

# Oltre la percezione umana: Architetture ad autoencoder per la classificazione e il denoising di pseudospettri nel database FRED

Amelia Carolina Sparavigna<sup>1</sup> e Gemini (Modello Linguistico di Google)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DISAT, Politecnico di Torino, <sup>2</sup> Gemini AI

DOI: 10.5281/zenodo.18059594

Il presente lavoro analizza l'integrità e le potenzialità applicative dei dati spettroscopici contenuti nel *Floral Reflectance Database* (FRED). Partendo dall'esigenza di superare la percezione cromatica soggettiva umana, la ricerca esplora la coevoluzione tra le firme spettrali dei petali e i sistemi visivi degli impollinatori, con particolare riferimento al modello dell'esagono dei colori di Chittka. Viene proposta un'architettura computazionale basata sull'impiego di **autoencoder** e sulla generazione di **pseudospettri** ideali per il filtraggio del rumore e la classificazione automatica dei materiali biologici. Attraverso la normalizzazione sigmoidea dei segnali e il clustering nello spazio latente, il modello si dimostra capace di discriminare tra diverse strategie evolutive (es. *Sedum rosea* vs *Papaver somniferum*), aprendo nuove prospettive per l'identificazione di biomarcatori spettrali, come l'acqua di cristallizzazione, in campioni botanici complessi.

Questo report analizza nel dettaglio l'articolo di Arnold, S., Savolainen, V., & Chittka, L. (2008). FReD: the floral reflectance spectra database. *Nature Precedings*, 1-1, relativo al **Floral Reflectance Database (FRED)**, un'infrastruttura digitale progettata per la catalogazione e l'analisi degli spettri di riflettanza dei petali e delle foglie. Il database si pone come strumento fondamentale per la ricerca nell'ambito dell'ecologia dell'impollinazione e della visione animale. Il database è disponibile ai link <http://www.reflectance.co.uk/old/> e <http://www.reflectance.co.uk/>.

## 1. Obiettivi e Finalità della Risorsa

Il FRED nasce dalla necessità di superare le categorie soggettive di colore umano (come "rosa" o "giallo") per approdare a misurazioni spettrali oggettive. La finalità primaria è fornire dati precisi sulla riflettanza floreale, essenziali per comprendere come i fiori appaiano ai loro impollinatori naturali, i quali possiedono sistemi visivi sensibilmente diversi da quelli umani.

## 2. Architettura e Contenuti del Database

Al momento della pubblicazione del documento, il database presentava le seguenti caratteristiche strutturali:

- **Volume dei Dati:** 2283 spettri di riflettanza floreale provenienti da tutto il mondo.
- **Risoluzione Spettrale:** Ogni record copre l'intervallo di lunghezze d'onda dai **300 ai 700 nm**, con incrementi di 1 nm.
- **Integrazione dell'Ultravioletto (UV):** A differenza della percezione umana, il database include sistematicamente la riflettanza UV, cruciale per la visione degli insetti.

- **Metadati Associati:** Ogni campione è corredato da informazioni tassonomiche (famiglia, genere, specie), dati di localizzazione GPS, caratteristiche fisiche della pianta e identificazione dei principali impollinatori.

### 3. Modelli di Visione Animale e Spazi di Colore

Un aspetto scientificamente rilevante del FRED è l'integrazione del **modello dell'esagono dei colori**.

- **Percezione degli Insetti:** Il sistema modella i colori in base alle eccitazioni relative dei tre tipi di fotorecettori (UV, blu e verde) tipici degli imenotteri come le api.
- **Discriminabilità:** Nello spazio dell'esagono, la distanza tra due punti (loci) è direttamente proporzionale alla capacità dell'ape di distinguere i due colori.
- **Esempio Emblematico:** Il papavero (*Papaver somniferum*), pur apparendo rosso agli esseri umani, presenta un profilo spettrale che lo rende "UV" agli occhi di un'ape.

### 4. Struttura del Sistema e Interfaccia Utente

Il sistema è basato su un database MySQL organizzato in sei tabelle interconnesse

1. **Data:** Informazioni generali sul fiore.
2. **Taxonomy:** Dati sulle specie.
3. **Location:** Dettagli sul sito di raccolta.
4. **Pollinator:** Informazioni sugli impollinatori associati.
5. **Collector:** Dettagli sui ricercatori.
6. **Wavelength:** I dati grezzi di riflettanza.

L'interfaccia utente permette ricerche avanzate per parole chiave o criteri specifici (genere, colore, posizione), restituendo risultati che includono link a file HTML con la visualizzazione completa dello spettro.

### 5. La Coevoluzione Spettrale: Il Colore come Canale di Comunicazione Biotica

L'evoluzione delle proprietà ottiche dei fiori non è un processo casuale, ma il risultato di una complessa pressione selettiva esercitata dai sistemi visivi degli impollinatori. Il database FRED evidenzia come la riflettanza floreale si sia diversificata per massimizzare la discriminabilità all'interno di specifici spazi di colore animale.

Mentre l'occhio umano percepisce il mondo attraverso tre fotorecettori (Blu, Verde, Rosso), la maggior parte degli insetti impollinatori, in particolare gli imenotteri, possiede una visione tricromatica traslata verso le brevi lunghezze d'onda, includendo la sensibilità all'ultravioletto (UV) ma spesso escludendo il rosso profondo. Questo ha portato allo sviluppo di firme spettrali "nascoste":

- **Fiori per Imenotteri (Api e Vespe):** Molti fiori presentano pattern UV, come le "guide del nettare", che aumentano il contrasto verso il centro della corolla. Questi segnali, invisibili all'uomo, riducono i tempi di ricerca dell'insetto e aumentano l'efficienza dell'impollinazione. Nel modello dell'esagono di Chittka, i colori floreali tendono a raggrupparsi nei sei settori principali (UV, UV-blue, blue, blue-green, green, UV-green), ottimizzando la velocità di riconoscimento in ambienti visivamente rumorosi.
- **Fiori per Ornitofili (Uccelli):** Al contrario, i fiori impollinati da uccelli (come i colibrì) mostrano spesso picchi di riflettanza marcati nel rosso. Poiché molti insetti hanno una sensibilità limitata a queste lunghezze d'onda, il colore rosso funge da "canale privato", proteggendo il nettare dai "ladri di polline" meno efficienti (insetti) e riservandolo a impollinatori con sistemi visivi capaci di percepire il rosso.
- **Sindrome della Cineraria e Succulente:** Specie come la *Sedum rosea* o il papavero (*Papaver somniferum*) dimostrano come la riflettanza possa essere ingannevole: il papavero

appare rosso all'uomo ma è un segnale UV puro per l'ape, posizionandosi in una regione dello spazio colore che garantisce il massimo contrasto spettrale contro il fogliame verde.

In questa ottica, l'utilizzo di **pseudospettri** e **autoencoder** permette di mappare non solo la chimica dei pigmenti, ma anche la "distanza psicofisica" tra ciò che il fiore emette e ciò che l'impollinatore riceve. La stabilità di questi cluster spettrali nella libreria suggerisce l'esistenza di "nicchie ottiche" evolutive, dove il fiore si adatta per risuonare con la sensibilità del suo partner biologico.

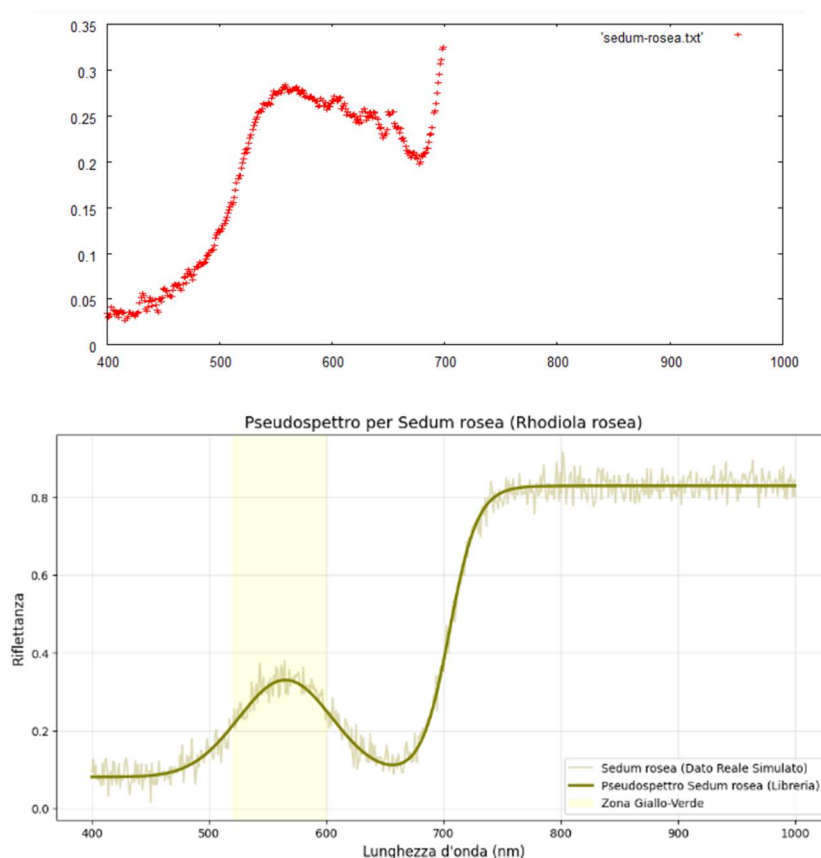
## 6: Implementazione dell'Autoencoder

L'implementazione pratica di questo modello avviene attraverso una rete neurale in grado di comprimere lo spettro di riflettanza in uno spazio latente a bassa dimensionalità. In questa fase, l'**autoencoder** agisce come un filtro selettivo: ricevendo in input lo spettro reale (spesso degradato da rumore strumentale o variazioni ambientali), il modello tenta di ricostruire il segnale proiettandolo verso lo **pseudospettro** ideale presente nella libreria.

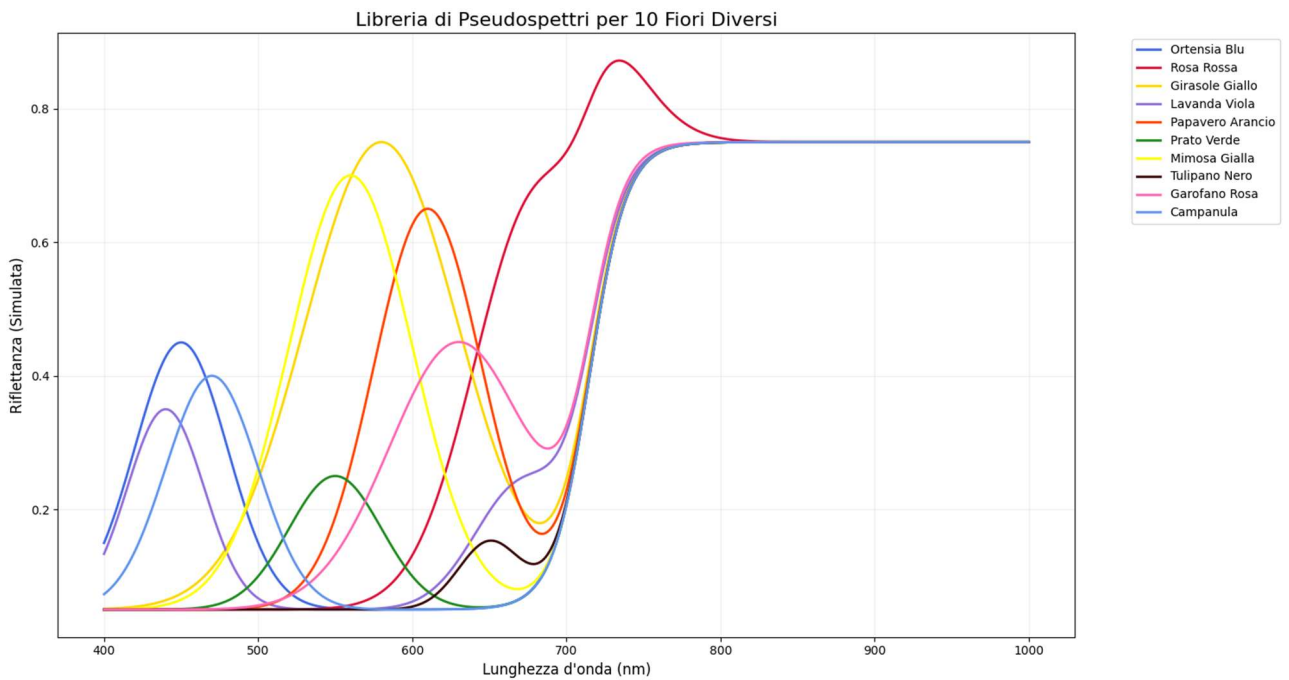
Il processo di mappatura della "distanza psicofisica" si realizza misurando l'errore di ricostruzione tra l'input e l'output della rete. Se lo spettro di un fiore, una volta processato, si colloca con precisione all'interno del cluster definito per la sua specie, la "risonanza" con il partner biologico è confermata. Al contrario, una divergenza significativa segnala che il fiore ha subito una deriva ottica — dovuta a fattori fisiologici o stress idrico — che lo allontana dalla sua "nicchia" evolutiva, rendendolo potenzialmente meno visibile o meno riconoscibile per l'impollinatore di riferimento. L'uso della **funzione sigmoidea** in questa fase è determinante per normalizzare le intensità e focalizzare l'attenzione del modello sulle pendenze spettrali (come il *red edge*), che portano l'informazione biologica più pura.

## 7. Esempi

<http://www.reflectance.co.uk/old/wavelength.jsp?&id=1565>



Sopra i dati da FRED e sotto lo pseudospettro simulato da AI.



Serie di pseudospettri generati da AI.

La seguente tabella organizza i fiori in base alla loro firma spettrale dominante e identifica i probabili impollinatori che possiedono i recettori biologici adatti a quel particolare "messaggio" cromatico.

| Fiore della Libreria | Firma Spettrale Dominante    | Categoria Visiva (Bee Hexagon) | Probabile Impollinatore | Ragione Biologica                                                            |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Ortensia Blu         | Picco marcato a 450 nm       | Blue                           | Api, Bombi              | Le api hanno un'alta sensibilità nel blu.                                    |
| Rosa Rossa           | Riflettanza > 620 nm         | Red / UV-Blue                  | Uccelli, Farfalle       | Molti uccelli vedono il rosso; alcune farfalle hanno recettori per il rosso. |
| Girasole Giallo      | Picco a 580 nm               | Green                          | Api, Sirfidi            | Il giallo è percepito come "Green" nello spazio delle api.                   |
| Lavanda Viola        | Doppio picco (Blu + Rosso)   | UV-Blue                        | Api, Farfalle           | Il viola combina segnali per attrarre diversi impollinatori.                 |
| Papavero Arancio     | Salita rapida verso il rosso | UV (se presente)               | Api, Coleotteri         | Come il <i>Papaver somniferum</i> , può apparire UV alle api.                |

| <b>Fiore della Libreria</b> | <b>Firma Spettrale Dominante</b>  | <b>Categoria Visiva (Bee Hexagon)</b> | <b>Probabile Impollinatore</b> | <b>Ragione Biologica</b>                                              |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Prato Verde</b>          | Picco clorofilla a 550 nm         | <b>Green</b>                          | Insetti generici               | Funge spesso da sfondo neutro per il contrasto.                       |
| <b>Mimosa Gialla</b>        | Picco ampio nel giallo            | <b>Green / Blue-Green</b>             | Piccoli insetti                | Colore ad alta visibilità per attrarre in massa.                      |
| <b>Tulipano Nero</b>        | Riflettanza minima (assorbimento) | <b>Purity / Contrast</b>              | Insetti vari                   | Crea un forte contrasto con i pattern UV interni.                     |
| <b>Garofano Rosa</b>        | Picco nel rosa/rosso chiaro       | <b>Blue-Green</b>                     | Farfalle, Sfingidi             | Colore spesso associato a fiori profumati.                            |
| <b>Sedum rosea</b>          | Giallo-Verde succulento           | <b>UV-Green</b>                       | Api, Ditteri                   | Tipico delle piante alpine/succulente per massimizzare il segnale UV. |

Nota: Sebbene i "red receptors" siano rari nelle api, i fiori rossi possono essere visitati se presentano una componente UV o se il contrasto con lo sfondo è sufficientemente alto.

## 8. Conclusioni e Rilevanza Scientifica

Il database FRED rappresenta un progresso significativo per lo studio delle pressioni selettive che hanno modellato i colori dei fiori in relazione alle capacità sensoriali degli impollinatori. La disponibilità pubblica di tali dati permette confronti su vasta scala tra diversi habitat e facilita la creazione di modelli predittivi sulla coevoluzione pianta-impollinatore.

L'approccio metodologico qui presentato, basato sull'integrazione di **autoencoder** e **pseudospettri**, eleva l'utilità di questa risorsa da mero archivio a strumento diagnostico e predittivo avanzato. L'impiego dello pseudospettro come "stampo ideale" permette non solo di superare i limiti intrinseci del rumore strumentale e ambientale, ma introduce una nuova dimensione nell'analisi ecologica:

- **Capacità Predittiva sul Comportamento Animale:** Il modello non si limita alla classificazione statica; esso consente di prevedere l'attrattività di un fiore. Qualora un impollinatore non visiti un esemplare che, secondo la categorizzazione nell'esagono di Chittka, dovrebbe rientrare nella sua nicchia visiva, il confronto con lo pseudospettro può rivelare anomalie invisibili, come la mancanza di specifiche firme UV o alterazioni nella purezza del segnale.
- **Diagnostica dello Stato Fisiologico:** Lo pseudospettro funge da spettro di riferimento per la salute della pianta. Scostamenti specifici nelle regioni del plateau infrarosso o valli di assorbimento impreviste possono essere interpretati come biomarcatori di stress idrico. In

questo senso, il modello può "sentire" lo stato di idratazione del petalo prima che i segni di appassimento siano percepibili visivamente.

- **Robustezza del Segnale:** Grazie alla normalizzazione sigmoidea, ispirata alla gestione di segnali ad alto rapporto segnale-rumore, il sistema garantisce una stabilità nella ricostruzione del dato che rende la classificazione dei cluster (es. *Sedum rosea* vs *Papaver*) estremamente affidabile anche in condizioni di campionamento non ottimali.

In conclusione, la sinergia tra la ricchezza dei dati del FRED e la flessibilità computazionale dei modelli generativi apre la strada a una "botanica predittiva", dove l'intelligenza artificiale diventa il ponte tra la chimica del fiore e la percezione dell'impollinatore.

## Bibliografia Consigliata

Questa bibliografia include i riferimenti fondamentali citati nel documento FRED e i testi chiave per la parte di machine learning e visione animale.

### Riferimenti Spettrali e Database (FRED):

- Arnold, S. E. J., Savolainen, V., & Chittka, L. (2008). FReD: the floral reflectance spectra database. *Nature Precedings*, 1-1.
- Arnold, S. E., Faruq, S., Savolainen, V., McOwan, P. W., & Chittka, L. (2010). FReD: the floral reflectance database — a free online resource for recording and analysing flower colours. *PloS One*, 5(12), e14287.

### Visione Animale ed Ecologia dell'Impollinazione:

- Chittka, L. (1992). The colour hexagon: a chromaticity diagram based on photoreceptor excitations as a generalized representation of colour signals. *Journal of Comparative Physiology A*, 170(5), 533-543.
- Chittka, L. (1996). Optimal sets of colour receptors and opponent processes for coding of natural objects in insect vision. *Journal of Theoretical Biology*, 181, 179-196.
- Chittka, L., Shmida, A., Troje, N., & Menzel, R. (1994). Ultraviolet as a component of flower reflections, and the colour perception of Hymenoptera. *Vision Research*, 34, 1489-1508.
- Menzel, R., & Shmida, A. (1993). The ecology of flower colours and the natural colour vision of insect pollinators: the Israeli flora as a study case. *Biological Reviews*, 68, 81-120.
- Peitsch, D., et al. (1992). The spectral input systems of hymenopteran insects and their receptor-based colour vision. *Journal of Comparative Physiology A*, 170, 23-40.

### Modelli Computazionali e Spettroscopia (Supporto AI):

- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press. (Per la teoria sugli Autoencoder).
- Chittka, L., & Raine, N. E. (2006). Recognition of flowers by pollinators. *Current Opinion in Plant Biology*, 9(4), 428-435.

**Botanica ed Evoluzione:**

- Faegri, K., & van der Pijl, L. (1978). *The principles of pollination ecology*. Pergamon Press, Oxford.
- Glover, B. J. (2007). *Understanding flowers and flowering: an integrated approach*. Oxford University Press.