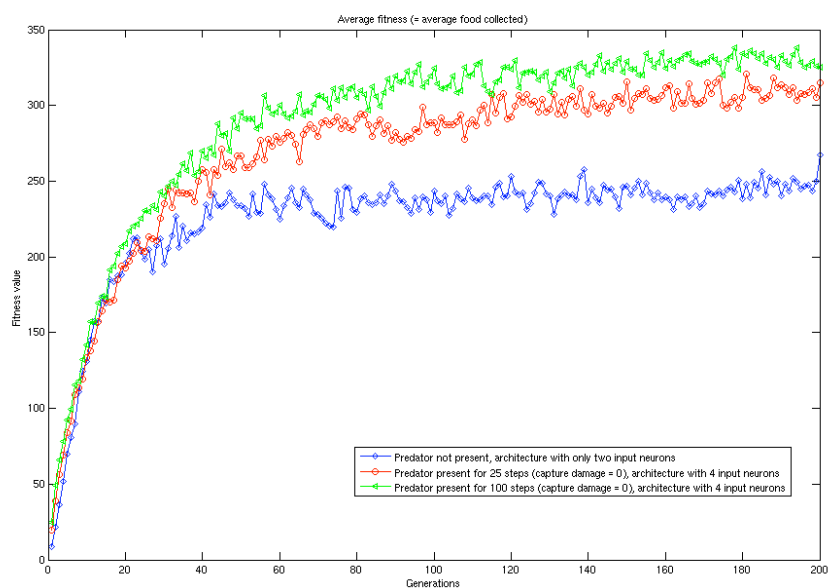


Figura 27 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra la situazione in cui il predatore è assente, quella in cui è mediamente presente per 25 passi in ciascuna epoca, e quella in cui è sempre presente (il valore di *capture damage*, in entrambi i casi, è uguale a zero) (medie di 10 seeds).

Ancora una volta, però, per quanto riguarda la fitness media ci scontriamo con un apparente nonsense. In quest'ultima simulazione, infatti, la curva relativa al valore di fitness medio degli individui si attesta su livelli più alti rispetto a quelli derivanti dalle altre due simulazioni.

La ragione della differenza riscontrata tra fitness media e fitness massima può essere ricercata confrontando tra loro le popolazioni evolute nelle tre situazioni sperimentali descritte.

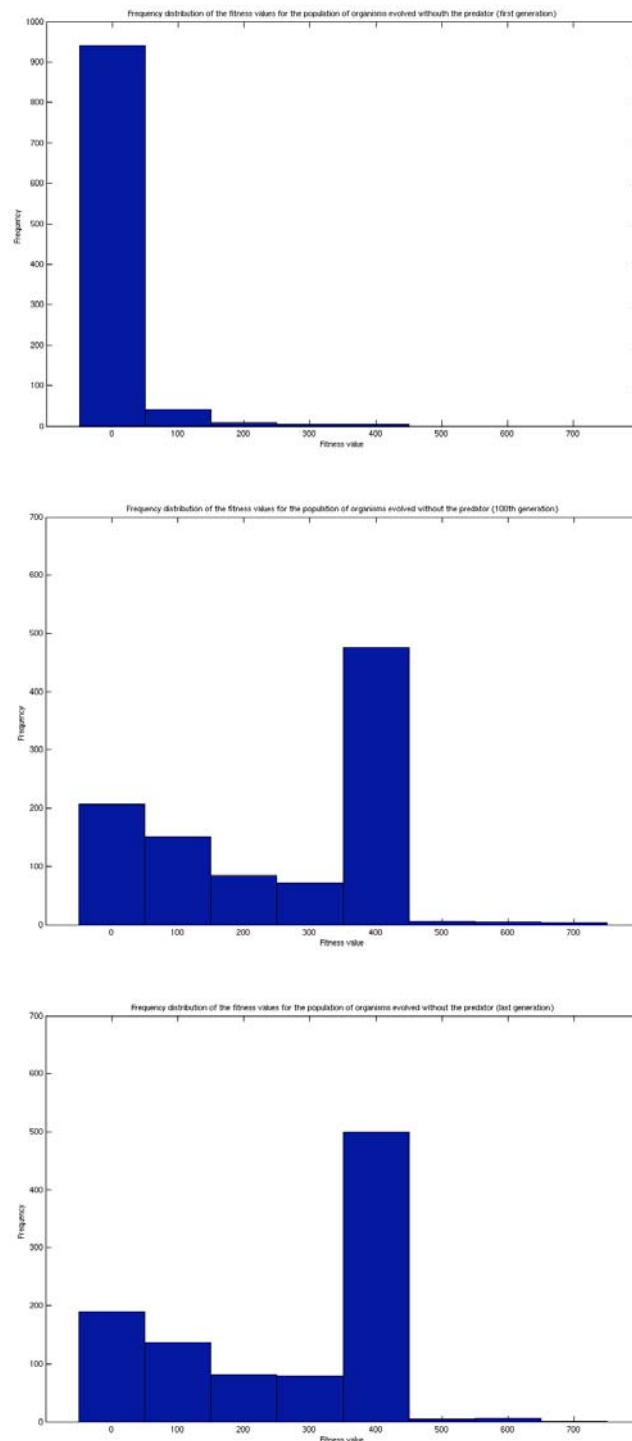


Figura 28 – Distribuzione dei valori di fitness, rispettivamente alla prima, alla centesima ed all'ultima generazione, nella simulazione in cui il predatore non è mai presente nell'ambiente (la popolazione complessiva è composta da 1000 individui, poiché raccolte tutti i 10 seeds svolti).

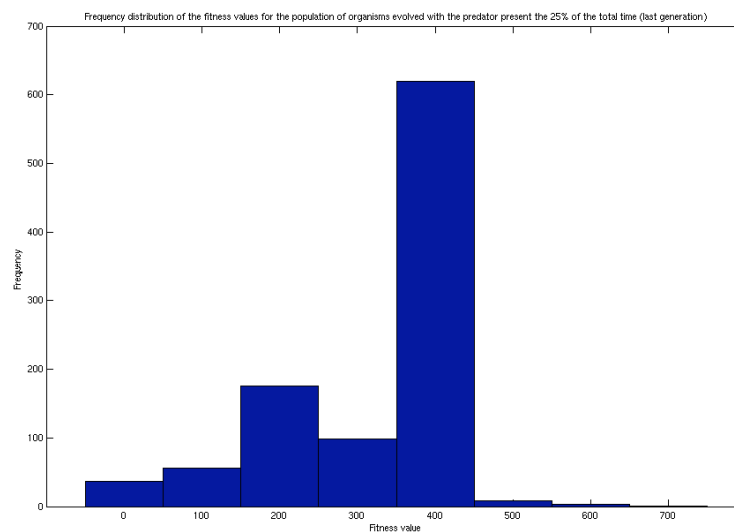
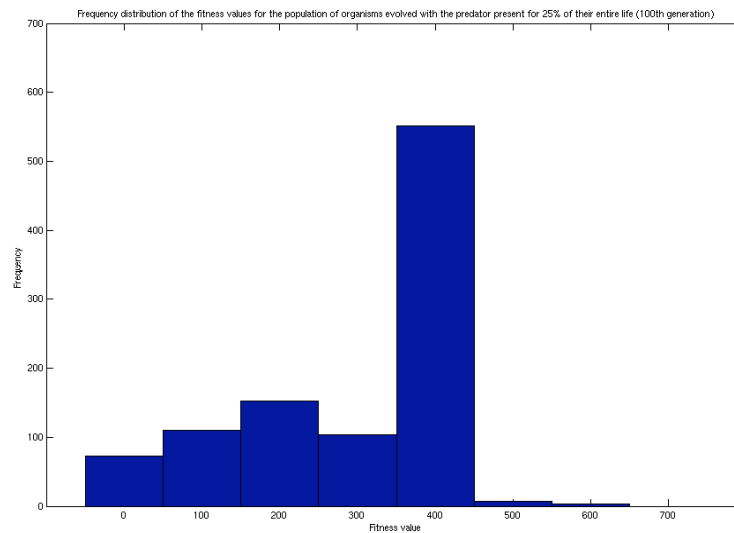
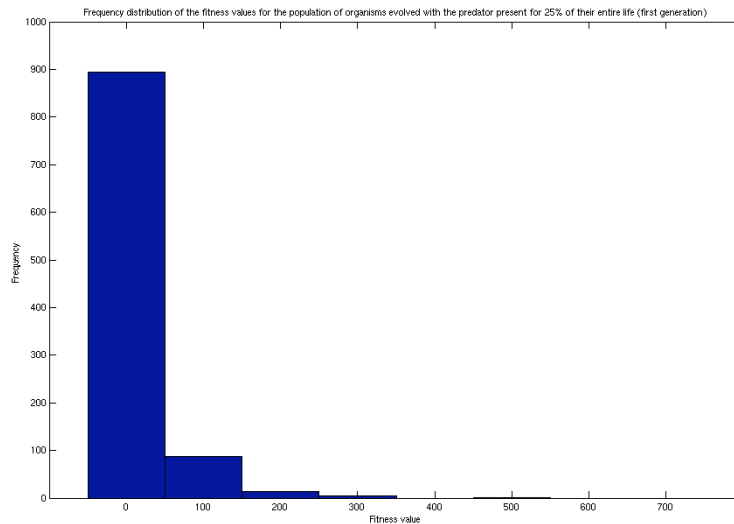


Figura 29 - Distribuzione dei valori di fitness, rispettivamente alla prima, alla centesima ed all'ultima generazione, nella simulazione in cui il predatore ($cd=0$) è presente nell'ambiente, mediamente, per il 25% della vita degli organismi (la popolazione complessiva è composta da 1000 individui, poiché raccoglie tutti i 10 seeds svolti).

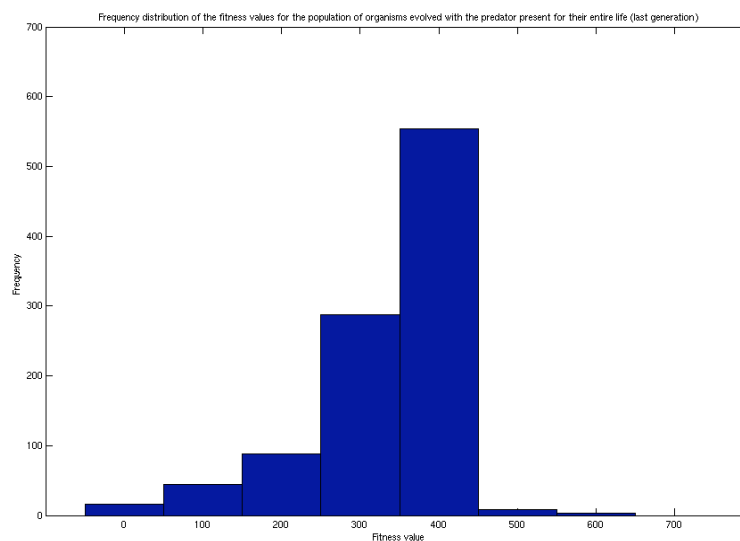
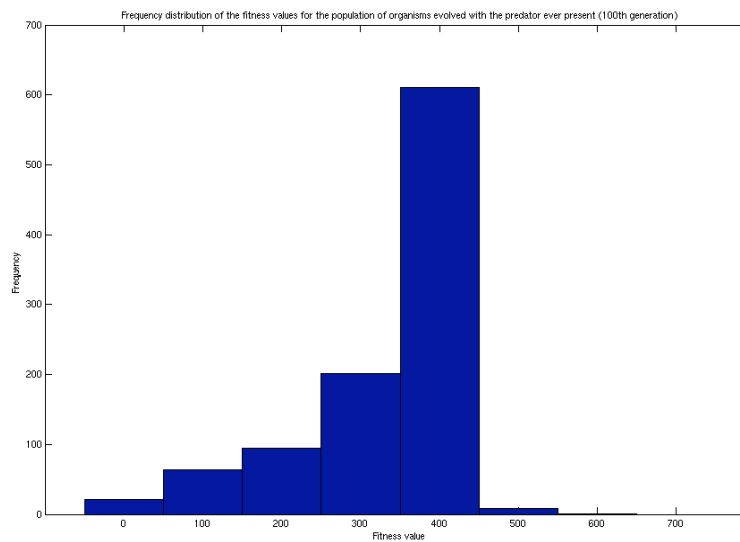
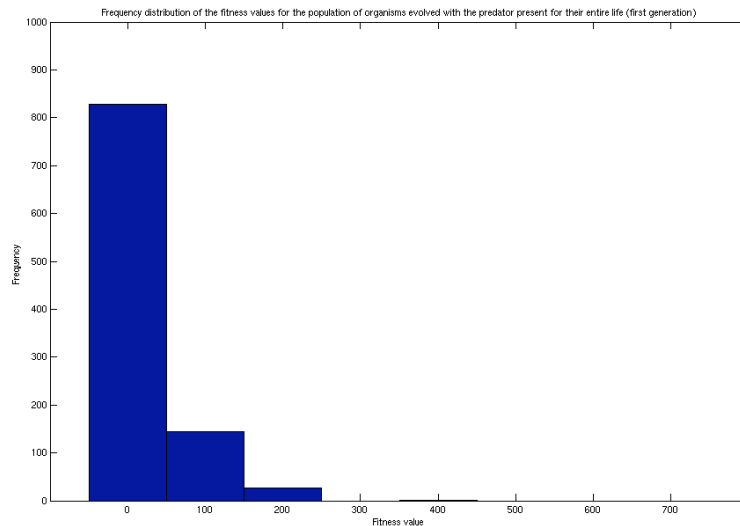


Figura 30 - Distribuzione dei valori di fitness, rispettivamente alla prima, alla centesima ed all'ultima generazione, nella simulazione in cui il predatore ($cd=0$) è sempre presente nell'ambiente (la popolazione complessiva è composta da 1000 individui, poiché raccoglie tutti i 10 seeds svolti).

Questi grafici mostrano che il succo della questione si concentra principalmente nelle code delle varie distribuzioni.

Osservando la distribuzione delle varie popolazioni all'inizio dell'evoluzione, notiamo che la stragrande maggioranza degli organismi ha valori di fitness prossimi allo zero. Come d'altronde era più che lecito aspettarsi: gli organismi i cui pesi sinaptici vengono assegnati in maniera casuale risultano perlopiù insensibili all'input sensoriale o comunque caratterizzati da comportamenti fortemente stereotipati. Una minima percentuale degli organismi, al contrario, risulta in grado di rispondere, pur in maniera tutt'altro che efficiente, agli input percettivi e, spostandosi nell'ambiente, raccogliere "accidentalmente" un certo quantitativo di cibo. E' proprio questa piccola frazione della popolazione a riprodursi, dando il la a quella traiettoria evolutiva che verrà meglio delineata con il passare delle generazioni.

Già qui, alla prima generazione, è tuttavia possibile notare una significativa differenza fra le tre diverse situazioni sperimentali. La tabella che segue presenta il riepilogo del numero di individui che, alla prima generazione, hanno fatto registrare un punteggio di fitness minore di 50 (ovvero che hanno mangiato mediamente meno di due unità di cibo in ciascuna epoca), nelle tre simulazioni.

<i>Condizione sperimentale</i>	<i>Numero di individui con fitness minore di 50</i>
Assenza del predatore	938
Predatore presente per il 25% del tempo	893
Predatore sempre presente	822

Tabella 1 – Il numero di individui che, alla prima generazione, ha totalizzato un valore di fitness minore di 50 nelle tre diverse condizioni sperimentali.

Si può notare che, all'aumentare della frequenza con la quale il rumore viene avvertito dagli organismi, diminuisce la percentuale di questi ultimi che manifesta insensibilità all'input sensoriale o un comportamento stereotipato. La differenza è significativa: nel passaggio dalla situazione in cui non compare mai il predatore a quella in cui esso è sempre presente, vi è uno scarto del 10% abbondante.

La situazione non cambia a metà evoluzione, ma anzi, si rafforza ulteriormente.

<i>Condizione sperimentale</i>	<i>Numero di individui con fitness minore di 50</i>
Assenza del predatore	205
Predatore presente per il 25% del tempo	73
Predatore sempre presente	21

Tabella 2 - Il numero di individui che, alla centesima generazione, ha totalizzato un valore di fitness minore di 50 nelle tre diverse condizioni sperimentali.

Esattamente come ciò che si riscontra al termine dell'evoluzione, dopo un'evoluzione della durata complessiva di 200 generazioni.

<i>Condizione sperimentale</i>	<i>Numero di individui con fitness minore di 50</i>
Assenza del predatore	190
Predatore presente per il 25% del tempo	36
Predatore sempre presente	16

Tabella 3 - Il numero di individui che, al termine dell'evoluzione, ha totalizzato un valore di fitness minore di 50 nelle tre diverse condizioni sperimentali.

Nelle simulazioni in cui compare il predatore, l'iniziale coda sinistra della distribuzione, costituita dagli organismi incapaci di adottare un comportamento anche soltanto un minimo efficiente, si smaltisce con il passare delle generazioni. Effetto che non si verifica, invece, nel caso in cui il predatore non sia mai presente: in questa situazione, il 20% circa degli organismi, alla centesima generazione così come all'ultima, risulta ancora incapace di sviluppare un comportamento adattivo nei confronti dell'ambiente.

Test sull'utilità del rumore direzionato

Per verificare se la presenza di rumore è effettivamente sfruttata dagli organismi per muoversi in maniera mediamente più efficace, al di là di quanto già emerso a livello globale dalle simulazioni precedenti, è stato elaborato un piccolo "test".

Da tutti i 10 seeds della simulazione svolta con il predatore, innocuo, presente mediamente per il 25% del lifespan degli organismi (una condizione nella quale, pertanto, gli organismi hanno imparato a convivere sia con la presenza sia con l'assenza di rumore), sono stati presi i 100 organismi dell'ultima generazione e li si sono "trasferiti" in un altro contesto.

I 1000 individui sono stati inseriti, singolarmente, all'interno di 200 ambienti diversi, dentro a ciascuno dei quali hanno vissuto per 100 step. Nei primi 100 ambienti il predatore non appariva mai. Nei secondi 100, al contrario, il predatore era sempre presente. La tabella qui sotto riepiloga le performance che gli individui hanno fatto registrare, in media, nei diversi ambienti:

Situazione sperimentale	Quantità media di cibo raccolto
Predatore sempre assente	120.857
Predatore sempre presente	338.169

Tabella 4 – Quantità media di cibo raccolto dagli organismi cresciuti in un ambiente dove il predatore (innocuo) era presente per il 25% del tempo complessivo, "testati" all'interno di ambienti dove, al contrario, il predatore era sempre presente o assente.

Da questi risultati sembra emergere il fatto che il rumore abbia un effetto positivo sulla capacità degli organismi di raccogliere cibo. Più in generale ancora, osservando nel dettaglio le performance fatte registrare dai singoli individui, si nota come oltre 300 organismi evoluti in una condizione "mista", nel nuovo ambiente siano risultati del tutto incapaci di muoversi (aspetto che si deduce, pur senza aver operato uno studio di carattere "behaviourista", dal fatto che in 10'000 passi non sono riusciti a raccogliere neppure una singola unità di cibo).

Rumore gaussiano

Il rumore di cui abbiamo discusso fino a questo momento non è il "classico" rumore gaussiano che si distribuisce con leggi probabilistiche attorno ad un certo valore medio. Il tipo di "rumore" preso in considerazione finora varia in funzione della posizione del predatore, trattandosi della percezione che di esso ha l'organismo. In sostanza, il rumore che stiamo analizzando è per così dire "direzionato".

E' legittimo chiedersi, giunti a questo punto della trattazione, se gli effetti positivi derivanti dalla presenza di rumore che abbiamo osservato siano dovuti proprio a questa caratteristica di "direzionalità" o se invece essi prescindano dalla tipologia del rumore. Si potrebbe infatti sospettare che il fenomeno emerso sia legato al fatto che gli organismi non hanno "consapevolezza" di quali siano i confini del mondo all'interno del quale si muovono (il quale, come già ricordato, non è toroidale). L'input sensoriale del predatore potrebbe così essere utilizzato, in aggiunta a quello del cibo, per orientarsi tendenzialmente, in un modo non necessariamente molto preciso, verso le ricche

(in termini di cibo) zone centrali dell'ambiente ed evitare così di vagare lungo le avare "periferie" (comportamento agevolato dal fatto che, in caso di urto contro uno dei confini, l'organismo viene ruotato di 180°: dopo qualche generazione è frequente vedere organismi il cui comportamento, fortemente stereotipato, li porta a percorrere continuamente i bordi dell'ambiente senza mai staccarsi da esso).

Per chiarire la questione sono state elaborate altre due simulazioni, nelle quali il predatore non compare più rispettivamente per il 25% ed il 100% del tempo complessivo. Al posto del predatore, con le medesime tempistiche, l'organismo percepisce ora rumore gaussiano (con media 0.5 e deviazione standard 0.05).

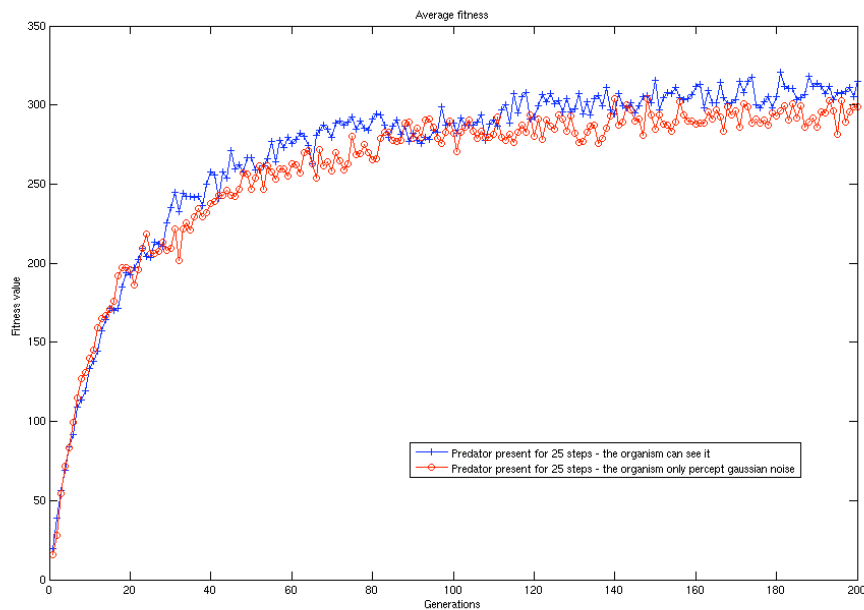


Figura 31 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra rumore direzionato e rumore gaussiano percepiti dagli organismi per il 25% del tempo della simulazione (media di 10 seeds).

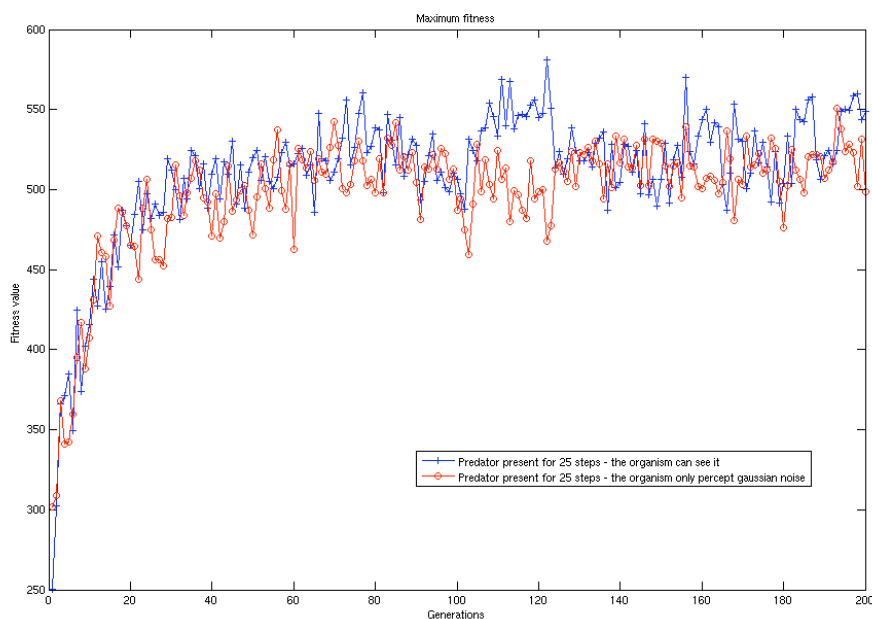


Figura 32 - Valore massimo della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra rumore direzionato e rumore gaussiano percepiti dagli organismi per il 25% del tempo della simulazione (media di 10 seeds).

Le figure 31 e 32, utilizzando come termine di confronto la fitness media e quella massima, comparano la situazione in cui per il 25% del tempo è presente rumore direzionato con quella in cui, per lo stesso tempo, è presente rumore gaussiano. I risultati mostrano una tendenziale somiglianza (vi è, in questo caso, un leggero “vantaggio” del rumore direzionato), assestandosi su valori medi migliori rispetto alla corrispettiva situazione priva di rumore, ma su valori massimi inferiori.

Discorso del tutto analogo (figure 33 e 34) nel caso in cui il rumore gaussiano è presente per tutta la vita degli organismi. L’unica differenza, in questo caso, è che le performance sono migliori quando c’è rumore gaussiano rispetto a quando vi è rumore direzionato.

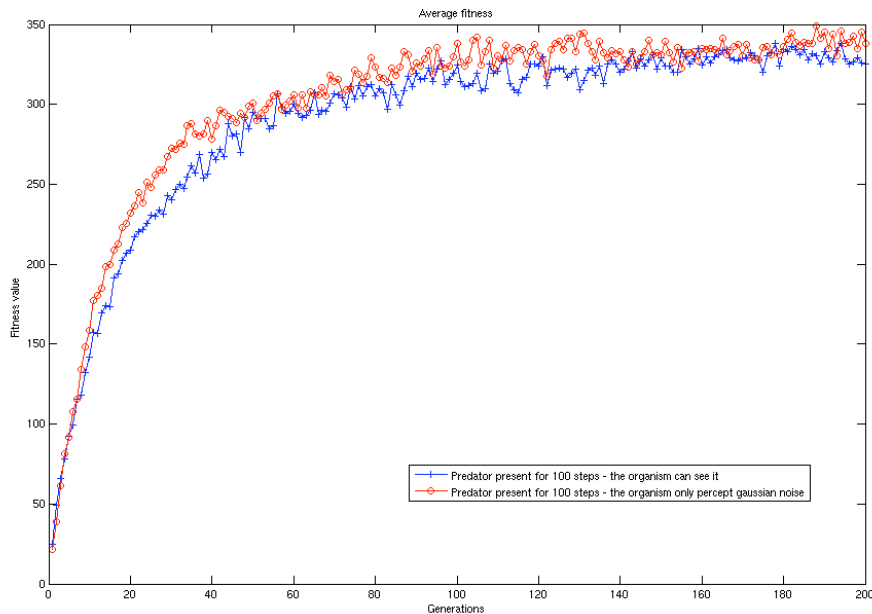


Figura 33 - Valore medio della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra rumore direzionato e rumore gaussiano percepiti dagli organismi per il tempo totale della simulazione (media di 10 seeds).

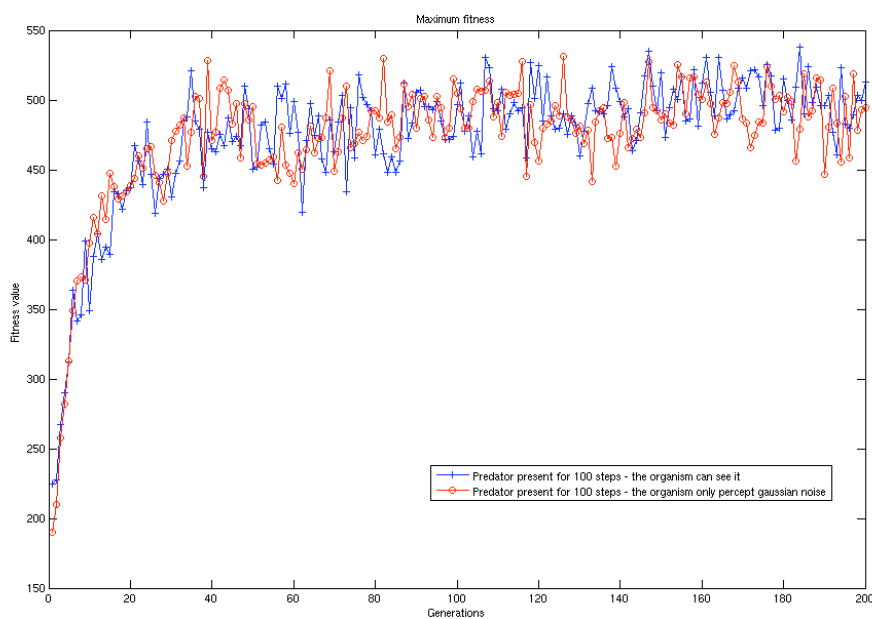


Figura 34 - Valore massimo della fitness dei singoli individui lungo le 200 generazioni: confronto tra rumore direzionato e rumore gaussiano percepiti dagli organismi per il tempo totale della simulazione (media di 10 seeds).

L'analisi delle distribuzioni (figure 35 e 36) mostra ancora come la presenza di rumore contribuisca a diminuire il volume della coda di sinistra. In maniera tanto più marcata quanto per più tempo è presente il rumore.

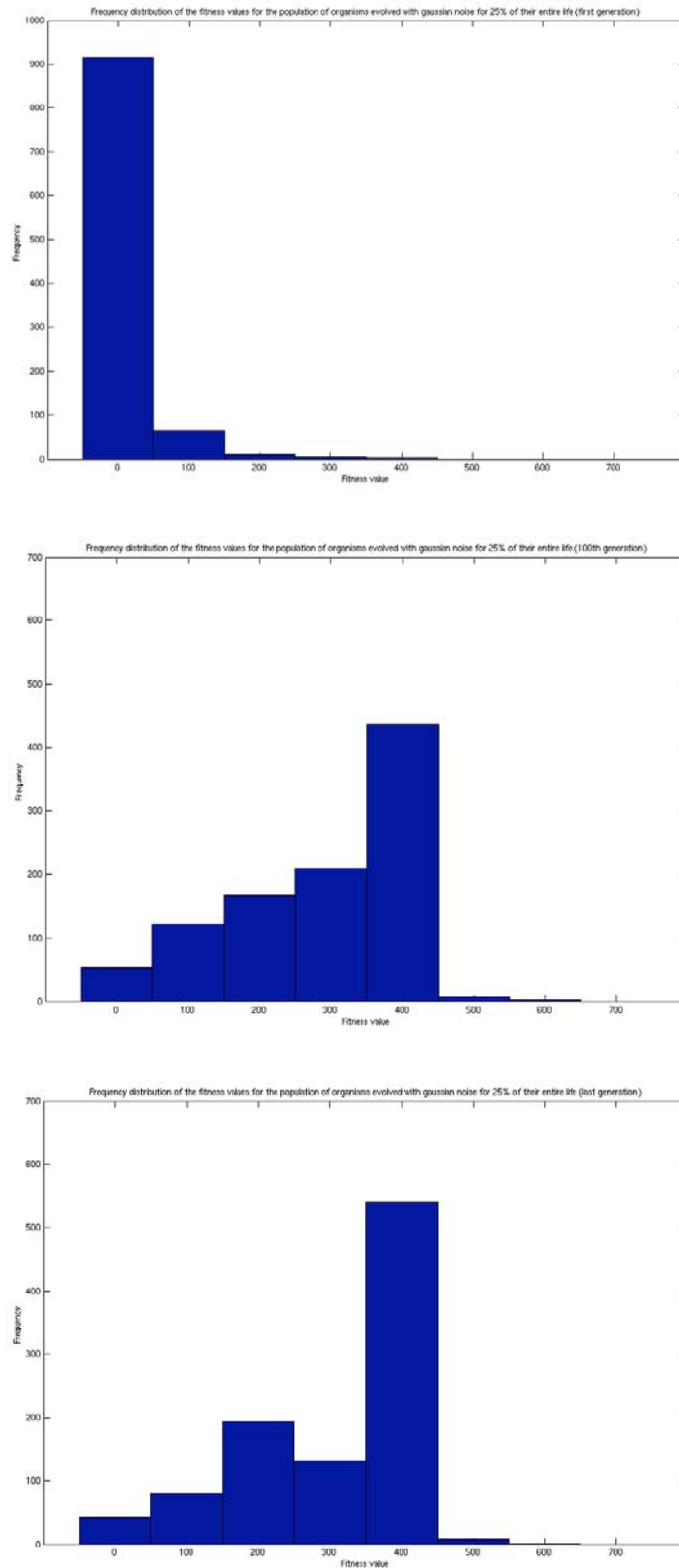


Figura 35 - Distribuzione dei valori di fitness, rispettivamente alla prima, alla centesima ed all'ultima generazione, nella simulazione in cui rumore gaussiano è percepito dall'organismo, mediamente, per il 25% della sua vita (la popolazione complessiva è composta da 1000 individui, poiché raccoglie tutti i 10 seeds svolti).

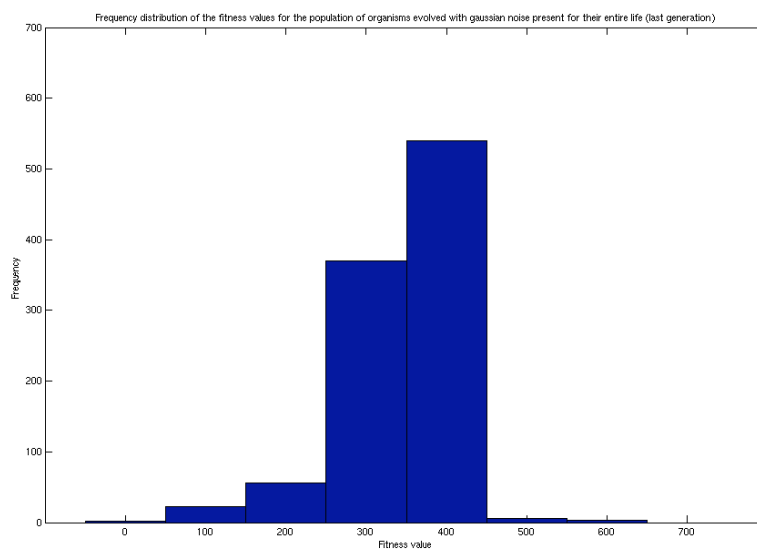
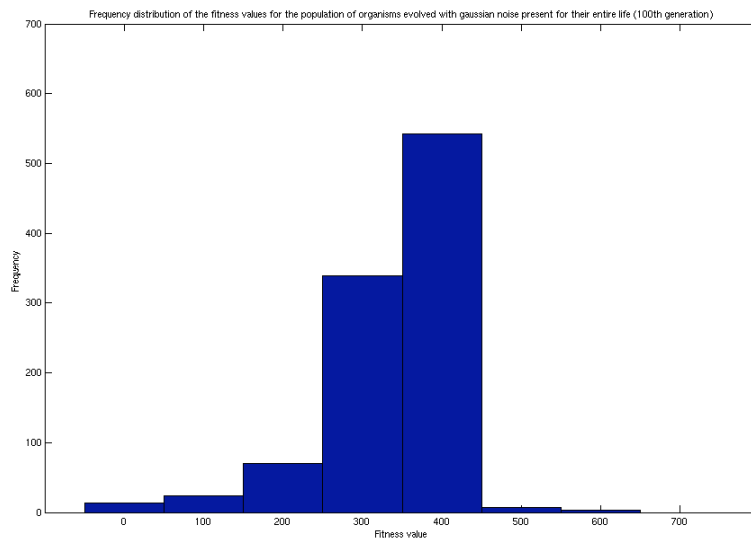
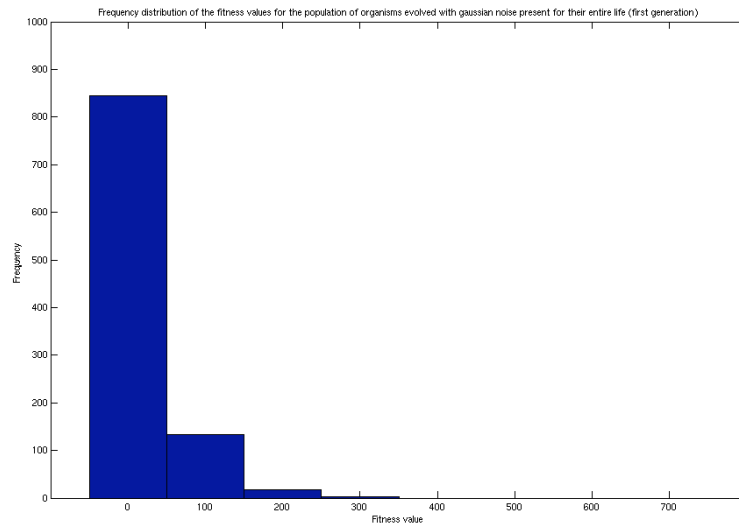


Figura 36 - Distribuzione dei valori di fitness, rispettivamente alla prima, alla centesima ed all'ultima generazione, nella simulazione in cui rumore gaussiano è sempre percepito dall'organismo (la popolazione complessiva è composta da 1000 individui, poiché raccoglie tutti i 10 seeds svolti).

Conclusioni: dove stiamo andando

Il lavoro di cui sono stati presentati i risultati all'interno di questo elaborato è parte di uno sforzo di più ampia portata. Fino ad oggi, nel campo della vita artificiale, la maggior parte degli studi volti ad indagare il comportamento degli organismi è stata condotta attraverso la creazione di semplici "organismi simulati" impegnati ad eseguire singoli compiti, estremamente specifici. Compiti la cui esecuzione richiede solitamente la scomposizione del problema principale in diversi sotto-compiti, gerarchicamente organizzati o meno, ma tutti comunque finalizzati al raggiungimento dell'obiettivo "globale" prefissato.

Ad esempio, in un ambiente come quello di cui si è discusso in questo lavoro, in assenza del predatore un organismo ha un solo compito da svolgere: raccogliere cibo. Tale compito può essere suddiviso in vari task gerarchicamente sequenziali: ruotare il corpo nella direzione più appropriata, fare uno o più passi in avanti, ruotare nuovamente il corpo, ecc... Tutti task funzionali al medesimo obiettivo: raccogliere cibo.

Questa metodologia di ricerca, focalizzata sul perseguimento, da parte degli organismi, di un singolo obiettivo, ha prodotto (e continua a produrre) risultati estremamente interessanti, solide basi per i futuri sviluppi nell'intero campo delle scienze cognitive. Ma altrettanto importante, per arrivare un giorno a comprendere in tutto e per tutto il funzionamento della mente umana, è riuscire a compiere un ulteriore passo in avanti.

E' esperienza quotidiana, per qualsiasi persona, il provare conflitti motivazionali. Avere, in un dato momento, motivazioni diverse, che spingono ad adottare un certo tipo di comportamento piuttosto che un altro. Comportamenti che sono, solitamente, mutuamente esclusivi. L'adozione di un certo comportamento può portare a soddisfare una certa motivazione, ma al tempo stesso impedire di adottare un comportamento differente, il quale avrebbe potuto soddisfare una diversa motivazione. Gli esseri viventi, l'uomo (quale esponente più complesso di questa classe) in particolare, sono costantemente alle prese con un conflitto motivazionale. Devono continuamente operare una scelta tra le diverse motivazioni (numerossime nel caso degli esseri umani) che intendono perseguire, prima di adottare (o non adottare) un qualsiasi comportamento. Ad entrare in gioco, in tutti questi casi, sono due aspetti della psiche ai quali viene solitamente fornita scarsa attenzione dalle "classiche" simulazioni di vita artificiale: la motivazione, come appare evidente dal discorso fatto sinora, ma anche l'attenzione. O, meglio ancora, il prodotto derivante dall'interazione tra questi due aspetti: il meccanismo di attenzione selettiva. E' ampiamente dimostrato, infatti, che la percezione sensoriale influenza lo stato motivazionale: vedere una pizzeria, quando si è affamati, accentua la sensazione di fame. Al tempo stesso vale il contrario, ossia che un certo stato motivazionale condiziona il modo in cui vengono percepiti gli stimoli esterni: un organismo bisognoso di cibo tenderà ad ignorare gli stimoli percettivi incongruenti con il suo stato motivazionale interno, focalizzandosi su quelli che possono invece giocare un ruolo positivo nel soddisfare la sua fame.

Ed è proprio un meccanismo di attenzione selettiva quello che evolve dalla simulazione descritta in questo lavoro. Nel momento in cui all'interno dell'ambiente appare il predatore, gli organismi smettono di preoccuparsi di raccogliere cibo (ignorano, di fatto, quella parte dell'informazione sensoriale) e concentrano la loro attenzione sulla posizione della "fonte del pericolo" (la parte rimanente della percezione proveniente dall'ambiente), elaborando la risposta comportamentale più adatta, ovvero la fuga. In questo caso, il comportamento adottato dagli organismi è pressoché analogo a quello che essi adotterebbero nel caso in cui il cibo fosse del tutto assente dall'ambiente.

Quando il predatore è presente, il conflitto motivazionale che gli organismi vivono, se di vero e proprio conflitto motivazionale si può parlare, viene immediatamente risolto a favore del

comportamento di fuga. Nonostante potrebbero tranquillamente ignorare il predatore e continuare a focalizzare le loro risorse cognitive sul compito di raccogliere cibo, tale modo d'agire non risulterebbe vantaggioso per gli organismi, poiché il danno procurato da una cattura risulta essere dieci volte superiore rispetto al beneficio che è possibile trarre dal raccogliere un'unità di cibo.

In generale, l'informazione riferita all'importanza relativa delle singole motivazioni è contenuta all'interno della cosiddetta "struttura motivazionale" di un organismo. Si tratta evidentemente di una struttura dinamica, che varia parallelamente al processo di sviluppo/crescita dell'organismo ed anche a seconda del contesto, fisiologico ed ambientale. In un modello simulativo sviluppato su base esclusivamente genetica come quello qui presentato (dove, in sostanza, non ha luogo un apprendimento culturale, in vita), la struttura motivazionale degli organismi che evolvono è fissata, fin dalla prima generazione, attraverso la formula di fitness. Sulla quale, come abbiamo osservato, gioca un ruolo molto importante il parametro *capture damage*, che indica, in maniera quantitativa, l'ammontare del danno che il predatore procura all'organismo in caso di cattura. Ovvero, indica quanta "importanza", motivazionalmente parlando, l'organismo deve attribuire ad una eventuale cattura da parte del predatore. A seconda del valore di questo parametro, si è infatti osservato che gli organismi si comportano in maniera differente, ignorando in maniera più o meno netta l'informazione sensoriale proveniente dal cibo nel momento in cui nell'ambiente compare il predatore (si vedano le figure da 14 a 17).

Come si può facilmente immaginare, sarebbe un compito oltremodo difficile quello di riuscire a definire aprioristicamente l'intera struttura motivazionale di un organismo, includendo al suo interno tutte le variabili che, in ogni dato momento, ne determinano il comportamento. Ancor più arduo sarebbe il riuscire a trovare il "giusto peso" da assegnare a ciascuna di queste componenti. Ma non va dimenticato che, d'altronde, le simulazioni devono necessariamente rimanere delle rappresentazioni semplificate del mondo reale. Esse non devono cadere nella tentazione di diventare fotocopie della realtà, o perderebbero ogni utilità, ricreando un fenomeno complesso e del tutto indecifrabile come quello che già abbiamo sotto ai nostri occhi (sebbene lo ricostruirebbero ipoteticamente in una maniera assolutamente "quantitativa", risolvendo così uno dei principali problemi che affligge la psicologia moderna, ossia la difficoltà nel "quantificare" fenomeni individuali che sono, per loro stessa natura, quanto di più soggettivo possa esistere). Le simulazioni possono al contrario servirci per ricreare quei meccanismi basilari che poi, complicati con l'aggiunta di tutte quelle componenti che nella realtà esercitano una certa influenza, determinano il modo d'agire degli esseri viventi. Esattamente come il meccanismo di attenzione selettiva che si è ricreato alla perfezione nella simulazione in esame.

Conclusioni: cosa abbiamo trovato

Ora che abbiamo collocato questo lavoro all'interno di una prospettiva più ampia, possiamo riepilogare e porre un'interpretazione dei risultati ottenuti.

Prima di farlo è però doveroso premettere che il fenomeno osservato, il ruolo "positivo" giocato dal rumore, non è mai stato oggetto di particolare interesse da parte della letteratura sulle reti neurali che evolvono attraverso algoritmo genetico. Esso è stato trattato, in maniera estensiva ed esaustiva, soltanto in riferimento alle reti neurali addestrate tramite backpropagation. Ed è ormai un dato accettato ed ampiamente dimostrato quello che le reti neurali addestrate tramite la somministrazione di training pattern rumorosi sviluppano una miglior capacità di generalizzazione/categorizzazione rispetto a quelle che imparano a svolgere questo compito dopo un addestramento basato esclusivamente su pattern "puliti". Risultati altrettanto certi non ci sono in riferimento al ruolo del rumore, quando introdotto in input ad architetture neurali i cui pesi evolvono per via genetica. Questo lavoro mira a colmare, in piccolissima parte, tale lacuna.

Sulla base dei risultati ottenuti durante questo piccolo studio, si può affermare che la presenza di rumore giochi sostanzialmente un duplice ruolo.

Da un lato, una simulazione nella quale è presente una certa “dose” di rumore porta all’evoluzione di individui mediamente più efficienti rispetto a quelli che possono evolversi all’interno di un ambiente “pulito”; al tempo stesso, però, i pattern comportamentali globalmente più efficienti sono quelli che si sviluppano all’interno di contesti evolutivi privi di rumore. Dall’altro lato, la presenza di rumore dà origine a popolazioni internamente più omogenee rispetto a quelle che si sviluppano in un ambiente pulito, dove per maggior omogeneità si intende l’esser composte da organismi che performano in maniera molto simile tra loro. In sostanza, all’aumentare del rumore, aumenta (con una relazione che sembra essere vagamente lineare, ma che i dati raccolti non ci consentono di definire in maniera più precisa) l’efficienza media del comportamento evoluto all’interno di una popolazione. Tale incremento medio si realizza attraverso la diminuzione dell’efficienza dei migliori “rappresentanti” della popolazione e soprattutto tramite il miglioramento di quella dei suoi peggiori “rappresentanti”.

Si è infatti notato che, nelle diverse situazioni sperimentali elaborate in assenza di rumore, la distribuzione della fitness nelle varie popolazioni metteva regolarmente in evidenza una rilevante coda sinistra, presente sin dalla prima generazione e perdurante (seppur con un’entità ridotta) fino al termine dell’evoluzione. Si potrebbe ipotizzare che, essendo la mutazione genetica applicata in maniera abbastanza intensiva (probabilità 0.25 per ciascun peso e modifica casuale del valore sinaptico compresa tra -0.5 e +0.5), la presenza di una rilevante coda sinistra nelle distribuzioni sia un fatto in qualche modo “naturale”: la fragilità della rete aumenta con il perfezionarsi del comportamento adattivo che, diventando via via più complicato, richiede valori sinaptici sempre più precisi. E quindi sempre più sensibili al modificarsi, anche leggero, di un singolo peso della rete. I “collassi”, che capitano ogni qualvolta che la mutazione viene applicata, determinano l’ampiezza della coda di sinistra della distribuzione della fitness.

Ma il fenomeno descritto non si è verificato nelle situazioni sperimentali in cui era presente rumore. In esse, infatti, la coda sinistra, “fisiologicamente” presente nelle primissime generazioni, tendeva ad affievolirsi con il procedere dell’evoluzione, fino praticamente a scomparire all’ultima generazione.

Appurato dunque che il problema non è di carattere “strutturale”, l’unica spiegazione plausibile rimane quella secondo la quale la presenza di rumore conduce verso l’esplorazione di uno spazio delle soluzioni radicalmente differente rispetto a quello che viene esplorato in assenza di rumore. A quanto pare, la presenza di rumore favorisce infatti il raggiungimento, nello spazio multi-dimensionale della fitness, di un punto di massimo locale più stabile rispetto a quello (di massimo globale?) raggiunto da una simulazione “non-rumorosa”. La maggior stabilità del punto raggiunto in presenza del rumore giustifica il fatto che le popolazioni siano distribuite in maniera abbastanza omogenea al loro interno, senza code rilevanti. Al contrario, la non-stabilità della soluzione raggiunta in assenza di rumore, viene premiata puramente in termini riproduttivi ed ha come contraltare il fatto che la minima perturbazione può far piombare l’architettura neurale dell’organismo verso un punto di minimo locale. E questo giustificherebbe la presenza, anche dopo numerose generazioni, di individui insensibili all’input o comunque decisamente inefficienti.

I risultati di alcune ricerche condotte in parallelo alla mia e di cui mi è stato riferito per ora in maniera soltanto informale, svolte su problemi per i quali è noto il panorama della fitness (quale ad esempio lo XOR) sembrano confermare questo ruolo del rumore nell’evoluzione genetica di reti neurali ecologiche.

Bibliografia di riferimento

Balkenius C., *Motivation and Attention in an Autonomous Agent* (in Sloman, A. (Ed.), Proceedings of the Workshop on Architectures Underlying Motivation and Emotion (WAUME '93). Birmingham: University of Birmingham, 1993);

Mitchell M., *An introduction to Genetic Algorithms* (Cambridge MA, MIT Press, 1998);

Floreano D., Mattiussi C., *Manuale sulle Reti Neurali* (Bologna, Il Mulino, 2002);

Cecconi F., Parisi D., *Neural Networks with Motivational Units* (in J.A. Meyer, H. Roitblat, S.W. Wilson (eds), From Animals to Animats 2: proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. MIT Press/Bradford Books, 1992);

Lund H.H., Parisi D., *Generalist and Specialist Behavior Due to Individual Energy Extracting Abilities* (in Proceedings of Artificial Life V. MIT Press/Bradford Books, 1996);

Parisi D., *Mente. I nuovi modelli della vita artificiale* (Bologna, Il Mulino, 1999);

Parisi D., *Simulazioni. La realtà rifatta nel computer* (Bologna, Il Mulino, 2001);

Parisi D., *Una nuova mente* (Torino, Codice, 2006);

Plunkett K., Elman J.L., *Exercises in Rethinking Innateness. A Handbook for Connectionist Simulations* (MIT Press/Bradford Books, 1997);

Nolfi S., Pedone R., Parisi D., *How noise helps generalization in feed-forward networks* (in E.R. Caianiello (ed.), Neural Nets Wirm Vietri-92: Fifth Italian Workshop. Singapore, World Scientific, 1992, pp. 133-139);

Nolfi S., Parisi D., *Neural Networks in Artificial Life Perspective* (in W.Gerstner, A.Germond, M.Hasler, and J.D.Nicoud (Eds.) Artificial Neural Networks (ICANN97). Proceedings of the 7th International Conference on Artificial Neural Networks. Berlin: Springer Verlag, 1997, pp. 733-738);

Nolfi S., Parisi D., *Evolution of Artificial Neural Networks* (in M. A.Arbib, Handbook of brain theory and neural networks, Second Edition (pp. 418-421). Cambridge, MA: MIT Press, 2002);

Emmeche C., *Il giardino nella macchina. Della Vita Artificiale* (Torino, Bollati Boringhieri, 1996);

Castelfranchi Y., Stock O., *Macchine come noi. La scommessa dell'intelligenza artificiale* (Bari, Laterza, 2003)

Parisi D., *Motivation and attention in robots* (Draft, 2007);

Ruini F., Parisi D., *Towards a robotic model of depression* (proceeding, 2007);

Note: i risultati di cui si è parlato in questa tesina sono stati ricavati a margine del mio lavoro di tesi, tuttora in corso di svolgimento presso l'Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione del CNR di Roma.