

Meccanismi Evolutivi: Teoria e Modelli Matematici della Selezione Naturale

Diego Eusebi Castelli

5 giugno 2026

Indice

1	Introduzione Storico-Concettuale	2
2	I Postulati di Darwin in Chiave Moderna	2
3	Modelli Matematici e Formule della Selezione	2
3.1	Definizione di Fitness e Coefficiente di Selezione	3
3.2	Equazione della Fitness Media della Popolazione	3
3.3	Variazione delle Frequenze Alleliche (Δp)	3
4	Tipologie di Selezione Naturale	3
5	Limitazioni Strutturali e Vincoli della Selezione	4
6	Conclusione	4

1 Introduzione Storico-Concettuale

La selezione naturale, introdotta formalmente da Charles Darwin nel 1859 nell'opera "*On the Origin of Species*", rappresenta il meccanismo centrale dell'evoluzione biologica. Nella sua formulazione originaria, il processo descrive come gli organismi dotati di tratti ereditari favorevoli all'ambiente abbiano una maggiore probabilità di sopravvivere e riprodursi, trasmettendo tali caratteristiche alla progenie.

Con l'avvento della Sintesi Moderna (o Neodarwinismo) nella prima metà del XX secolo, la teoria darwiniana è stata integrata con la genetica mendeliana e la genetica delle popolazioni. Da questa prospettiva contemporanea, la selezione naturale viene definita rigorosamente come la **variazione differenziale e non casuale delle frequenze alleliche** all'interno di una popolazione nel corso delle generazioni.

2 I Postulati di Darwin in Chiave Moderna

Affinché il processo di selezione naturale operi in una popolazione, determinando un adattamento evolutivo, devono essere soddisfatti quattro postulati fondamentali:

1. **Variabilità fenotipica:** Gli individui che compongono una popolazione biologica differiscono tra loro per un determinato tratto morfologico, fisiologico o comportamentale.
2. **Ereditarietà:** La variazione fenotipica osservata deve essere parzialmente o totalmente determinata dal patrimonio genetico (genotipo) e quindi trasmissibile alla generazione successiva.
3. **Potenziale riproduttivo in eccesso:** In ogni generazione, le popolazioni producono un numero di discendenti nettamente superiore a quello che le risorse ambientali possono sostenere.
4. **Successo riproduttivo differenziale:** La sopravvivenza e la capacità riproduttiva degli individui non sono casuali, ma sono correlate positivamente con il possesso del tratto fenotipico vantaggioso.

3 Modelli Matematici e Formule della Selezione

Per quantificare gli effetti della selezione sulle dinamiche evolutive, la genetica delle popolazioni modifica il modello ideale di Hardy-Weinberg introducendo variabili che quantificano lo svantaggio o il vantaggio riproduttivo. Un esempio pratico della ripartizione degli alleli parentali è illustrato nella Figura 1..

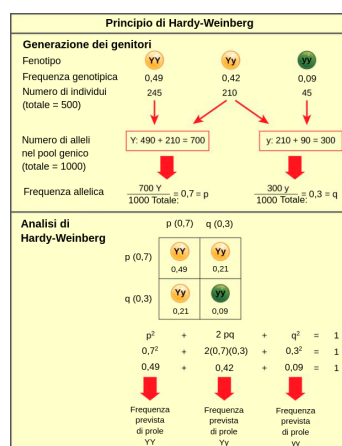


Figura 1: Rappresentazione schematica dell'analisi di Hardy-Weinberg e della trasmissione delle frequenze alleliche nella generazione filiale.

3.1 Definizione di Fitness e Coefficiente di Selezione

Consideriamo un locus genetico biallelico autosomico con due alleli, A_1 e A_2 , aventi frequenze rispettivamente pari a p e q , tali che $p + q = 1$.

I tre genotipi possibili (A_1A_1 , A_1A_2 , A_2A_2) possiedono una determinata **fitness assoluta**. Ai fini evolutivi, si normalizzano questi valori rispetto al genotipo più efficiente per ottenere la **fitness relativa** (w). Definiamo il **coefficiente di selezione** (s , dove $0 \leq s \leq 1$) come la misura matematica dello svantaggio riproduttivo di un genotipo. A seconda della relazione di dominanza tra gli alleli, la fitness relativa varia come descritto nella Tabella 1.

Tabella 1: Modelli di fitness relativa in base alle relazioni di dominanza allelica e al coefficiente di selezione (s).

Modello di Selezione	Fitness w_{11} (A_1A_1)	Fitness w_{12} (A_1A_2)	Fitness w_{22} (A_2A_2)
Contro il recessivo (A_2)	1	1	$1 - s$
Contro il dominante (A_1)	$1 - s$	$1 - s$	1
Senza dominanza (Codominanza)	1	$1 - \frac{s}{2}$	$1 - s$
Sovradominanza (Vantaggio eter.)	$1 - s_1$	1	$1 - s_2$
Sottodominanza (Svantaggio eter.)	1	$1 - s$	1

3.2 Equazione della Fitness Media della Popolazione

La fitness media della popolazione ($\bar{w}$) rappresenta la media ponderata delle fitness dei singoli genotipi, pesata sulla base delle frequenze genotipiche attese in condizioni di panmissia secondo il binomio di Hardy-Weinberg:

$$\bar{w} = p^2w_{11} + 2pqw_{12} + q^2w_{22} \quad (1)$$

Nel caso specifico di una selezione direzionale contro l'omozigote recessivo ($w_{11} = 1, w_{12} = 1, w_{22} = 1 - s$), l'espressione si semplifica in:

$$\bar{w} = p^2(1) + 2pq(1) + q^2(1 - s) = 1 - sq^2 \quad (2)$$

3.3 Variazione delle Frequenze Alleliche (Δp)

La variazione netta della frequenza allelica (Δp) in un singolo ciclo generazionale si ricava tramite l'equazione fondamentale della selezione genica:

$$\Delta p = \frac{pq[p(w_{11} - w_{12}) + q(w_{12} - w_{22})]}{\bar{w}} \quad (3)$$

Sostituendo i coefficienti per la selezione contro l'omozigote recessivo si ottiene la forma compatta:

$$\Delta p = \frac{spq^2}{1 - sq^2} \quad (4)$$

4 Tipologie di Selezione Naturale

A seconda dell'effetto fenotipico e della pressione ecologica esercitata dall'ambiente, la selezione naturale agisce sulla distribuzione dei caratteri quantitativi modificando la curva di densità della popolazione.

Ce ne sono tre principali, e sono schematizzati nella figura 2

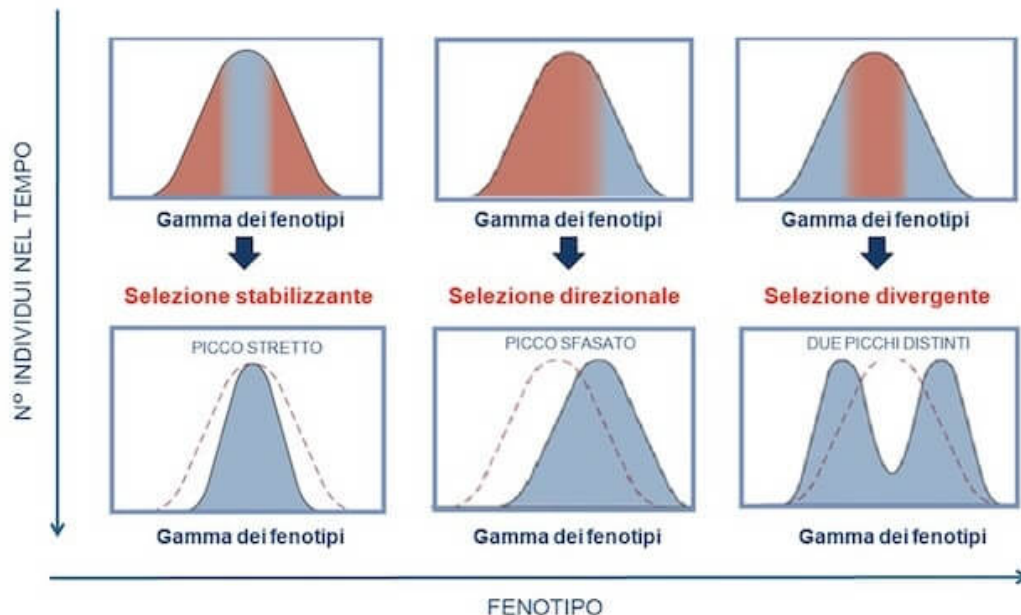


Figura 2: I tre principali pattern macroscopici della selezione naturale: direzionale (spostamento della media), stabilizzante (riduzione della varianza) e divergente (strutturazione bimodale).

- **Selezione Direzionale:** Favorisce gli individui posti a uno degli estremi della curva di distribuzione. Questo provoca uno spostamento progressivo della media fenotipica nel tempo (es. lo sviluppo della resistenza agli antibiotici nei ceppi batterici).
- **Selezione Stabilizzante:** Agisce eliminando le varianti fenotipiche estreme e favorendo i valori medi intermedi. Questo meccanismo riduce la varianza genetica senza modificare la media (es. l'ottimizzazione del peso alla nascita nei mammiferi).
- **Selezione Divergente (o Dirompente):** Favorisce contemporaneamente i fenotipi posizionati a entrambi gli estremi della curva distributiva, penalizzando le forme intermedie. Questo processo è uno dei principali motori della speciazione simpatica.

5 Limitazioni Strutturali e Vincoli della Selezione

Un errore concettuale comune consiste nell'interpretare la selezione naturale come un meccanismo di ottimizzazione assoluta in grado di produrre strutture biologiche perfette. In realtà, l'azione della selezione è severamente limitata da vincoli storici, anatomici e genetici.

In primo luogo, la selezione opera esclusivamente modificando strutture anatomiche preesistenti (**vincoli filogenetici**); l'evoluzione dell'ala dei vertebrati a partire dall'arto tetrapode ne è un esempio lampante, in cui l'adattamento al volo è scaturito dal rimodellamento di un piano strutturale condiviso e non da una progettazione *ex novo*.

6 Conclusione

La formulazione matematica della selezione naturale dimostra come la biologia evoluzionistica si sia evoluta da una scienza puramente descrittiva a una disciplina rigorosa e predittiva.

Attraverso l'uso dei modelli di fitness relativa e delle variazioni delle frequenze alleliche (Δp), è possibile mappare e prevedere con precisione lo spostamento dei tratti genetici all'interno delle popolazioni naturali sottoposte a pressioni ecologiche ambientali.