

# CnS

## La Chimica nella Scuola

---

n. 1 anno 2026

- **Percorsi laboratoriali per la Scuola Secondaria di secondo grado alla scoperta della ficocianina**
- **Problemi della nostra società: dalla transizione ecologica all'intelligenza artificiale**
- **Il rapporto della Meccanica Quantistica con i concetti classici della chimica e la didattica**
- **Ricerca in didattica: notizie oltre confine**
- **E altro ancora ...**



#### DIRETTORE ONORARIO

Luigi Mondello

#### COMITATO EDITORIALE

*Direttore:* Margherita Venturi

*Vice-direttori:* Eleonora Aquilini, Giovanni Villani

#### COMITATO DI REDAZIONE

Leonardo Anatrini, Eleonora Aquilini, Luigi Campanella,  
Giorgio Cevasco, Marco Ciardi, Valentina Domenici,  
Maria Funicello, Silvano Fuso, Elena Ghibaudi, Carmine Iorio,  
Elena Lenci, Anna Maria Madaio, Giulia Quaglia,  
Raffaele Riccio, Antonella Rossi, Antonio Testoni,  
Francesca Turco, Mariano Venanzi, Margherita Venturi,  
Giovanni Villani, Roberto Zingales

#### COMITATO SCIENTIFICO

*Presidente:* Luigi Campanella

Vincenzo Balzani, Agostino Casapullo, Carlo Fiorentini



**ISSN: 0392-8942**

REGISTRAZIONE: 03/05/1996 n. 219

presso il Tribunale di Roma.

PERIODICITÀ: Bimestrale

# Indice

## Editoriale

- Sono passati cinque anni! ..... 1  
**Margherita Venturi**

## Percorsi laboratoriali per la Scuola Secondaria di secondo grado

- Estrazione e studio della ficocianina da *Spirulina platensis*: un'esperienza  
di didattica laboratoriale ..... 3  
**Anna Maria Madaio**

## Transizione ecologica

- Due parole sui materiali cellulosici ..... 25  
**Luigi Campanella**
- La transizione ecologica è a rischio? ..... 27  
**Fabio Olmi**

## Sfide e problemi della nostra società

- Intelligenza artificiale: vantaggi, opportunità, rischi ..... 37  
**Paola Bortolon**

## Dare voce agli studenti e ai giovani

- Carcinoma mammario: tra prevenzione e ricerca ..... 45  
**Emine Tasan**

## Keywords

- I cent'anni della Meccanica Quantistica. La relazione con i concetti clas-  
sici della chimica e didattica ..... 51  
**Giovanni Villani**

## **Ricerca in didattica – Una finestra sul mondo**

- 16° Conferenza della European Science Education Research Association (ESERA), 25-29 agosto 2025 ..... 63  
**Elena Ghibaudi**

## **News**

- Conferenza ICCE ed ECRICE 2026 a Erzurum, come Roma 2012 ..... 67  
**Liberato Cardellini**

## Sono passati cinque anni!

Margherita Venturi

Cara lettrice e caro lettore,

sono passati cinque anni da quando ho accettato di dirigere questa rivista e da quando la CLUEB è diventata la nuova casa editrice.

Sono stati anni impegnativi, ma molto gratificanti: la soddisfazione di vedere la nostra rivista crescere, sia come contributi che come visibilità, mi ha ripagato delle difficoltà incontrate in questo periodo (poche a dire il vero).

Abbiamo cambiato due Direttori Onorari, prima Gaetano Guerra e poi Gianluca Farinola perché, in questi cinque anni, la Società Chimica Italiana (SCI) ha cambiato due volte il Presidente (che d'ufficio assume la carica di Direttore Onorario del CnS): non li ringrazierò mai abbastanza per l'aiuto che mi hanno dato.

Ma non è finita qui; quest'anno il nostro Direttore Onorario cambia ancora, dal momento che la SCI ha un nuovo Presidente, Luigi Mondello. Benvenuto Luigi a bordo del CnS! Sono sicura che la tua collaborazione sarà proficua, fondamentale e arricchente per tutti noi.



Gaetano Guerra



Gianluca Farinola



Luigi Mondello

E così siamo arrivati al sesto anno della mia direzione e, allora, per festeggiare, voglio che questo editoriale sia all'insegna di cose piacevoli, dimenticando le brutture del mondo che ci circonda e dedicandomi solo a quanto troverai in questo numero.

Mi piace cominciare con un percorso laboratoriale per la scuola secondaria di secondo grado, articolato e particolarmente ricco di spunti, che riguarda l'estrazione e lo studio della ficocianina dalla *Spirulina platensis*. Si tratta di un'esperienza di grande valore formativo, che permette di coniugare conoscenze teoriche, competenze sperimentali e capacità di analisi critica, riproducendo in piccolo le fasi di una vera ricerca scientifica.

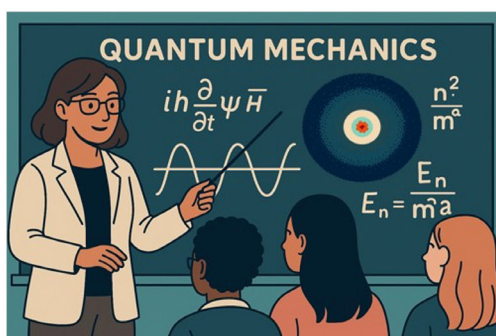
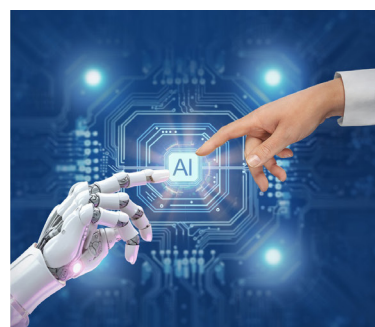
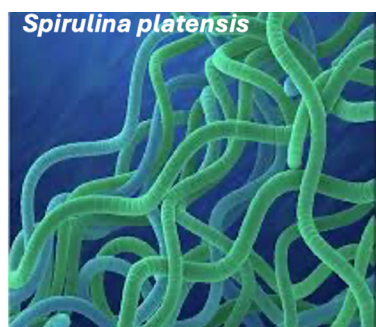
Non è da meno la rubrica sulla Transizione ecologica: dopo un veloce excursus sui materiali celluloseici, per capire cosa sono e che applicazioni hanno, si cerca di capire come mai, data la situazione ambientale sempre più drammatica, crescono le iniziative volte a rallentare le politiche green, per non parlare delle guerre che "fioriscono" ovunque e che ostacolano qualsiasi azione per salvaguardare il nostro pianeta.

Se le luci si stanno spegnendo sulla transizione ecologica che, purtroppo, sembra essere andata fuori

moda, i riflettori si sono accesi sull'intelligenza artificiale di cui oggi parlano tutti come la risoluzione di ogni problema. Su questo tema, nella nuovissima rubrica Sfide e problemi della nostra società, potrai leggere un interessante contributo che mette a confronto vantaggi, opportunità e rischi di questa emergente tecnologia.

E poi, ancora, in Dare voce agli studenti e ai giovani, c'è il lavoro di una ricercatrice su un argomento importante, anche se non piacevole; si parla del carcinoma mammario dal punto di vista della prevenzione, del rischio e delle prospettive future.

Un tema meno inquietante e, comunque, decisamente complesso, viene affrontato nella rubrica Keywords dove, per ricordare i cento anni della Meccanica Quantistica celebrati lo scorso anno, si analizzano i rapporti di questa "nuova" fisica con i concetti classici della chimica e il non facile problema di insegnarla a livello di scuola secondaria di secondo grado.



Infine, dopo uno sguardo alla ricerca internazionale in ambito didattico, si ricorda, nelle News, un Convegno il cui tema, Chemistry Education in the Age of Artificial Intelligence, è a cavallo fra la didattica, il punto focale della nostra rivista, e la tecnologia emergente citata prima e, così, il cerchio si chiude!

Concludo, come sempre, augurandoti buona lettura

Margherita

# Estrazione e studio della ficocianina da *Spirulina platensis*: un'esperienza di didattica laboratoriale

Anna Maria Madaio

IIS "B. Focaccia" Salerno

e-mail: annamariamadaio@libero.it

---

**Abstract.** Phycocyanin, extracted from the cyanobacterium *Spirulina platensis*, is a phycobiliprotein pigment known for its antioxidant properties and for its use as a natural colorant in the nutraceutical and cosmetic fields. This work describes an experimental pathway carried out by students of a technical institute with a specialization in "Chemistry and Materials," aimed at studying the characteristics of cyanobacteria and the stages of extraction, purification, and characterization of phycocyanin, as well as the investigation of its denaturation induced by chemical agents. The experience provided students with a comprehensive educational pathway, promoting active learning and problem-solving skills, and promoting the development of competencies in autonomous management of experimental work, critical interpretation of data, and understanding of the relationship between protein structure, stability, and function.

**Keywords:** Spirulina; ficocianina; denaturazione; spettroscopia UV-Vis; tetrapirrolo, ficobiliproteine

---

## 1. Introduzione

I cianobatteri sono organismi fotoautotrofi che sfruttano la fotosintesi per produrre sostanze organiche grazie a un complesso multiproteico di captazione della luce, il ficobilisoma, localizzato sulle membrane tilacoidali e costituito da pile ordinate di ficobiliproteine, una famiglia di proteine pigmentate in grado di catturare l'energia luminosa e trasferirla alla clorofilla a del fotosistema II.

Le ficobiliproteine sono proteine coniugate legate covalentemente a cromofori tetrapirrolici, detti ficobiline, responsabili della loro fluorescenza e della capacità di assorbimento nella regione del visibile compresa tra 450 e 655 nm, intervallo in cui le clorofille mostrano un assorbimento limitato.

Queste proteine, idrosolubili e dai colori intensi e brillanti, sono costituite da più catene polipeptidiche associate in complessi multimerici. In base alle loro caratteristiche strutturali e spettrali, si distinguono le tre principali classi di ficobiliproteine sotto riportate [1-2].

- Ficoeritrina – esamerica: assorbanza con  $\lambda_{\max} = 540-570$  nm; fluorescenza con  $\lambda_{\max} = 575-590$  nm, colore rosso
- Ficocianina – esamerica: assorbanza con  $\lambda_{\max} = 610-620$  nm; fluorescenza con  $\lambda_{\max} = 645-653$  nm, colore blu
- Alloficocianina – trimerica: assorbanza con  $\lambda_{\max} = 650-655$  nm; fluorescenza con  $\lambda_{\max} = 657-660$  nm, colore azzurro-blu

In questa attività gli studenti hanno sperimentato le tecniche di estrazione e purificazione della ficocianina dal cianobatterio *Spirulina platensis* e hanno osservato direttamente la relazione tra struttura e funzione della proteina, verificando come l'azione di agenti chimici che interferiscono con i legami intermolecolari, ne provochi la denaturazione e la variazione di alcune proprietà, quali colore e fluorescenza. Contemporaneamente gli studenti hanno approfondito la storia e le caratteristiche

biologiche della *Spirulina*, utilizzata fin dall'antichità come fonte alimentare dagli Aztechi e da popolazioni africane, e oggi coltivata in modo controllato per scopi nutraceutici, cosmetici e, in parte, farmaceutici, grazie al suo elevato contenuto proteico e alla presenza di pigmenti antiossidanti come la ficocianina.

L'attività è stata realizzata in una classe quinta di un istituto tecnico, indirizzo Chimica, Materiali e Biotecnologie, con articolazione Chimica e Materiali, ma può essere facilmente adattata anche ad altri contesti scolastici di tipo tecnico-scientifico. Per lo svolgimento delle attività sono stati necessari alcuni prerequisiti teorici, tra cui la conoscenza della struttura della cellula procariotica, dei processi e pigmenti fotosintetici, della struttura e delle proprietà delle proteine, nonché dei principi fondamentali della spettroscopia UV-Visibile. Le discipline coinvolte sono state Chimica Organica e Biochimica, Analisi Chimica Strumentale, Tecnologie Chimiche Industriali e Storia, allo scopo di favorire un approccio interdisciplinare allo studio della materia vivente e della sua composizione chimica.

Il percorso didattico è stato impostato come un progetto di ricerca sperimentale basato sulla metodologia del *problem solving*. Gli studenti, anziché seguire una procedura predefinita, hanno costruito progressivamente la metodica sperimentale attraverso una serie di prove pianificate, eseguite e verificate, confrontandosi con il docente, che ha avuto il ruolo di facilitatore del loro processo di apprendimento.

Questo approccio li ha resi protagonisti attivi dell'esperienza, stimolando autonomia, spirito critico e capacità di analisi dei risultati, nonché la ricerca di soluzioni ai problemi emersi durante le fasi sperimentali.

## 2. Organizzazione dell'attività

L'attività è stata articolata in fasi successive, con un percorso che ha combinato momenti di ricerca, sperimentazione e riflessione critica.

La fase introduttiva, concepita come stimolo per gli studenti e per inquadrare il contesto, ha previsto lo studio autonomo dell'articolo "A Simple Protein Purification and Folding Experiment for General Chemistry Laboratory" pubblicato sul *Journal of Chemical Education* [3], accompagnato dalla ricerca sul web di ulteriori informazioni sulle proprietà chimico-fisiche della ficocianina [4] e sulla storia, proprietà e modalità di coltivazione della *Spirulina platensis* [5-10].

A questa fase è seguito un *brainstorming* in classe, finalizzato all'approfondimento teorico, alla condisione delle informazioni raccolte, alla ricerca di ulteriore materiale scientifico e alla pianificazione dell'attività sperimentale, successivamente ripartita tra diversi gruppi di studenti.

L'attività didattica si è sviluppata in due fasi principali, strettamente interconnesse l'una all'altra:

- Ricerca e pianificazione - Gli studenti, organizzati in gruppi, hanno ricercato e studiato la letteratura scientifica su *Spirulina platensis* e ficocianina, elaborando protocolli sperimentali basati su tecniche di estrazione, purificazione e analisi della denaturazione proteica.
- Sperimentazione in laboratorio - In tre lezioni di laboratorio di due ore ciascuna, i gruppi hanno condotto gli esperimenti applicando i protocolli progettati, osservando le variazioni cromatiche e di fluorescenza della ficocianina in diverse condizioni di denaturazione e registrando i dati. Successivamente, durante tre lezioni teoriche di un'ora ciascuna, i dati raccolti sono stati analizzati, confrontati e interpretati, anche in relazione ai risultati riportati in letteratura.

Dopo ogni prova di laboratorio, gli studenti hanno redatto un report giornaliero dei dati acquisiti, seguito da momenti di confronto e analisi critica, per valutare l'efficacia delle procedure e individuare possibili miglioramenti metodologici.

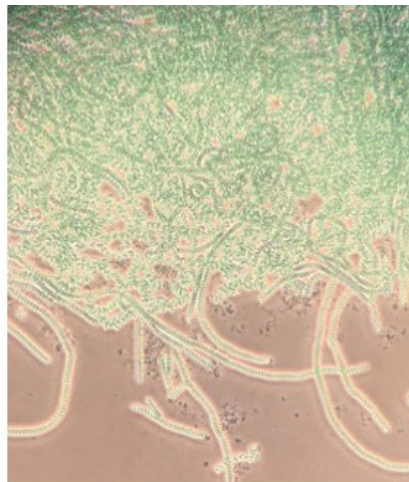
Di seguito sono presentati i risultati finali delle varie fasi, al fine di descrivere in modo completo l'attività svolta e le evidenze emerse.

### 3. Ricerca e pianificazione

#### 3.1 *Spirulina platensis*: storia, proprietà e coltivazione

La *Spirulina platensis* è un cianobatterio presente sulla Terra da oltre 3,5 miliardi di anni, composto da singole cellule di forma cilindrica (3-12 µm di diametro), impilate l'una sull'altra a formare lunghi filamenti (detti tricomi), come riportato in figura 1.

È un microrganismo alcalofilo che cresce in ambienti con pH tra 9 e 11, in acque calde, con temperature ottimali di circa 30-35 °C, e in presenza di elevata salinità, tipicamente superiore a 10 g/L di sali totali, condizioni che riducono la competizione microbica e favoriscono la sua dominanza negli habitat naturali.



**Figura 1.** *Spirulina Platensis*, osservazione al microscopio ottico

I pigmenti fotosintetici di *Spirulina platensis* sono ficobiliproteine (ficocianina e alloficocianina) e carotenoidi ( $\beta$ -carotene, criptoxantina, clorofilla a). Tra questi, la ficocianina è la più abbondante ed è caratterizzata da un colore blu brillante e da una fluorescenza rossa. Grazie alla sua straordinaria capacità fotosintetica e alla resistenza a condizioni ambientali estreme, la *Spirulina* ha svolto un ruolo cruciale nell'evoluzione della Terra, contribuendo alla colonizzazione del pianeta da parte di nuove forme di vita. A seconda della specie, cresce spontaneamente in laghi alcalini e salmastri delle regioni tropicali e subtropicali dell'Africa, del Messico e dell'India, e viene utilizzata fin dai tempi preistorici come fonte di nutrimento dalle popolazioni locali. Gli Aztechi raccoglievano la biomassa dalle lagune, la essiccavano al Sole e la consumavano da sola o in combinazione con altri alimenti come fonte energetica, tanto da essere soprannominata "oro verde degli Aztechi" o "cibo degli dei". Bernal Díaz del Castillo, esploratore spagnolo e principale cronista della Conquista del Messico, la descrive così nel suo libro intitolato "The Discovery and Conquest of Mexico":

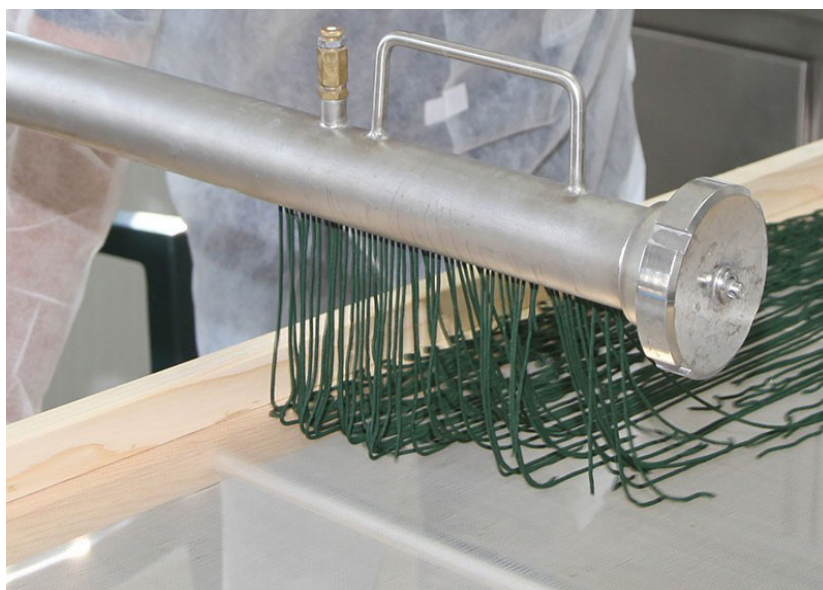
I pescatori e altri vendevano dolcetti fatti di qualcosa di simile alla melma, che raccolgono da quella grande laguna. Questi si addensano e si trasformano in torte che hanno un sapore un po' come il formaggio.

Fin dal IX secolo, la *Spirulina platensis* viene raccolta lungo le sponde del lago Ciad. Le donne dell'etnia Kanembu prelevano la biomassa dalla superficie dell'acqua, la collocano in grandi cesti e la lasciano essiccare al Sole in buche scavate nella sabbia. Il prodotto essiccato viene poi venduto nei mercati locali, rappresentando una fondamentale fonte di reddito per queste comunità.

La *Spirulina* è oggi uno degli integratori alimentari più diffusi, molto apprezzata per le sue proprietà

nutraceutiche e la potente attività antiossidante. Viene anche utilizzata come alimento iperproteico in contesti estremi, tipo il sostentamento degli astronauti nelle missioni spaziali. La sua composizione chimica è particolarmente ricca: contiene dal 55-70% di proteine, 6-10% di lipidi, circa 20% di carboidrati, minerali (K, Ca, Fe, Mg, Zn, ...), vitamine (B1, B12, E, ...), fibre, acidi grassi polinsaturi (come l'acido  $\gamma$ -linolenico, omega-6) e pigmenti fotosintetici, quali ficobiline, betacarotene e xantofille. Rispetto ad altri alimenti, la *Spirulina* rappresenta una fonte proteica eccezionalmente preziosa: 100 g contengono una quantità di proteine superiore a quella presente in alimenti comuni come carne bovina (21%), soia secca (35%), prosciutto crudo (28%) o formaggio Grana Padano (34%) [6-8]. Attualmente, *Spirulina platensis* viene coltivata in stagni poco profondi, vasche aperte o fotobioreattori tubolari chiusi. Il terreno di coltura è ricco di sali inorganici, con elevata concentrazione di bicarbonato, pH compreso tra 9 e 11 e temperature ottimali tra 30 e 35 °C. La composizione del terreno di coltura varia a seconda del protocollo utilizzato e può includere bicarbonato di sodio, solfato di magnesio, nitrato di potassio, cloruro di calcio, solfato di ferro, urea e altri nutrienti.

Raggiunti i livelli di crescita ottimali, la biomassa di *Spirulina* viene raccolta e filtrata attraverso filtri da 0,5 micron, al fine di rimuovere la maggior parte dell'acqua, ottenendo una pasta liquida che viene poi pressata meccanicamente per eliminare l'acqua residua. La pasta d'alga viene successivamente estrusa, attraverso macchine trafilatrici, in piccoli filamenti di diametro di circa 1,5 mm, come riportato in figura 2, ed essiccata a basse temperature. Il prodotto finale può essere confezionato come spaghetti, sminuzzato o trasformato in polvere [9-10].



**Figura 2.** Trafilatura della biomassa di *Spirulina platensis*

La produzione annua globale di biomassa raggiunge circa 4.500 tonnellate, di cui circa il 50% viene prodotta in Cina.

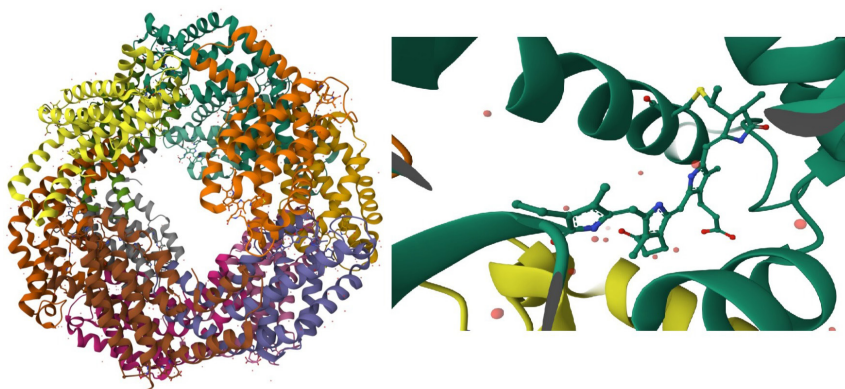
### 3.2 Ficocianina: struttura e proprietà chimico-fisiche

La ficocianina (Figura 3) è il principale pigmento ficobiliproteico della *Spirulina*, rappresenta più del 20% del suo peso secco ed è usata come colorante naturale blu in alternativa ai coloranti artificiali Blu brillante FCF (E133) e Patent Blue V (E131), vietati in alcuni paesi. Ha spiccate proprietà antiossidanti e antinfiammatorie, essendo 40 volte più potente delle vitamine C ed E contro i radicali perossidi e ossigeno-reattivi [8].



**Figura 3.** Ficocianina, pigmento blu

Il cromoforo tetrapirrolico, legato alla proteina tramite un legame tioetereo, grazie all'estesa coniugazione del suo sistema elettronico è responsabile della caratteristica colorazione azzurra della ficocianina. Per comprendere meglio la struttura della ficocianina, gli studenti hanno consultato il sito di Protein Data Bank, dove è disponibile il modello tridimensionale della proteina [11]. Attraverso questa osservazione, hanno potuto analizzare la struttura secondaria e terziaria della ficocianina, individuare la posizione del cromoforo all'interno della molecola e apprezzare la complessità della sua architettura proteica (Figura 4).



**Figura 4.** Struttura tridimensionale della ficocianina e cromoforo tetrapirrolico

La ficocianina è altamente sensibile a cambiamenti chimico-fisici e qualsiasi alterazione che agisca sui legami secondari può provocare la perdita della struttura tridimensionale e, di conseguenza, della sua funzione biologica. Lo spettro di assorbimento del cromoforo tetrapirrolico dipende strettamente dalla conformazione della proteina; nella forma nativa, con il cromoforo lineare, la ficocianina assorbe nel visibile a circa 625 nm, conferendo alla proteina il caratteristico colore blu, e mostra una fluorescenza rossa a circa 650 nm. Quando la proteina viene denaturata, il cromoforo assume una conformazione ciclica, assorbe a circa 370 nm, diventando incolore, e perde completamente la fluorescenza [3-4].

#### **4. Sperimentazione in laboratorio**

Partendo dalle conoscenze teoriche acquisite sulla struttura e le proprietà della ficocianina, gli studenti hanno potuto comprendere e pianificare i passaggi successivi della sperimentazione. Suddivisi

in gruppi, hanno organizzato le attività, implementandole e, quando necessario, perfezionandole in base ai risultati ottenuti. Ad eccezione della prima fase dell'attività sperimentale, relativa all'estrazione della ficocianina e svolta da tutti i gruppi, le altre sono state effettuate da gruppi differenti, mantenendo però un costante confronto e una continua condivisione dei dati tra i partecipanti.

È importante sottolineare che gli studenti non hanno seguito una procedura predefinita, ma hanno ipotizzato, e successivamente perfezionato, la metodica sperimentale seguendo un approccio di tipo *problem solving*, diventando protagonisti attivi del processo.

Le attività sperimentali inizialmente previste dagli studenti includevano:

- Estrazione della ficocianina da biomassa secca di *Spirulina platensis*, articolata in varie fasi e svolta da tutti i gruppi
- Saggi di denaturazione dell'estratto acquoso di ficocianina con etanolo e controllo spettrofotometrico
- Saggi di denaturazione dell'estratto acquoso di ficocianina con urea e controllo spettrofotometrico

Sulla base dei risultati ottenuti dalle prime attività sperimentali, gli studenti hanno successivamente elaborato protocolli alternativi utilizzando ficocianina commerciale, con l'obiettivo di sviluppare una metodica di estrazione e analisi della denaturazione facilmente riproducibile.

#### 4.1 Estrazione della ficocianina

Gli studenti hanno sperimentato tre differenti metodologie di estrazione, che hanno portato a estratti acquosi aventi una differente concentrazione di ficocianina.

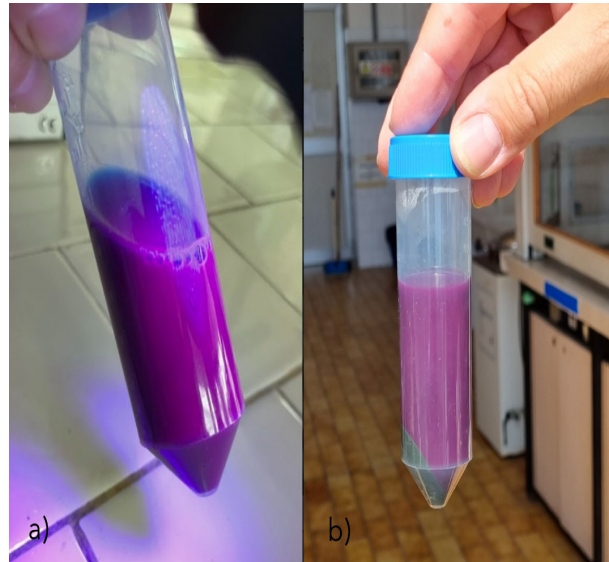
- Estrazione mediante congelamento-scongelamento: questa tecnica sfrutta la formazione e la rottura dei cristalli di ghiaccio per distruggere le membrane cellulari. Procedimento: 2,5 g di biomassa secca di *Spirulina platensis* sono stati sospesi in 30,0 mL di acqua distillata, effettuando cicli di congelamento (a  $-18^{\circ}\text{C}$ ) e scongelamento per 24-48 ore.
- Estrazione mediante lisi meccanica: questa tecnica consiste nel rompere le cellule attraverso l'azione fisica della frantumazione con silice. Procedimento: 2,5 g di biomassa secca di *Spirulina platensis* e 2,5 g di silice sono stati pestati in un mortaio; la miscela è stata dispersa in 100,0 mL di acqua distillata e conservata a  $4^{\circ}\text{C}$  per una settimana.
- Estrazione mediante ultrasuoni: questa tecnica genera fenomeni di cavitazione che rompono meccanicamente le membrane cellulari. Procedimento: 2,5 g di biomassa secca di *Spirulina platensis* e 2,5 g di silice sono stati sospesi in 100,0 mL di acqua distillata; la miscela è stata trattata con ultrasuoni per 40 minuti e conservata in frigorifero per una settimana.

Gli estratti acquosi grezzi di colore verde-azzurro scuro sono stati centrifugati a 4000 rpm per 20 min in modo da separare il surnatante blu brillante, contenente la ficocianina, dalla clorofilla e dai residui cellulari (Figura 5).



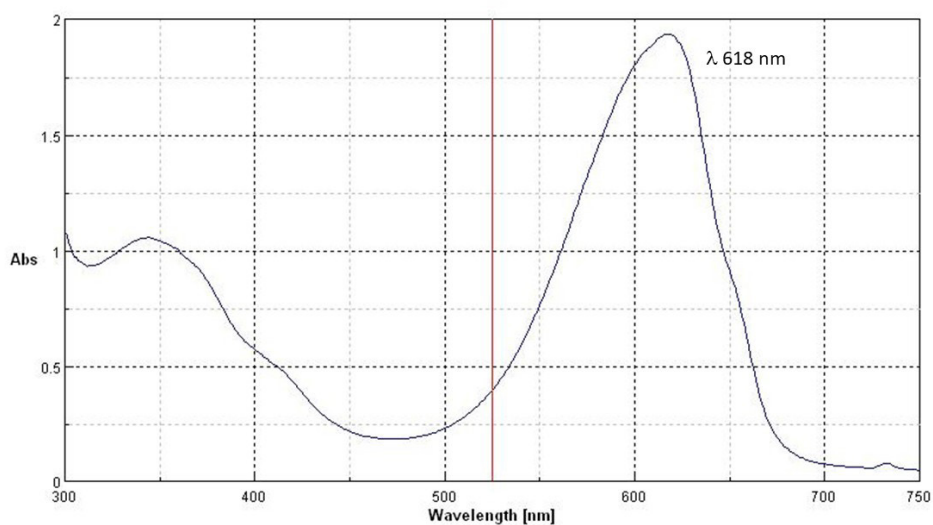
**Figura 5.** Separazione del surnatante blu brillante contenente la ficocianina

L'osservazione alla lampada di Wood del surnatante di colore blu ha mostrato la presenza di una fluorescenza viola, e non rossa come descritto in letteratura, visibile anche alla luce solare nelle soluzioni più concentrate (Figura 6) e una fluorescenza azzurra in quelle più diluite.



**Figura 6.** Surnatante contenente la ficocianina: a) fluorescenza viola alla lampada di Wood; b) fluorescenza viola alla luce solare

Lo spettro visibile dell'estratto acquoso presentava un massimo di assorbimento alla lunghezza d'onda di 618 nm attribuibile alla ficocianina (Figura 7).



**Figura 7.** Spettro UV-Vis dell'estratto acquoso di *Spirulina platensis*

#### 4.2 Saggi di denaturazione dell'estratto acquoso di ficocianina

Sugli estratti acquosi di ficocianina gli studenti, suddivisi in piccoli gruppi, hanno eseguito i saggi di denaturazione per valutare la sensibilità della proteina a vari agenti denaturanti, come etanolo e urea. I saggi sono stati eseguiti su campioni di ficocianina estratta con il metodo di congelamento-scongela-mento. I vari risultati sono stati confrontati e razionalizzati, fino ad arrivare a conclusioni condivise.

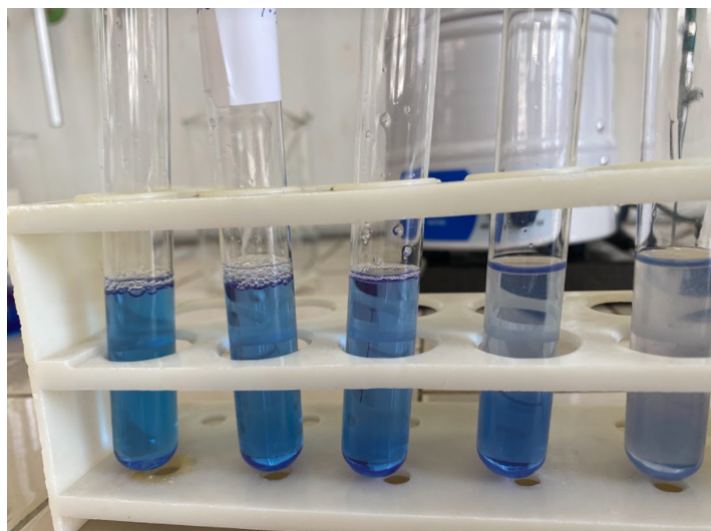
##### 4.2.1 Denaturazione dell'estratto acquoso di ficocianina con etanolo

L'etanolo è un agente denaturante che agisce riducendo la polarità dell'ambiente e alterando le interazioni idrofile della proteina con l'acqua modificandone la conformazione.

Procedimento: gli studenti, suddivisi in gruppi, hanno preparato diverse diluizioni degli estratti acquosi di ficocianina (1:5, 1:10, 1:25, 1:50) su cui hanno effettuato i vari saggi. Per ogni diluizione sono stati preparati quattro campioni da 2,5 mL, a ciascuno dei quali sono stati aggiunti 2,5 mL di soluzioni di etanolo a concentrazioni crescenti (15%, 30%, 50%, 96%), oltre a un campione di controllo a cui sono stati aggiunti solo 2,5 mL di acqua distillata.

##### Risultati e Osservazioni

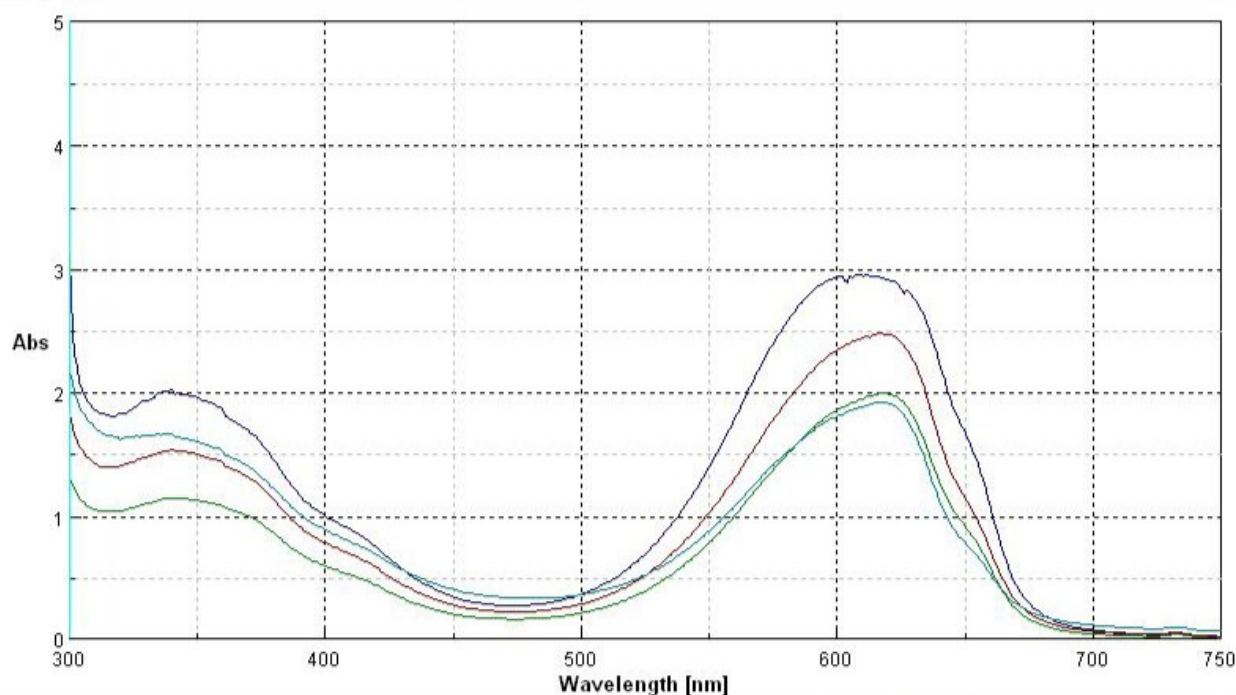
- Per confronto con il controllo, in tutti i campioni con diluizione 1:10 si osservava un evidente cambiamento visivo di colore; in particolare, nel campione con aggiunta di etanolo al 96% si osservava la completa perdita del colore blu, indice dell'avvenuta denaturazione della proteina (Figura 8).
- L'osservazione alla lampada di Wood di tutti i campioni con diluizione 1:10 mostrava la presenza di una persistente fluorescenza azzurra, che nascondeva la graduale scomparsa della fluorescenza viola (Figura 9).
- Per confronto con il controllo, i campioni con diluizione 1:5, denaturati con concentrazioni crescenti di etanolo (15%, 30%, 50%) sono stati analizzati con uno spettrofotometro UV-Vis a doppio raggio per misurare l'andamento dell'assorbanza a 618 nm (tipica della proteina nativa) e a 370 nm (tipica della proteina denaturata). L'aumento della concentrazione di etanolo ha causato, come atteso, una progressiva diminuzione dell'assorbanza a 618 nm, con conseguente diminuzione del colore blu della soluzione, ma anche una diminuzione, e non un aumento, dell'assorbanza a 370 nm (Figura 10).



**Figura 8.** Campioni di estratto acquoso di ficocianina diluito 1:10 denaturati con etanolo a differente concentrazione; da sinistra verso destra, si nota la progressiva decolorazione all'aumentare della concentrazione di etanolo aggiunto (0%, 15%, 30%, 50%, 96%)



**Figura 9.** Campioni di estratto acquoso di ficocianina con diluizione 1:10 denaturati con etanolo a differente concentrazione; da destra verso sinistra, si nota la persistente fluorescenza azzurra all'aumentare della concentrazione di etanolo aggiunto (0%, 15%, 30%, 50%, 96%)



**Figura 10.** Confronto degli spettri UV-Vis dei campioni di estratto acquoso di ficocianina diluiti 1:5 e denaturati con concentrazioni crescenti di etanolo (0%, 15%, 30%, 50%)

Dall'analisi degli spettri UV-Vis, gli studenti hanno dedotto che il campione utilizzato era molto concentrato e che, per avere risultati attendibili, bisognava diluire ulteriormente le soluzioni. Inoltre, la persistente fluorescenza azzurra nei campioni denaturati faceva pensare alla presenza di impurità nella soluzione.

- Ripetendo la stessa procedura con l'estratto acquoso diluito 1:20 e registrando l'assorbimento con uno spettrofotometro a singolo raggio, gli studenti hanno osservato che, sebbene la denaturazione fosse visibile a occhio nudo come cambiamento di colore, i valori delle assorbanze alla lunghezza d'onda di 618 e di 370 nm erano coerenti con i risultati attesi,

ma presentavano variazioni molto piccole e quindi poco attendibili, come mostrato in Tabella 1. Anche in questo caso, si osservava in tutti i campioni una inspiegabile fluorescenza azzurra.

**Tabella 1.** Valori di assorbanza degli spettri UV-Vis dei campioni di estratto acquoso di ficocianina con diluizione 1:20, denaturati con concentrazioni crescenti di etanolo

Campione	% di etanolo	Assorbanza (618 nm)	Assorbanza (370 nm)
1	0%	0,259	0,200
2	15%	0,231	0,196
3	30%	0,219	0,206
4	50%	0,210	0,321

#### 4.2.2 Denaturazione dell'estratto acquoso di ficocianina con urea

L'urea è un agente denaturante capace di rompere i legami a idrogeno e destabilizzare le strutture secondarie e terziarie delle proteine.

Procedimento: gli studenti hanno preparato quattro campioni contenenti 2,5 mL dell'estratto acquoso di ficocianina senza diluizione, aggiungendo a uno di essi 2,5 mL di acqua (per usarlo come controllo) e agli altri tre, rispettivamente 2,5 mL di soluzioni di urea a concentrazioni differenti (3M, 6M, 8M).

#### Risultati e osservazioni

- Per confronto con il controllo, solo il campione con aggiunta di urea 8M, pur mantenendo una debole fluorescenza azzurrognola, mostrava segni di denaturazione, con cambiamento di colore da blu a verde-azzurro, ma senza decolorarsi completamente. Gli altri campioni, mantenendo pressoché invariato il colore iniziale, presentavano sempre una fluorescenza viola, visibile anche alla luce solare (Figura 11).



**Figura 11.** Campioni di estratto acquoso di ficocianina denaturati con soluzioni di urea a concentrazioni crescenti (0M, 3M, 6M, 8M); da destra verso sinistra, all'aumentare della concentrazione di urea, si nota il cambiamento di colore solo nel campione con aggiunta di urea 8M

- Ripetendo le stesse operazioni su campioni di partenza più diluiti, ottenuti aggiungendo 5,0 mL di acqua distillata a tutti i campioni precedentemente preparati, in modo da raggiungere una diluizione 1:2 dell'estratto acquoso, i risultati confermavano la mancata decolorazione delle soluzioni e la persistente fluorescenza viola, visibile anche alla luce del sole (Figura 12).



**Figura 12.** Campioni di estratto acquoso di ficocianina con diluizione 1:2, denaturati con soluzioni di urea a concentrazioni crescenti (0M, 3M, 6M, 8M), andando da sinistra verso destra

Analizzando i risultati, gli studenti hanno focalizzato la loro attenzione sui due campioni contenenti urea 8M. Nel campione più concentrato, 2,5 mL di estratto acquoso di ficocianina + 2,5 mL di urea 8 M, il colore della soluzione mostrava un cambiamento; in quello più diluito, 2,5 mL di estratto acquoso di ficocianina + 5,0 mL di acqua + 2,5 mL di urea 8 M, il colore della soluzione non cambiava.

Gli studenti hanno, quindi, dedotto l'esistenza di un evidente problema nel rapporto tra la concentrazione dell'agente denaturante e quella della ficocianina nei campioni preparati. In particolare, nel primo caso la concentrazione di ficocianina risultava troppo elevata per la concentrazione di urea utilizzata, con la conseguenza che non tutta la ficocianina veniva denaturata; nel secondo caso la concentrazione di urea presente nel campione non era sufficiente a indurre la denaturazione della ficocianina.

Da un'analisi più attenta dell'articolo scientifico di partenza [3] gli studenti si sono accorti che commettevano un errore nelle aggiunte di urea all'estratto acquoso, perché diluendo un certo volume di urea 8M (2,5 mL) nello stesso volume di soluzione (2,5 mL nel primo caso), o un volume triplo (7,5 mL nel secondo caso), di fatto la concentrazione di urea nel campione diventava rispettivamente la metà (4 M) o un quarto (2 M) di quella iniziale, contrariamente a quanto indicato nell'articolo, che suggeriva una concentrazione di urea 8M nel campione da denaturare.

Questa osservazione ha permesso agli studenti di dare una spiegazione ai risultati ottenuti e di dedurre che, per poter proseguire efficacemente l'attività sperimentale, era necessario focalizzarsi su due fattori critici fondamentali:

- le concentrazioni ottimali dell'estratto acquoso e degli agenti denaturanti necessarie per ottenere risultati coerenti e saggi riproducibili;
- la persistente fluorescenza della ficocianina nonostante la denaturazione della proteina.

Per affrontare questi problemi, si sono resi conto che era fondamentale avere un campione di ficocianina commerciale come riferimento, sia per verificare le caratteristiche di fluorescenza della proteina nativa, sia per la messa a punto dei protocolli di denaturazione e delle successive analisi spettroscopiche.

## 5. Saggi sulla ficocianina commerciale

Come primo test sulla ficocianina commerciale, gli studenti hanno preparato una sua soluzione a concentrazione non nota e l'hanno osservata alla lampada di Wood. Con grande stupore, hanno verificato che la fluorescenza non era di colore viola, come quella del loro estratto acquoso, ma rossa, in accordo con quanto riportato in letteratura (Figura 13).



**Figura 13.** Fluorescenza rossa della ficocianina commerciale

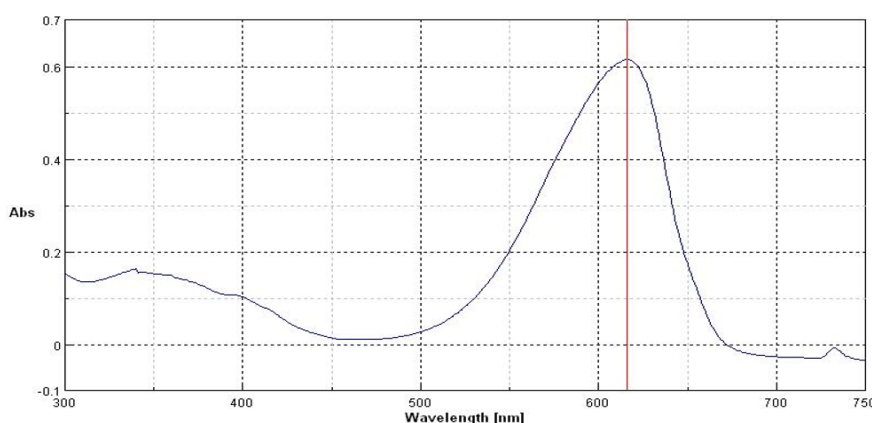
Questo risultato suggeriva che la ficocianina estratta in laboratorio non fosse pura e che la fluorescenza viola osservata nell'estratto acquoso fosse probabilmente dovuta alla sovrapposizione della fluorescenza rossa della ficocianina con quella azzurra di altre sostanze presenti nell'estratto acquoso, che rimanevano stabili anche dopo la denaturazione della proteina.

A partire da queste osservazioni, gli studenti, dopo ulteriori attività di *brainstorming* su dati riportati in letteratura [12-13], hanno elaborato una nuova strategia sperimentale articolata come segue:

- testare i saggi di denaturazione sulla ficocianina commerciale, per individuare le concentrazioni ottimali di proteina e di agenti denaturanti necessarie per ottenere risultati coerenti e riproducibili;
- purificare la ficocianina contenuta nell'estratto acquoso mediante precipitazione con solfato di ammonio, al fine di rimuovere le probabili impurità interferenti;
- confrontare la fluorescenza della ficocianina commerciale con quella della proteina estratta dalla *Spirulina platensis* e purificata in laboratorio.

### 5.1 Saggi di denaturazione sulla ficocianina commerciale

Dall'analisi preliminare degli spettri UV-Vis di soluzioni a diversa concentrazione di ficocianina commerciale, gli studenti hanno determinato che la concentrazione ottimale per condurre le prove era pari a 1,0 g/L (Figura 14).



**Figura 14.** Spettro UV-Vis di una soluzione di ficocianina commerciale 1,0 g/L

Successivamente, hanno pianificato una serie di saggi di denaturazione in presenza di etanolo e urea, preparando campioni di soluzioni di ficocianina in etanolo al 25%, 30%, 35%, 40% e 48% e urea 2M, 4M, 6M e 8M. Per ottenere le concentrazioni desiderate, gli studenti hanno aggiunto nelle provette contenenti la soluzione di ficocianina 1,0 g/L:

- volumi di soluzioni di etanolo a concentrazione doppia rispetto a quella finale da raggiungere per i saggi;
- quantità pesate di urea e calcolate per raggiungere le concentrazioni molari previste per i saggi.

#### 5.1.1 Denaturazione della ficocianina commerciale 1,0 g/L con etanolo

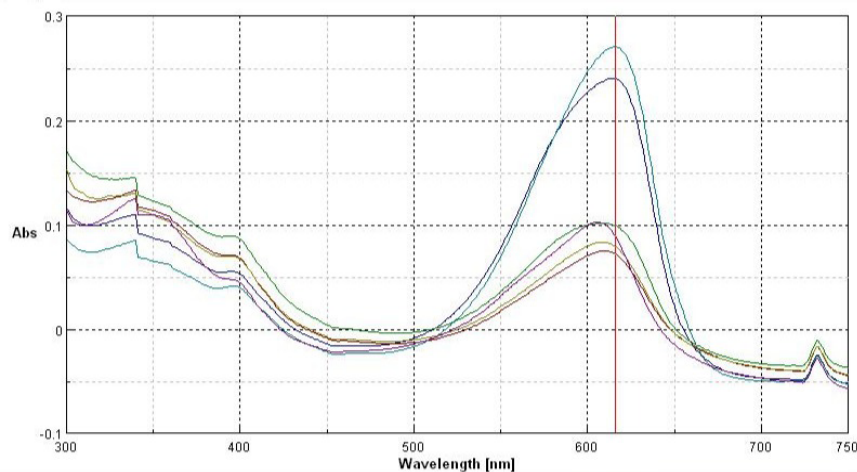
Per verificare l'effetto denaturante dell'etanolo, gli studenti hanno preparato quattro soluzioni di etanolo al 50%, 60%, 70% e 80% e successivamente sei campioni di cui quattro contenenti ciascuno 2,5 mL di soluzione di ficocianina 1,0 g/L e 2,5 mL delle soluzioni di etanolo a differente concentrazione, uno contenente 2,5 mL di ficocianina commerciale e 2,5 mL di etanolo 96% e un'altro contenente 2,5 mL ficocianina commerciale e 2,5 mL di H<sub>2</sub>O distillata, da usare come controllo (Tabella 2).

Come previsto, all'aumentare della concentrazione di etanolo le soluzioni hanno mostrato una evidente e progressiva decolorazione, visibile a occhio nudo, indice della perdita della struttura nativa della proteina. L'avvenuta denaturazione è stata inoltre confermata dalla progressiva diminuzione della fluorescenza osservata alla lampada di Wood.

**Tabella 2.** Campioni di ficocianina commerciale 1,0 g/L preparati per i test di denaturazione con etanolo a concentrazioni crescenti

Campione	Composizione del campione	Volume totale	% finale di etanolo
1	2,5 mL Ficocianina + 2,5 mL H <sub>2</sub> O distillata	5,0 mL	0 %
2	2,5 mL Ficocianina + 2,5 mL etanolo 50%	5,0 mL	25 %
3	2,5 mL Ficocianina + 2,5 mL etanolo 60%	5,0 mL	30 %
4	2,5 mL Ficocianina + 2,5 mL etanolo 70%	5,0 mL	35 %
5	2,5 mL Ficocianina + 2,5 mL etanolo 80%	5,0 mL	40 %
6	2,5 mL Ficocianina + 2,5 mL etanolo 96%	5,0 mL	48 %

Gli spettri UV-Vis registrati con uno spettrofotometro a doppio raggio hanno ulteriormente validato i risultati: si è osservata una riduzione dell'assorbanza a 618 nm (tipica della forma nativa) e un incremento del segnale a 370 nm, coerente con la formazione della specie denaturata (Figura 15), in perfetto accordo con quanto riportato in letteratura [4].



**Figura 15.** Confronto degli spettri UV-Vis dei campioni di ficocianina commerciale 1,0 g/L denaturati con concentrazioni crescenti di etanolo (0%, 25%, 30%, 48%)

### 5.1.2 Denaturazione della ficocianina commerciale 1,0 g/L in urea

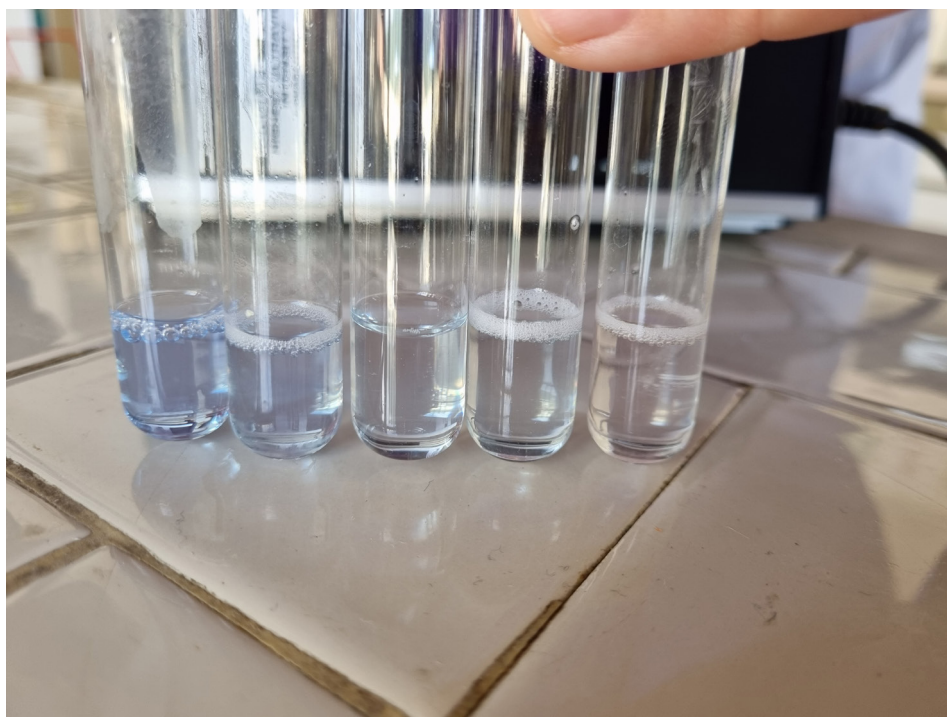
Analogamente a quanto realizzato nei saggi con etanolo, gli studenti hanno condotto una serie di prove di denaturazione della ficocianina utilizzando urea come agente chimico denaturante.

Sono stati preparati quattro campioni contenenti 5,0 mL di una soluzione di ficocianina commerciale 1,0 g/L, ai quali sono state aggiunte quantità pesate di urea solida, in modo da ottenere le concentrazioni molari finali riportate nella Tabella 3.

**Tabella 3.** Campioni di ficocianina commerciale 1,0 g/L preparati per i test di denaturazione con urea a concentrazioni crescenti

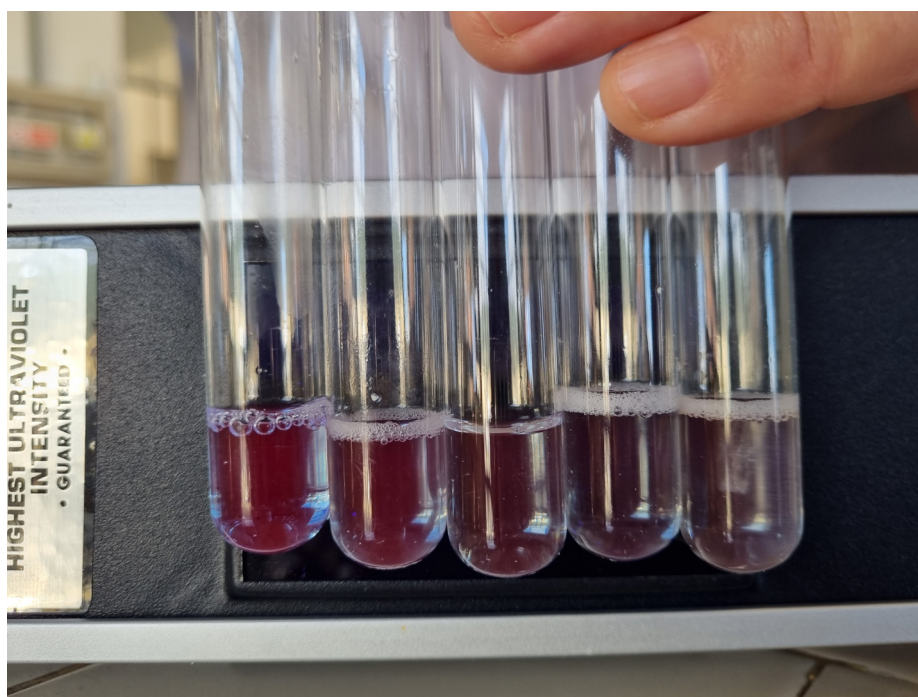
Campioni	Volume soluzione ficocianina	Massa di urea aggiunta	Concentrazione finale di urea
1	5,0 mL	0,00 g	0M
2	5,0 mL	0,60 g	2M
3	5,0 mL	1,20 g	4M
4	5,0 mL	1,80 g	6M
5	5,0 mL	2,40 g	8M

Per confronto con il campione di controllo, formato solo da 5,0 mL di ficocianina 1,0 g/L, le soluzioni hanno mostrato, come atteso, una progressiva decolorazione all'aumentare della concentrazione di urea, evidenziando la perdita della struttura tridimensionale nativa della proteina (Figura 16).



**Figura 16.** Campioni di ficocianina commerciale denaturati con urea a differente concentrazione; da sinistra verso destra, si nota la progressiva decolorazione all'aumentare della concentrazione di urea nella soluzione (0M, 2M, 4M, 6M, 8M)

L'osservazione alla lampada di Wood dei campioni ha mostrato la scomparsa graduale della fluorescenza rossa, tipica della ficocianina nativa, senza alcuna comparsa di fluorescenza azzurra, a conferma dell'assenza di altre sostanze fluorescenti interferenti (Figura 17).



**Figura 17.** Campioni di ficocianina commerciale denaturati con urea a differente concentrazione; da sinistra verso destra, si nota la progressiva scomparsa della fluorescenza rossa all'aumentare della concentrazione di urea nella soluzione (0M, 2M, 4M, 6M, 8M)

Le misure spettrofotometriche hanno confermato in modo evidente l'effetto denaturante dell'urea, mostrando un andamento analogo a quello osservato nei saggi condotti con etanolo e perfettamente coerente con i dati presenti in letteratura. Gli studenti hanno, quindi, ulteriormente verificato che l'aumento progressivo della concentrazione di urea ha determinato la disgregazione delle strutture secondarie della ficocianina, con conseguente perdita delle sue proprietà ottiche e fluorescenti, evidenziata da una diminuzione dell'assorbanza a 618 nm, tipica della proteina nativa, e da un incremento dell'assorbanza a 370 nm, caratteristica della forma denaturata, come riportato nella Tabella 4.

**Tabella 4.** Risultati della denaturazione di ficocianina commerciale 1,0 g/L con urea a differenti concentrazioni, confronto tra dati spettroscopici e osservazioni qualitative

Campioni	Molarità urea	Assorbanza (618 nm)	Assorbanza (370 nm)	Osservazioni qualitative (colore e fluorescenza)
1	0 (controllo)	0,820	0,110	Blu intenso, fluorescenza elevata
2	2M	0,640	0,210	Blu meno intenso, riduzione fluorescenza
3	4M	0,420	0,360	Blu pallido, fluorescenza molto ridotta
4	6M	0,250	0,520	Blu molto pallido, fluorescenza quasi assente
5	8M	0,120	0,710	Incolore, completa perdita di fluorescenza

Come risultato dei saggi effettuati sulla ficocianina commerciale, gli studenti hanno individuato le concentrazioni ottimali di proteina da utilizzare nei saggi di denaturazione e hanno definito le condizioni sperimentali più adatte per ottenere risultati coerenti e riproducibili. Inoltre, hanno riconosciuto la necessità di purificare l'estratto acquoso di ficocianina ottenuto da *Spirulina platensis*, di ripetere su questo campione i saggi di denaturazione già condotti sulla proteina commerciale e di verificare se la fluorescenza azzurra persistente, osservata dopo la denaturazione, fosse causata dalla presenza di impurezze.

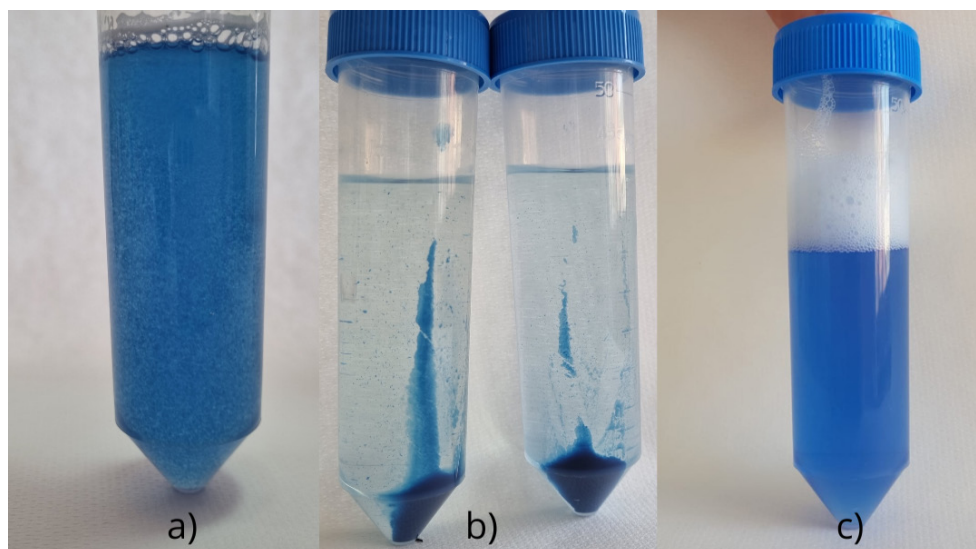
## 6. Purificazione della ficocianina nell'estratto acquoso

Durante la fase di studio e analisi della letteratura scientifica, gli studenti hanno appreso che la solubilità delle proteine varia in funzione della forza ionica della soluzione. A basse concentrazioni saline, la solubilità tende ad aumentare perché gli ioni del sale interagiscono con le regioni polari delle proteine, favorendone la solvatazione (*salting in*). Tuttavia, quando la concentrazione salina aumenta in modo significativo (fino a 10-100 volte), le molecole di sale competono con le proteine per le molecole d'acqua, riducendo la loro solvatazione. Di conseguenza, le proteine tendono ad aggregarsi e a precipitare sotto forma di complessi colloidali insolubili (*salting out*).

Questa tecnica è comunemente utilizzata per la purificazione selettiva delle proteine senza comprometterne la struttura tridimensionale o la funzionalità biologica.

Per la purificazione della ficocianina contenuta nell'estratto acquoso grezzo, gli studenti hanno utilizzato il solfato di ammonio [12-13], un sale altamente solubile in acqua, capace di generare elevate forze ioniche. Dopo vari tentativi, anche con l'aggiunta diretta di sale solido al campione, sono state individuate le condizioni ottimali per ottenere la precipitazione selettiva della ficocianina.

Procedimento: 20,0 mL di soluzione satura di solfato di ammonio, ottenuta disciogliendo 75,0 g di  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  in 100,0 mL di acqua distillata, sono stati miscelati con 20,0 mL di estratto acquoso di ficocianina. La miscela è stata lasciata riposare per una notte a 4°C, durante la quale si è avuta la flocculazione del pigmento proteico. Successivamente, il campione è stato centrifugato a 5000 rpm per 20 minuti, ottenendo un precipitato proteico azzurro. Il precipitato è stato risospeso in una soluzione di tampone fosfato a pH 6,8 e il surnatante è stato recuperato (Figura 18).



**Figura 18.** Fasi della purificazione della ficocianina nell'estratto acquoso: a) flocculazione, b) prodotto della centrifugazione, c) risospensione in tampone fosfato

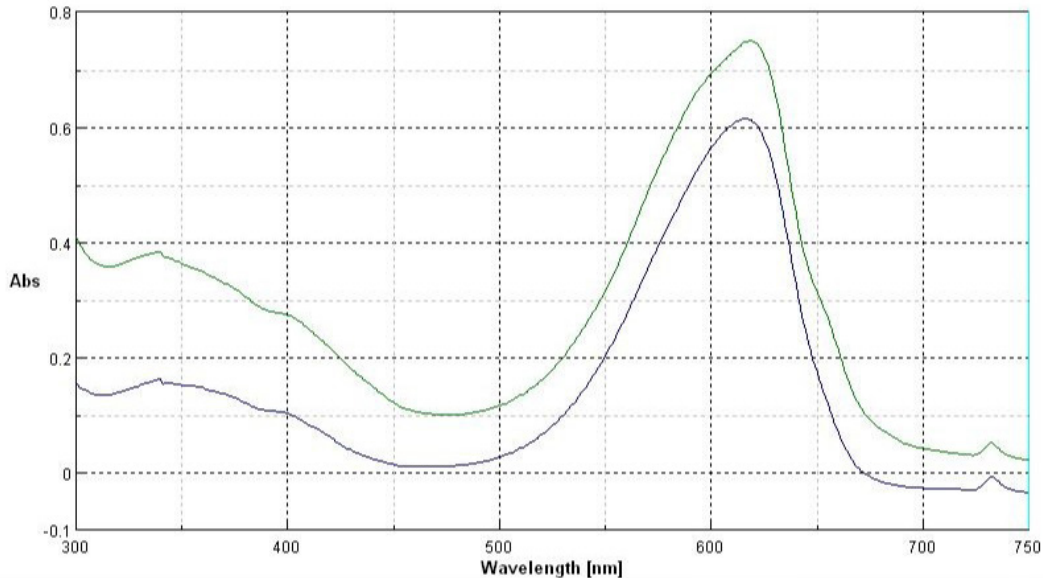
#### Risultati e osservazioni

- L'osservazione alla lampada di Wood ha dimostrato che il campione purificato e risospeso in tampone fosfato emetteva fluorescenza rossa, tipica della ficocianina nativa, analogamente al campione di ficocianina commerciale. A dimostrazione della presenza di impurezze fluorescenti, il surnatante recuperato dalla purificazione della ficocianina presentava fluorescenza azzurra (Figura 19).



**Figura 19.** Confronto, andando da sinistra a destra, tra la fluorescenza viola dell'estratto acquoso di ficocianina, la fluorescenza azzurra del surnatante, la fluorescenza rossa di ficocianina purificata e risospesa nel tampone fosfato e la fluorescenza rossa di ficocianina commerciale

- La misura dello spettro UV-Vis del campione purificato ha evidenziato un picco massimo di assorbanza a circa 618 nm, confermando la presenza della forma nativa della ficocianina (Figura 20).



**Figura 20.** Spettri UV-Vis di ficocianina commerciale (nero) e ficocianina purificata e risospesa in tampone fosfato (verde)

### 6.1 Saggi di denaturazione sulla ficocianina purificata e risospesa in tampone fosfato

Sulla ficocianina purificata, e risospesa nel tampone fosfato, gli studenti hanno ripetuto i saggi di denaturazione già condotti sulla proteina commerciale, utilizzando le stesse condizioni sperimentali, al fine di verificarne la coerenza e confrontare i cambiamenti visibili di colore e fluorescenza tra le due preparazioni. Non potendo preparare una soluzione di ficocianina purificata di concentrazione 1,0 g/L, la soluzione tampone contenente la ficocianina è stata diluita fino a ottenere, per quanto possibile, la stessa colorazione della soluzione commerciale di riferimento (1,0 g/L), in modo da poter confrontare direttamente e agevolmente gli effetti dei diversi denaturanti.

Come nelle prove precedenti, la denaturazione con etanolo ha prodotto risultati coerenti con le attese: la soluzione si è progressivamente decolorata e la fluorescenza rossa è diminuita fino a scomparire, esattamente come osservato nella ficocianina commerciale.

Particolare interesse ha suscitato l'osservazione del comportamento della proteina in presenza di urea come agente denaturante. Infatti, come atteso, in soluzione di urea 8M, gli studenti hanno notato una rapida perdita della colorazione blu della ficocianina e la totale scomparsa della fluorescenza rossa, segno dell'avvenuta denaturazione.

In questa fase non sono state effettuate misurazioni spettrofotometriche, dal momento che le evidenze visive raccolte, variazione di colore e scomparsa della fluorescenza, sono risultate sufficienti a confermare l'efficacia del processo e a consentire la stesura di una metodica sperimentale completa e dettagliata per l'intera attività, come riportato in Appendice.

Il confronto tra la ficocianina commerciale e quella purificata in laboratorio ha permesso agli studenti di confermare che:

- la fluorescenza rossa è una proprietà intrinseca della ficocianina nativa
- la fluorescenza azzurra osservata negli estratti acquosi è dovuta a impurezze completamente eliminate con la purificazione mediante *salting out*

- il processo di precipitazione selettiva con solfato di ammonio è efficace nel separare la ficocianina dalle sostanze interferenti, ottenendo campioni adatti a ulteriori test di denaturazione e analisi spettroscopica.

## 7. Conclusioni

L'attività di estrazione, purificazione e studio della ficocianina da *Spirulina platensis* ha rappresentato un'esperienza di grande valore formativo, che ha permesso agli studenti di coniugare conoscenze teoriche, competenze sperimentali e capacità di analisi critica, riproducendo in piccolo le fasi di una vera ricerca scientifica.

Dal punto di vista scientifico, il percorso ha consentito di:

- comprendere la relazione tra struttura e funzione delle proteine, osservando in modo diretto gli effetti della denaturazione sui legami intermolecolari e sulle proprietà cromatiche e fluorescenti della ficocianina;
- verificare l'efficacia del processo di purificazione per *salting out* con solfato di ammonio, evidenziando la rimozione delle impurezze e la stabilità della proteina nativa;
- osservare le variazioni di colore e fluorescenza come indicatori immediati dello stato conformazionale della proteina, correlando l'esperienza visiva ai concetti di chimica delle proteine e spettroscopia;
- distinguere la fluorescenza rossa caratteristica della ficocianina pura da quella azzurra degli estratti acquosi, dovuta a sostanze accessorie di diversa natura;
- comprendere come la variazione di parametri chimico-fisici (concentrazione salina e presenza di denaturanti) influenzi profondamente la stabilità e le funzioni biologiche di una proteina.

Dal punto di vista didattico, l'attività ha avuto un impatto significativo sul processo di apprendimento:

- gli studenti hanno lavorato in piccoli gruppi, sperimentando il lavoro cooperativo e la pianificazione condivisa delle attività;
- l'approccio basato sul *problem solving* e sulla ricerca sperimentale ha favorito l'autonomia, la capacità di osservazione e la riflessione critica dei risultati;
- la costruzione progressiva della metodologia, non fornita a priori, ma sviluppata attraverso il confronto e la verifica, ha reso gli studenti protagonisti attivi dell'indagine scientifica;
- la connessione tra teoria e pratica di laboratorio ha consolidato competenze trasversali in Chimica organica, Biochimica e Analisi strumentale, offrendo una visione integrata dei fenomeni biologici e chimici.

Nel complesso, il progetto ha permesso di trasformare un'esperienza di laboratorio in un vero percorso di ricerca didattica, in cui la curiosità e l'osservazione diretta hanno guidato l'apprendimento. La ficocianina, con le sue variazioni di colore e fluorescenza, si è rivelata non solo un modello efficace per lo studio delle proteine, ma anche uno strumento capace di stimolare l'interesse, la motivazione e la consapevolezza scientifica degli studenti.

## Riferimenti bibliografici

- [1] A. Llopiz, A. Milián, G. Díaz Domínguez, Purification and characterization of phycocyanobilin, *Bionatura*, 2016, **1**(4), 202-207 (<https://revistabionatura.com/files/8-Purificacion-y-caracterizacion-de-la-ficocianobilina.pdf>).
- [2] R. R. Sonani, R. P. Rastogi, R. Patel, D. Madamwar, Recent advances in production, purification and applications of phycobiliproteins, *World J. Biol. Chem.*, 2016 Feb 26; **7** (1), 100-109 (<http://dx.doi.org/10.4331/wjbc.v7.i1.100>).
- [3] R. Bowen, R. Hartung, Y. M. Gindt, A simple protein purification and folding experiment for general chemistry laboratory, *J. Chem. Educ.*, 2000, **77**(11), 1456.

- [4] B. A. Heller, Y. M. Gindt, A biochemical study of noncovalent forces in proteins using Phycocyanin from *Spirulina*, *J. Chem. Educ.*, 2000, **77**, 1458.
- [5] L. Vernès, P. Granvillain, F. Chemat, M. Vian, Phycocyanin from *Arthrospira Platensis*. production, extraction and analysis, *Current Biotechnology*, 2015, **4**(4), 481-491 ([https://www.researchgate.net/publication/285639218\\_Phycocyanin\\_from\\_Arthrospira\\_Platensis\\_Production\\_Extraction\\_and\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/285639218_Phycocyanin_from_Arthrospira_Platensis_Production_Extraction_and_Analysis)).
- [6] M. A. B. Habib, M. Parvin, T. C. Huntington, M. R. Hasan, A review on culture, production and use of *Spirulina* as food for humans and feeds for domestic animals and fish, *FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1034* (<https://www.fao.org/4/i0424e/i0424e00.pdf>).
- [7] F. Biagioli, *Spirulina*, perché gli Aztechi la consideravano il nettare degli dei (e ingrediente principale del loro formaggio) (<https://www.greenme.it/vivere/salute-e-benessere/spirulina-aztechi/>)
- [8] C. G. Mila, SPIRULINA, alga azzurra fonte di proteine (<https://associazioneargogaudio.org/archivio/90-2013-spirulina,-alga-azzurra-fonte-di-proteine?showall=&limitstart=>)
- [9] R. Fernandes, J. Campos, M. Serra, J. Fidalgo, H. Almeida, A. Casas, D. Toubarro, A. I. R. N. A. Barros, Exploring the benefits of phycocyanin: from *Spirulina* cultivation to its widespread applications. *Pharmaceuticals*, 2023, **16**(4), 592 (<https://doi.org/10.3390/ph16040592>).
- [10] E. Gabrielli, G. Stracci, F. Barbato, Ottenimento di ficocianina e misure spettrofotometriche ([https://www.algae-event.com/cms/uploads/presentations\\_2017/7\\_presentazione\\_Gabrielli.pdf](https://www.algae-event.com/cms/uploads/presentations_2017/7_presentazione_Gabrielli.pdf)).
- [11] Crystal structure of C-Phycocyanin from *Spirulina Platensis*, RCSB, Protein Data Bank (<https://www.rcsb.org/3d-view/1GH0>).
- [12] K. C. Duong-Ly, S. B. Gabelli, Chapter Seven - Salting out of Proteins Using Ammonium Sulfate Precipitation, *Methods in Enzymology*, 2014, **541**, 85-94 ([https://www.researchgate.net/publication/261183134\\_Salting\\_out\\_of\\_Proteins\\_Using\\_Ammonium\\_Sulfate\\_Precipitation](https://www.researchgate.net/publication/261183134_Salting_out_of_Proteins_Using_Ammonium_Sulfate_Precipitation)).
- [13] M. Izadi, M. Fazilati, Extraction and purification of phycocyanin from *spirulina platensis* and evaluating its antioxidant and anti-inflammatory activity, *Asian Journal of Green Chemistry*, 2018, **2**, 364-379 ([https://www.ajgreenchem.com/article\\_63597\\_fc7c879d39c89081be2ee-a96faa9b072.pdf](https://www.ajgreenchem.com/article_63597_fc7c879d39c89081be2ee-a96faa9b072.pdf)).

## Appendice

### Metodica di estrazione e purificazione di ficocianina da *Spirulina platensis* e studio degli effetti della denaturazione con etanolo e urea

#### Saggi con ficocianina commerciale 1,0 g/L

Preparare una soluzione 1,0 g/L di ficocianina commerciale, registrare spettro UV-visibile (618 nm e 370 nm) e verificare la presenza di una fluorescenza rossa alla lampada di Wood.

#### Denaturazione con etanolo

Preparare 4 soluzioni di etanolo al 50%, 60%, 70%, 80%. Verificare la denaturazione in etanolo, preparando 6 campioni di ficocianina commerciale come di seguito indicato:

- 1) 2,5 mL di ficocianina 1,0 g/L + 2,5 mL di acqua distillata (controllo, 0% etanolo)
- 2) 2,5 mL di ficocianina 1,0 g/L + 2,5 mL di etanolo 50% (25% etanolo)
- 3) 2,5 mL di ficocianina 1,0 g/L + 2,5 mL di etanolo 60% (30% etanolo)
- 4) 2,5 mL di ficocianina 1,0 g/L + 2,5 mL di etanolo 70% (35% etanolo)
- 5) 2,5 mL di ficocianina 1,0 g/L + 2,5 mL di etanolo 80% (40% etanolo)
- 6) 2,5 mL di ficocianina 1,0 g/L + 2,5 mL di etanolo 96% (48% etanolo)

Osservare la progressiva decolorazione delle soluzioni e la progressiva scomparsa della fluorescenza rossa, osservabile alla lampada di Wood. Registrare gli spettri UV-visibile dei vari campioni, da cui si nota la diminuzione dell'assorbanza a 625 nm e l'aumento dell'assorbanza a 370 nm.

#### Denaturazione con urea

Aggiungere urea solida alle soluzioni di ficocianina commerciale 1,0 g/L in modo da ottenere le seguenti molarità di urea nelle soluzioni:

- 1) 5,0 mL di ficocianina commerciale + 0,60 g di urea (2M di urea)
- 2) 5,0 mL di ficocianina commerciale + 1,20 g di urea (4M di urea)
- 3) 5,0 mL di ficocianina commerciale + 1,80 g di urea (6M di urea)
- 4) 5,0 mL di ficocianina commerciale + 2,40 g di urea (8M di urea)

Osservare la progressiva decolorazione delle soluzioni e la progressiva scomparsa della fluorescenza rossa, osservabile alla lampada di Wood. Registrare gli spettri UV-visibile dei vari campioni, da cui si nota la diminuzione dell'assorbanza a 618 nm e l'aumento dell'assorbanza a 370 nm.

### Estrazione di ficocianina da biomassa secca di *Spirulina platensis*

#### Lisi cellulare con metodo congelamento-scongelo

Sospendere 2,5 g di polvere di *Spirulina platensis* in 30,0 mL di H<sub>2</sub>O distillata. Effettuare 2/3 cicli di congelamento/scongelo di 24-48 ore a -18°C.

#### Centrifugazione dell'estratto acquoso grezzo

Centrifugare l'estratto acquoso grezzo di colore verde scuro a 4000 giri per 20 min per ottenere un surnatante blu brillante, che alla luce del Sole manifesta una fluorescenza viola, e un residuo verde scuro. Prelevare il surnatante contenente la ficocianina per separarlo dal precipitato verde scuro formato dai residui cellulari e clorofilla. Registrare lo spettro UV-visibile dell'estratto acquoso, verificando la presenza del picco di assorbimento a 618 nm.

### Purificazione ficocianina dell'estratto acquoso

#### Precipitazione di ficocianina con soluzione satura di (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Sottoporre il campione a un singolo step di precipitazione, usando una soluzione satura di (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ottenuta disciogliendo 75 g di (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in 100 mL di acqua distillata. Aggiungere 20,0 mL di una

soluzione satura di solfato di ammonio a 20,0 mL di estratto acquoso di ficocianina (la flocculazione della proteina avviene quasi immediatamente). Dopo una notte in frigorifero a 4°C, centrifugare la sospensione a 5000 giri per 20 minuti fino a ottenere un surnatante e un residuo proteico. Allontanare il surnatante e verificare la presenza di una fluorescenza blu alla lampada di Wood.

*Risospensione in tampone fosfato pH 6,8 del residuo proteico*

Risospendere il residuo proteico in una soluzione tampone di fosfato potassico a pH 6,8 (composizione: potassio fosfato monobasico 2,2 g, potassio fosfato bibasico 2,7 g, acqua distillata 500 ml) e verificare alla lampada di Wood la presenza di una fluorescenza rossa, come per la ficocianina commerciale.

**Saggi su una soluzione di ficocianina purificata, e risospesa in tampone fosfato, avente lo stesso colore (concentrazione simile) della soluzione 1,0 g/L di ficocianina commerciale**

*Denaturazione con etanolo*

Vedere metodica sopra.

*Denaturazione con urea*

Vedere metodica sopra.

## Due parole sui materiali cellulosici

Luigi Campanella

Università di Roma La Sapienza

e-mail: luigi.campanella@uniroma1.it

I materiali cellulosici sono materiali derivati dalla cellulosa, un polisaccaride presente nelle pareti cellulari di piante e alghe. Questi materiali trovano molteplici applicazioni in svariati settori, dall'industria alimentare a quella tessile, farmaceutica, edile, cosmetica e cartaria.



La cellulosa è un composto rinnovabile e biodegradabile, il che la rende un'opzione sostenibile, a basso impatto ambientale, per la produzione di materiali cellulosici che possono essere ottenuti da varie fonti come, ad esempio, legno, paglia, canna da zucchero, fibra di cocco, bagassa di agrumi, carta, cartone, fibre tessili naturali (tra cui la seta, il lino, il cotone) e molti altri. Il processo di estrazione prevede innanzitutto la separazione della cellulosa dalle altre componenti presenti nel materiale. I metodi di estrazione sono diversi e la loro scelta dipende dal tipo di materiale e dall'applicazione finale dei materiali estratti. Alcuni dei metodi di estrazione più comuni sono di seguito riportati.

- *Metodo di trattamento basico*: questo metodo, usato per estrarre la cellulosa dal legno, prevede il trattamento della materia prima con sostanze basiche, come idrossido di sodio o idrossido di calcio, per rompere le leganti chimiche tra la cellulosa e gli altri componenti della pianta.
- *Estrazione con acidi o basi*: si tratta di un metodo comune per estrarre la cellulosa usando una soluzione di acido o base forte che rompe i legami chimici nella struttura della cellulosa, consentendo di separarla dalle altre componenti della materia prima. Questo metodo è co-

munemente usato per estrarre la cellulosa da biomasse non lignificate, come paglia e canna da zucchero.

- *Metodo meccanico*: questo metodo, comunemente usato per estrarre la cellulosa dalla lana di roccia, prevede il trattamento della materia prima con mezzi meccanici (come la macinazione, la triturazione, la separazione per flottazione o la separazione per centrifugazione) per separare la cellulosa dagli altri componenti della pianta.
- *Estrazione con solventi*: il metodo consiste nell'utilizzare solventi organici, come acetone, etanolo o cloroformio, per sciogliere la cellulosa presente nella materia prima. Dopo la separazione della soluzione, la cellulosa estratta può essere utilizzata per produrre biomateriali quali carta, tessuti o bioplastiche.
- *Metodo enzimatico*: l'estrazione con enzimi è un metodo più delicato che utilizza enzimi naturali per scomporre la cellulosa in zuccheri più semplici. Questo metodo è particolarmente utile per l'estrazione di cellulosa da fonti più complesse, come carta in eccesso o scarti della produzione di tessuti.
- *Estrazione con gas*: questo metodo utilizza gas, come diossido di carbonio o vapore acqueo, per separare la cellulosa dalla materia prima. Il gas viene fatto reagire con la cellulosa, rompendo i legami chimici e consentendo di separarla dagli altri componenti.

Negli ultimi anni, sono stati sviluppati metodi avanzati di estrazione della cellulosa utilizzando tecnologie innovative e sostenibili come l'estrazione supercritica, l'estrazione con microonde e l'estrazione con ultrasuoni. Questi metodi offrono una maggiore efficienza e un minor impatto ambientale rispetto ai metodi tradizionali. Ogni metodo di estrazione ha i propri vantaggi e svantaggi e la sua scelta dipende dalla natura della materia prima e dal tipo di cellulosa desiderato. Alcuni metodi risultano più efficienti in termini di resa e costi, mentre altri possono essere più delicati e sostenibili dal punto di vista ambientale.

# La transizione ecologica è a rischio?

Fabio Olmi

e-mail: fabio.olmi@gmail.com

---

**Abstract.** The article examines the state of climate commitments made by the world's leading countries, particularly Italy. It then examines the very disappointing results of COP30, held in Belém in November 2025. In conclusion, it notes that the state of the ecological transition regarding the control of global warming remains worrying.

**Keywords:** clima; situazione mondiale; COP30

---

## 1. Introduzione

Può sembrare un paradosso ma, mentre da un lato il riscaldamento globale si spinge sempre più in alto, dall'altro crescono iniziative sempre più frequenti volte a rallentare le politiche green. Un recente articolo apparso su A&F di Repubblica titola in modo efficace questa tendenza: "Il mondo brucia, ma sul green è una continua retromarcia".<sup>1</sup>

Potrebbe sembrare fuori luogo parlare di transizione ecologica quando intorno a noi ci sono guerre e forti tensioni geopolitiche come la drammatica situazione di Gaza, la crudele guerra in Ucraina, la guerra dimenticata in Sudan e le imposizioni economiche poste da Trump ai vari Paesi del mondo, compresa l'Europa. Non bisogna, però, dimenticare che fra tutte le sfide che abbiamo davanti quella della protezione dell'ambiente e di uno sviluppo sostenibile è probabilmente la più importante per garantire il nostro futuro e preservare il nostro ecosistema.

## 2. Esame della situazione sugli impegni per il clima nei più importanti Paesi del mondo

### 2.1 Stati Uniti

Prima di tutto è Trump a rappresentare un serio problema per la difesa ambientale. La sua posizione sul clima si caratterizza per uno scetticismo nei confronti dell'emergenza climatica e per una politica che privilegia l'industria dei combustibili fossili. Basta pensare a quello che vuol fare in Alaska: cancellare i limiti imposti da Biden alle perforazioni nella National Petroleum Reserve dell'Alaska utilizzando lo slogan "drill baby drill".<sup>2</sup> Durante la sua presidenza ha ritirato gli Stati Uniti dall'Accordo di Parigi e ha aumentato le emissioni gas serra e inquinanti. Nel suo messaggio all'ONU del 23 settembre 2025 Trump ha sostenuto che "il cambiamento climatico è la più grossa truffa perpetrata al mondo". Qual è l'effetto Trump nel Paese? Molte industrie hanno fatto dietrofront rispetto alle loro promesse di tagli alle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Un ampio panorama della situazione è stato fatto in un articolo apparso su A&F di Repubblica:<sup>3</sup> riportiamo qui solo un paio di esempi dei tanti fatti citati nell'articolo. Walmart, il colosso dei centri commer-

---

<sup>1</sup> S. Pogutz, Il mondo brucia, ma sul green è una continua retromarcia, le lobby minacciano la Scienza, *A&F di Repubblica*, 1 settembre 2025.

<sup>2</sup> P. Mastrolilli, Trump vuole trasformare i vincoli per l'estrazione di petrolio, senza tutele ambientali. L'Alaska è diventata il banco di prova del "drill baby drill", *A&F di Repubblica*, 16 giugno 2025.

<sup>3</sup> L. Fraioli, La grande retromarcia. Gli impegni sul clima cadono come mosche, *A&F di Repubblica*, 23 giugno 2025.

ciali USA, si era impegnato a ridurre le emissioni climalteranti delle sue attività del 35% entro il 2025 e del 65% entro il 2030, ma lo scorso dicembre ha affermato che non riuscirà (?) a raggiungere questi obiettivi. La Coca Cola Company, che produce 137 miliardi di bottiglie di plastica l'anno, aveva annunciato che avrebbe ridotto l'uso di nuova plastica di 3 milioni di tonnellate entro il 2025, ma un mese dopo l'elezione di Trump abbandona quell'obiettivo. Lo stesso avviene per molti altri colossi industriali degli Stati Uniti: Amazon, Fedex, Exxon Mobil, Shell e colossi bancari come Ubs e Hsbc. Gli USA per la protezione dell'ambiente sono, quindi, un disastro.

## 2.2 Cina

Facciamo un salto dall'altra parte del mondo e vediamo cosa succede in Cina per quanto riguarda la tutela dell'ambiente. La Cina continua ad adottare una politica "a doppio binario" combinando una sempre più rapida espansione delle energie rinnovabili come solare ed eolico, con la costruzione di nuove centrali a carbone. Risulta, pertanto, la principale utilizzatrice di carbone al mondo e contemporaneamente un leader nella crescita delle rinnovabili. Attualmente, però, si assiste al calo della quota del carbone nel mix energetico grazie all'enorme e rapida crescita delle rinnovabili.

La Cina affronta anche sfide ambientali significative come inquinamento dell'aria, dell'acqua, la deforestazione e la desertificazione. Il governo considera la protezione ambientale un fattore chiave per la stabilità e sta promuovendo la "crescita verde", nonostante la dipendenza ancora dal carbone.

Per comprendere in che misura il governo cinese intende promuovere l'espansione delle energie rinnovabili basta esaminare alcuni dati. La produzione di energia elettrica da solare ed eolico nella prima metà del 2025 è aumentata del 27% rispetto all'anno precedente<sup>4</sup> (Rapporto Ember). L'adozione di energie rinnovabili da parte della Repubblica Popolare continua ad accelerare e anche l'incremento di produzione nel 2024 è stato del 25% rispetto all'anno precedente. Nei 12 mesi tra il luglio 2024 e il giugno 2025 l'eolico e il solare hanno generato più energia di tutte le altre fonti pulite (idroelettrico, nucleare, e bioenergia) messe insieme. Nel 2024 in Cina la produzione di energia pulita ha soddisfatto l'84% della domanda di elettricità. Nel primo semestre del 2025 ha superato la crescita della domanda, consentendo di ridurre del 2% il ricorso a fonti fossili. Gli investimenti in sistemi di accumulo di batterie sono saliti del 69% dal primo semestre del 2024 al primo semestre del 2025 e gli investimenti nella rete sono aumentati del 22%.

Oggi la Cina rappresenta il 31% degli investimenti globali nell'energia pulita. La tecnologia cinese a basso costo ha consentito al 25% dei mercati emergenti di superare gli Stati Uniti nell'elettrificazione degli usi finali. La Cina è il maggior investitore in energia pulita a livello mondiale, con una spesa di 625 miliardi di dollari nel 2024, pari al 31% del totale mondiale. La Cina ha realizzato il più grande campo fotovoltaico del mondo a Midong (Xinjiang) che ha oltre 5 milioni di pannelli (è vasto come la città di Napoli) e una potenza installata di 5 GW; la figura 1 mostra un'immagine del campo dall'alto e dal satellite.



**Figura 1.** Il più grande campo fotovoltaico del mondo a Midong in Cina, ripreso dall'alto (sinistra) e dal satellite (destra)

<sup>4</sup> <https://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/solare-eolico-cina/>

### 2.3 India

È importante anche la situazione energetica e ambientale dell'India e, poiché se ne parla poco, vediamo come e perché.

L'India mira a soddisfare la crescente domanda energetica di 1,4 miliardi di persone e cerca di promuovere la propria crescita industriale. Parimenti, deve affrontare una grave crisi ambientale ed energetica: il carbone domina il suo mix energetico e l'inquinamento atmosferico crea gravi problemi di salute. L'India è il secondo Paese al mondo dopo la Cina per consumo di carbone, ma si sta muovendo verso le energie rinnovabili ponendosi l'obiettivo di raggiungere le zero emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2070, 20 anni dopo il limite di azzeramento deciso dall'Europa.

La forte crescita demografica e l'urbanizzazione dell'India rendono, però, difficile bilanciare lo sviluppo economico con la decarbonizzazione, tanto è vero che per tenere il passo della crescita del PIL che nel 2023 è stato del 7,8% l'India (che è stata l'economia principale in più rapida crescita al mondo nel 2023 ed è rimasta intorno al 7% fino al 2025) è ricorsa anche all'importazione di forti quantità di petrolio e gas naturale soprattutto dalla Russia.<sup>5</sup> L'India trascura seriamente il problema ambientale.

### 2.4 Russia

Nonostante la competitività delle energie rinnovabili e le condizioni favorevoli del territorio (ampi spazi e varietà climatica) il mercato delle energie rinnovabili in Russia è, rispetto ad altre nazioni, in uno stato di profonda arretratezza. Secondo l'ultimo rapporto (giugno 2024) dell'Associazione Russa per lo Sviluppo delle Energie Rinnovabili (ASER), la capacità totale di energia verde installata nel territorio russo è pari a 6,18 GW (contro i 46,5 GW della Francia e i 46,32 GW dell'Italia). Il fotovoltaico e l'eolico rappresentano lo 0,8% dell'energia prodotta.<sup>6</sup> La Russia che ha disposizione ingenti quantità di gas e di petrolio utilizza essenzialmente queste fonti per produrre elettricità con un forte impatto negativo sulle emissioni serra.

### 2.5 Europa

A che punto siamo per la transizione ecologica in Europa e qual è attualmente la tendenza per il futuro? Nel dicembre 2019 la Commissione Europea, presieduta da Ursula von der Leyen, ha approvato il cosiddetto Green Deal, documento che è finalizzato a rendere l'UE il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050. Questo documento prevede una serie di interventi quali: la decarbonizzazione del settore energetico e dei trasporti, la promozione dell'economia circolare e dell'efficienza energetica, la sostenibilità dell'agricoltura, il contrasto al greenwashing e incentivi per prodotti più durevoli, riutilizzabili dai consumatori e riciclabili.

In particolare, ricordiamo alcuni degli obiettivi principali:

- azzerare le emissioni di gas serra entro il 2050, rendendo l'Europa il primo continente climaticamente neutro;
- ridurre le emissioni del 55% entro il 2030 rispetto ai valori del 1990 e aumentare la quota di energie rinnovabili al 42,5%, con l'ambizione di arrivare al 45%;
- promuovere l'uso più appropriato delle risorse, riducendo i rifiuti e promuovendo il riutilizzo e il riciclo di prodotti e imballaggi;
- aiutare gli investimenti verso attività sostenibili.

Dopo il Green Deal è stato approvato in data 27 febbraio 2023 il documento REPowerEU (Reg. UE 435/2023) che intende supportare riforme e investimenti rivolti alla diversificazione nel settore energetico, aumentando la resilienza, la sicurezza e la sostenibilità del sistema energetico europeo per favorire l'autonomia energetica dell'Europa.

Nel 2024 l'energia solare in Europa ha superato quella del carbone (in continua diminuzione) nella produzione di elettricità. Questo è quanto emerge dal rapporto European Electricity Review 2025, pubblicato dal think tank energetico Ember.

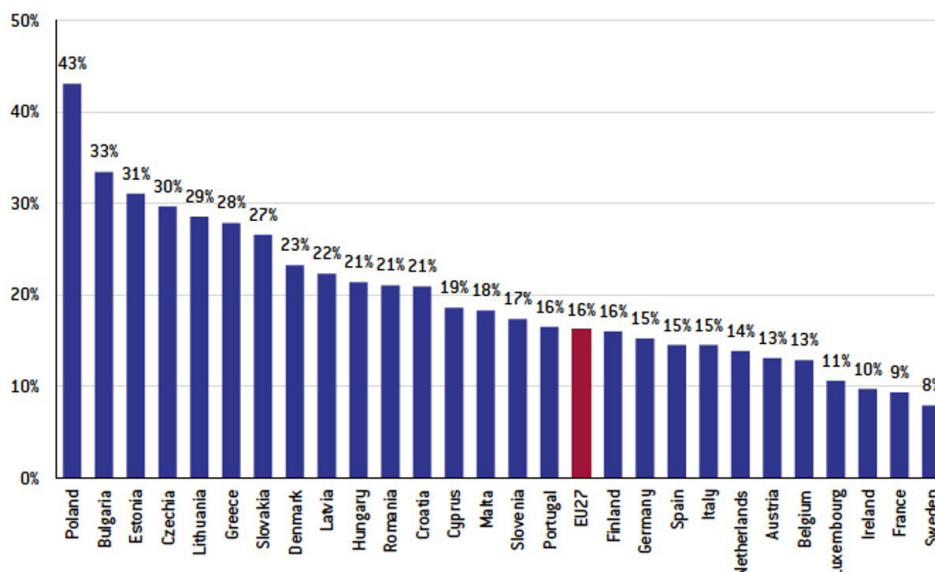
<sup>5</sup> <https://www.cesi.italia.org/it/articoli/le-prospettive-dellautonomia-energetica-indiana>

<sup>6</sup> <https://ari.site/2024/10/16/energie-rinnovabili-nella-russia-post-sanzioni-via-libera-alla-cina-o-terra-bruciata/>

I dati delle rinnovabili nel mix elettrico UE 2024 sono i seguenti:<sup>7</sup>

- la crescita delle rinnovabili, in particolare del fotovoltaico, è il principale motore di questo cambiamento; nel 2024 la produzione solare è aumentata di 54 TWh (+22%) rispetto al 2023, cosa che permetterà a tutti i Paesi europei di avvicinarsi agli obiettivi fissati per il 2030;
- il carbone, che nel 2019 era la terza fonte di energia dell'UE, è sceso al sesto posto nel 2024, segnando una decisa inversione di tendenza;
- nel 2024 l'Unione Europea ha raggiunto un traguardo storico nella sua transizione energetica: per la prima volta, la quota complessiva di energie a basse emissioni (eolico, solare e nucleare<sup>8</sup>) nel mix energetico dell'UE ha raggiunto il 71%, un dato record, parallelamente la produzione di elettricità da carbone e gas è diminuita rispettivamente del 16% e del 6% con un abbassamento complessivo delle emissioni del 9%.

È interessante vedere come incide la transizione ecologica sui vari Paesi europei. Un articolo del settembre 2025 ci offre la possibilità di averne un quadro preciso.<sup>9</sup> Come si vede in figura 2 lo sviluppo della transizione verde ha un livello assai differenziato tra i vari Paesi europei, alcuni sono avanzati (e l'Italia è in buona posizione), mentre altri sono rimasti indietro. Polonia, Bulgaria, Estonia, Cechia e Lituania sono i Paesi con le quote maggiori di PIL esposte alla transizione. La quota di PIL maggiore coinvolta nella transizione verde in questi Paesi è la misura della loro vulnerabilità legata a settori produttivi ad alte emissioni di gas serra, che non hanno ancora affrontato adeguatamente la conversione verso un modello a minore impatto ambientale. Il Paese più avanzato, come si vede dal grafico, è la Svezia; l'Italia si colloca nella top ten dei Paesi più avanti.



**Figura 2.** I Paesi europei più vulnerabili alla transizione ecologica in percentuale sul PIL (fonte Bruegel, 2023)

Dunque, tutto bene in Europa per il problema della transizione ecologica? Dall'esame di alcuni fatti recenti non sembra proprio così.

Per quanto riguarda il settore dell'energia, emerge sulla scena la promessa fatta dalla Von der Leyen, sotto la pressione di Trump, dell'acquisto di 750 miliardi di dollari di gnl dagli Stati Uniti.<sup>10</sup> Si tratte-

<sup>7</sup> <https://sprintenergy.it/ue-trnsizio9ne-energetica/>

<sup>8</sup> Su pressione della Francia il nucleare è stato inserito dall'Europa tra le energie green poiché non produce gas serra.

<sup>9</sup> R. Amato, Industria e trasporti: quanto pesa la transizione, *A&F di Repubblica*, 1 settembre 2025.

<sup>10</sup> a) E. Bonotti, L'impegno sul gas è un'intesa vuota che fa tutti contenti, *A&F di Repubblica*, 4 agosto 2025; b) E. Bonotti, Il dilemma del gas Usa, mancano i compratori per 750 miliardi di import, *la Repubblica*, 8 agosto 2025.

rebbe di una spesa di 250 miliardi per ognuno dei tre anni della presidenza di Trump. Questa promessa non solo verrebbe ad alterare profondamente la politica di contenimento dei fossili nel mix energetico della UE, ma risulterebbe anche impossibile avere a disposizione una quantità così grande di gnl, perché gli Stati Uniti ne esportano annualmente poco più di 300 miliardi di dollari e difficilmente, almeno a breve, potrebbero arrivare a oltre 500 miliardi di dollari. Inoltre, occorrerebbe considerare come trasportare tutto questo gnl. In conclusione, sembra evidente che l'operazione è quantomeno molto discutibile.

È bene, però, ricordare che non sono Bruxelles e Washington a stringere accordi sul gas naturale liquefatto, ma gli operatori privati. Il che rende gli impegni presi "non vincolanti" e li declassa a intenzioni trasmesse in buona fede. Come vedremo più avanti l'Italia entra in questa partita.

Si assiste intanto a un aumento dei contratti di importazione di gas che, invece, dovrebbe diminuire per portare nel 2030 a una diminuzione delle fonti fossili del 55%. Anche a questo aumento, vedi più avanti, partecipa in modo massiccio l'Italia.

Un elemento di crisi per il cambiamento climatico fissato dalla UE è rappresentato dalle pressioni dei produttori di auto a motore termico per spostare il limite della loro scomparsa dal mercato più avanti rispetto al previsto 2035. L'Italia insieme alla Germania sono i Paesi europei che hanno premuto di più in tal senso. Tuttavia, nella riunione tenuta il 10 settembre 2025 sullo stato dell'Unione, Ursula von der Leyen ha anche proposto ai costruttori europei di auto di "orientarsi sulla produzione di una nuova macchina elettrica piccola nelle dimensioni e nei prezzi, per rispondere alla concorrenza low cost dei modelli cinesi e per contribuire a salvare un'industria pilastro della nostra economia". Inoltre, la von der Leyen ha detto che la flessibilità adottata per i target del 2025 "funziona", facendo intendere che si sarebbe pensato di fare altrettanto con i prossimi obiettivi. Ha, però, ribadito che non intende smantellare la data del 2035, pilastro del Green Deal che lei stessa ha proposto e che è stato approvato.<sup>11</sup>

Nel Consiglio dell'UE di giovedì 18 settembre 2025, durante il quale si sarebbe dovuto discutere sugli obiettivi climatici al 2040 (la proposta della Commissione è una riduzione delle emissioni del 90%), non è stato votato niente. Quindi è slittato anche il voto dell'europarlamento sui target climatici. Si è prospettata una votazione per metà ottobre, ma i governi sono rimasti ancora divisi sull'ambizione degli obiettivi e alcuni Paesi, tra cui l'Italia, hanno chiesto più tempo.<sup>12</sup>

Bisogna arrivare alla riunione della Commissione UE rinviata al 10 e al 16 dicembre 2025 per avere il quadro concreto dei pericolosi cedimenti sul Green Deal europeo.<sup>13</sup> Il pressing delle aziende automobilistiche e dei Paesi produttori di autovetture, soprattutto Italia e Germania, ha fatto saltare il divieto di emissioni di CO<sub>2</sub> previsto entro il 2035: addio alla conversione totale al trasporto elettrico entro il 2035, uno dei capisaldi del Green Deal.

Pertanto, secondo quanto è emerso da questa riunione della Commissione Europea, sono ammessi oltre il 2035 i motori ibridi, nei quali sono presenti sia i motori a scoppio che quelli elettrici.<sup>14</sup> Sono ammessi oltre il 2035 anche i motori termici che utilizzano e-fluel e anche bio-fluel. Quindi, nel 2035 l'obiettivo di riduzione dell'emissione di CO<sub>2</sub> non sarà più del 100%, ma al 90%.

Sull'utilizzo dei bio-fuel ha premuto l'Italia (per tutelare la produzione delle bioraffinerie dell'ENI) e sull'utilizzo degli e-fluel, sicuramente più accettabili dei bio-fluel, ha premuto la Germania.

Sono stati aggiornati anche gli obiettivi previsti per i furgoni, che dovranno ridurre le emissioni del 40%, anziché del 50% come previsto.

La Commissione ha, infine, approvato una direttiva su cui si dovrebbe orientare la produzione di fu-

<sup>11</sup> F. Santelli, Auto, UE più vicina ai produttori. E-car piccola e accessibile, *la Repubblica*, 11 settembre 2025.

<sup>12</sup> F. Loiacono, Slitta il voto europeo sui target climatici al 2040, *La Nuova Ecologia*, settembre 2025.

<sup>13</sup> R. Amato, Sostenibilità e ambiente: un colpo al Green Deal dal parlamento europeo, *la Repubblica*, 16 dicembre 2025.

<sup>14</sup> L'ibrido plug-in è dotato di un motore a benzina e di un propulsore elettrico. Grazie a una batteria grande, offre maggiore autonomia di viaggio in modalità elettrica rispetto alle ibride con ricarica autonoma. La presenza del motore termico che ricarica la batteria permette di fare viaggi lunghi senza problemi di autonomia.

ture macchine in Europa: raccogliendo la proposta della von der Leyen emersa nella riunione 18 settembre, è stato approvato che i produttori di auto si orientino verso una nuova categoria di auto per le quali si potrà beneficiare di crediti: auto elettriche piccole, sotto i 4,2 metri, di costo compreso tra i 15 e i 25 mila euro che, se fatte in Europa per contrastare la concorrenza delle auto cinesi, avranno un bonus per l'acquisto.<sup>15</sup>

Come si vede l'Europa, che con il Green Deal è stato il primo continente ad aver messo dei limiti precisi temporali per l'inquinamento da gas serra, li vede assai modificati a fine 2025.

## 2.6 Italia

Vediamo quali sono le iniziative di vario tipo che, nel nostro Paese, stanno mettendo in crisi un'ordinata transizione ecologica europea. Cominciamo dall'energia: abbiamo sopperito al progressivo abbandono del gas russo con un serie di contratti di importazione di metano da una moltitudine di Paesi, anche di dubbia affidabilità, con contratti di acquisto, anche ultraventennali,<sup>16</sup> e, sotto la pressione di Trump, abbiamo concluso massicci acquisti di gnl dagli USA a costo elevato per molti anni.<sup>17</sup> In particolare, l'Edison ha firmato un contratto con la Shell per importare, a partire dal 2028 e per 15 anni, un miliardo di metri cubi di gnl all'anno. L'ENI, oltre ai contratti di fornitura stipulati con vari Paesi africani, ne ha fatto uno con il Qatar per la fornitura di 1,6 miliardi di metri cubi l'anno di metano per 27 anni, con cui si assicura le forniture dal 2026 al 2053, oltre il limite in cui si dovrebbe realizzare in Europa la neutralità carbonica!!!<sup>18</sup>

Siamo dinanzi ad una situazione incredibile. Naturalmente dal ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica tutto silenzio, l'ENI non si tocca.

D'altra parte, le rinnovabili hanno raggiunto in Italia nel 2024 il 43,2 % della produzione di energia elettrica: è merito dell'iniziativa privata, poiché il settore pubblico (con il ministro Pichetto Fratin) sembra interessarsi solo della promozione di nuovo nucleare, mentre sono stati lasciati al palo numerosi progetti di eolico offshore e non si spinge affatto il solare e l'eolico.

Come accennato sopra, il settore industriale, e soprattutto quello dell'automotive, frena la transizione ecologica. Stellantis ha fatto una richiesta esplicita all'Europa: è impossibile raggiungere la fine dei motori combustione interna per il 2035.<sup>19</sup> L'ad di Stellantis, Antonio Filosa, ha dichiarato: "I target di azzeramento delle emissioni fissati dall'Ue per il 2035 non sono raggiungibili". Tutti i costruttori di auto, Italia e Germania in testa, hanno chiesto a Bruxelles maggior flessibilità sulla data del 2035 e, secondo quanto emerso il 16 dicembre 2025 alla riunione della Commissione Europea, sono stati accontentati.

## 2.7 Gli ultimi eventi

La situazione italiana di fronte al Green Deal è stigmatizzata dalla posizione della premier Meloni che, nella sua dichiarazione alla Camera del 22 ottobre, ha sostenuto che: "la serie di paletti del Green Deal europeo non rappresentano che ambientalismo ideologico e follie verdi. L'approccio ideologico impone obiettivi irraggiungibili che producono danni al nostro tessuto economico-industriale."<sup>20</sup>

Non solo, la politica energetica italiana punta decisamente sul gas con l'idea di diventare un hub europeo del gas, attraverso la realizzazione del Piano Mattei. Il ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica ha dichiarato che in Europa sosterrà, come di fatto è avvenuto, l'impiego dei biocombusti-

<sup>15</sup> D. Longhini, Non solo auto elettriche, l'ibrido sopravvive alla scadenza del 2035, *la Repubblica*, 17 dicembre 2025.

<sup>16</sup> ENI ha fatto contratti per la fornitura di gas con molti Paesi africani: Algeria, Angola, Congo, Mozambico, Nigeria e anche il Qatar. Il contratto ENI di fornitura di 1,6 miliardi di m<sup>3</sup> l'anno di gas dal Qatar è per 27 anni, dal 2026 al 2053, e sfora platealmente gli obiettivi di neutralità carbonica previsti per il 2050.

<sup>17</sup> L'ENI ha firmato un contratto con gli USA per la fornitura di 2 milioni di tonnellate all'anno per 20 anni, come riportato dall'articolo seguente: E. Bonotti, ENI fa il pieno di gas liquido USA, *la Repubblica*, 16 luglio 2025.

<sup>18</sup> A. Zoppo, ENI, in Qatar il contratto record che spazzerà via l'ultimo gas russo, *la Repubblica*, 23 ottobre 2023.

<sup>19</sup> F. Santelli, Stellantis riparte dagli Usa. Filosa: l'Ue incentivi le city car, *la Repubblica*, 12 settembre 2025.

<sup>20</sup> F. Cupellaro, Così l'Italia pensa di annacquare il Green Deal, *Green & Bleu*, ottobre 2025, pag. 23.

bili anche oltre il 2035 (grande produttrice è l'ENI<sup>21</sup> con due bioraffinerie), inoltre, sostiene da tempo di riavviare il nucleare nel nostro Paese. La premier non è andata a Belém, in Brasile, per la COP 30, mentre è andato il ministro Pichetto Fratin.

La presidente della Commissione Europea, Ursula von der Leyen, in partenza per la COP30 di Belém, si è dichiarata entusiasta perché “Abbiamo posto una pietra miliare nel nostro percorso verso il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. E per mantenere gli obiettivi di Parigi a portata di mano” (?!?!).

Credo che non sia necessario alcun commento.

La COP30, tenuta a Belém (la porta dell'Amazzonia) in Brasile dal 10 al 21 novembre, è stata una delusione. Infatti, di fronte alle speranze, comprese le mie, che, essendo ospitata in uno stato che non si può certo definire un petrostato,<sup>22</sup> ci sarebbe stata una svolta decisiva verso il tentativo di limitare la produzione di idrocarburi per combattere il riscaldamento globale. Invece all'apertura dei lavori, mentre il segretario generale delle Nazioni Unite Guterres affermava che, se non interveniamo decisamente ad abbattere l'impiego dei combustibili fossili, si andrà incontro ad un “fallimento morale e una negligenza mortale”,<sup>23</sup> il Presidente del Brasile, Lula, ha dichiarato che il petrolio è “ancora necessario”, una dichiarazione che non fa che ritardare ancora decisioni per un rapido addio alle fonti fossili.

L'inaugurazione della COP30 è stata accompagnata da un grande spettacolo: l'arrivo a Belém di una grande e variopinta folla di indigeni amazzonici arrivati attraverso i fiumi su un centinaio di battelli e piccole lance a motore dalla Colombia, dal Perù, dall'Equador e dal nord del Brasile (Figura 3). Erano migliaia e, attraverso un loro capo, hanno dichiarato che “siamo qui per fare la storia, dobbiamo unirci per fermare la distruzione della natura. La risposta alla crisi? Siamo noi”.<sup>24</sup>



**Figura 3.** Un gruppo di indigeni amazzonici giunti a Belém

<sup>21</sup> L'ENI possiede bioraffinerie in varie zone d'Italia e produce biocarburanti avanzati, principalmente HVO (olio vegetale idrogenato) per diesel, bio-nafta per la chimica, bio-GPL e bio-jet fuel (SAF) per l'aviazione.

<sup>22</sup> Il Brasile è un produttore di petrolio di media entità e la sua compagnia statale Petrobras è incentrata sull'esplorazione e l'estrazione offshore (bacini di Santos e Campos); il dibattito interno sulla necessità di investire risorse per accelerare la transizione energetica è vivace per cui il Paese appare in una posizione ambigua.

<sup>23</sup> G. Talignani, Nel cuore dell'Amazzonia il vertice globale sul clima. Serve un patto anti Usa, *la Repubblica*, 7 novembre 2025.

<sup>24</sup> G. Talignani, COP30, la marcia degli indigeni - L'Amazzonia non è dei ricchi, nessuno tocchi la nostra terra, *la Repubblica*, 10 novembre 2025.

La situazione all'interno dello stesso governo brasiliano è spaccata in due, tra la componente che è a favore di fissare una stringente road map per la riduzione dei fossili, guidata dalla ministra del Clima e dell'Ambiente, Marina Silva, e la componente favorevole ancora ai fossili, che fa riferimento al ministro dell'Energia, Alexandre Silveira, l'uomo che ha spinto Lula per far entrare il Brasile all'Opec, il cartello dei produttori di petrolio.<sup>25</sup>

Alla fissazione di una stringente road map per la fuoruscita dai fossili si sono opposte Arabia Saudita e Russia. La Colombia ha, invece, presentato una lista dei Paesi sottoscrittori (83) della dichiarazione per l'uscita dai fossili, che vede la presenza di tutti Paesi europei, tranne Polonia e Italia. Non solo, ma l'Italia incassa un'ulteriore sconfitta: nel Rapporto sulle performance per l'abbattimento del contributo dei fossili (Germanwatch) passa al 46° posto del mondo, tre posizioni più in basso del 2024, sempre più lontana dalle prime Danimarca, Regno Unito e Marocco. Maglia nera Stati Uniti, Iran, Cina e Arabia Saudita.

Per tutto ciò, non c'è da meravigliarci se il testo finale approvato nella COP30 è stato ben al di sotto delle aspettative.

Ci sono volute decine di ore di trattative per raggiungere un compromesso al ribasso, l'unico capace di ottenere un consenso di Paesi arroccati su posizioni molto diverse: nel testo finale è scomparsa l'espressione road map per i combustibili fossili, indigesta ai sauditi e a tutti i petrostati, ed è stato cancellato ogni riferimento esplicito ai combustibili fossili, mentre si è spinto l'impiego dei biocombustibili. Al posto della tanto attesa road map il testo finale di Belém "lancia un generico Global implementation accelerator, come iniziativa cooperativa, facilitatrice e volontaria".

Per quanto riguarda la finanza climatica, per le risorse economiche chieste dai Paesi in via di sviluppo ai Paesi più ricchi, fissato a Baku alla Cop29 in 300miliardi di dollari l'anno entro il 2035, si sono chiesti a Belém sforzi per almeno triplicare i finanziamenti per il 2035.<sup>26</sup> È poi stato concordato di cercare di bloccare la deforestazione dell'Amazzonia.

In sintesi, questa Cop30 presenta un deludente risultato. C'è da domandarsi a cosa servono queste mega-riunioni se non portano ad alcuna conclusione veramente utile per combattere il riscaldamento climatico.

Mi si consenta, a questo punto, di esternare una mia utopia: qual è l'idea? Se un consumatore di un bene cala la sua richiesta, il fornitore non può che diminuire l'offerta, altrimenti ci rimette. Bisognerebbe, allora, che i Paesi consumatori e importatori di petrolio o gas si coordinassero tra loro, costituendo una sorta di Gruppo opposto all'Opec che si impegnasse a potenziare sempre più rapidamente le energie rinnovabili, fino a rendersi indipendenti dalla richiesta di combustibili fossili. Così facendo, in mancanza della domanda di fossili, chi li produce è costretto ad abbassare sempre più la produzione. L'offerta non avrebbe più in mano il controllo dei fossili e si diminuirebbe il riscaldamento globale e il petrolio rimarrebbe sottoterra. D'altra parte, se anche i petrostati decidessero di abbassare i prezzi per favorire l'acquisto dei combustibili fossili, le rinnovabili sono assai più convenienti (e lo diventano sempre più) e sarebbe difficile che il prezzo del petrolio o del gas calasse oltre certi limiti per fare concorrenza alle rinnovabili perché non sarebbe più conveniente la sua estrazione.

L'Italia costituisce un paradosso: pur essendo un Paese povero di energie fossili, ma grande consumatore soprattutto di gas, non sviluppa rapidamente le energie rinnovabili quanto dovrebbe, perché il loro sviluppo è affidato solo ai privati; il governo non fa nulla per potenziarle (nonostante i tanti progetti che ci sarebbero) considerato che la politica energetica non la fa il governo, ma l'ENI, che non ha certo l'interesse a perdere il suo mercato.

Situazione completamente diversa per la Spagna e il Portogallo che non hanno nel loro tessuto economico una azienda tipo l'ENI: in Spagna si è raggiunta una quota di oltre il 60% nell'apporto delle rinnovabili alla produzione di energia elettrica e in Portogallo si è toccata addirittura la quota di oltre l'80% dell'apporto delle rinnovabili alla produzione elettrica (dati luglio 2024).

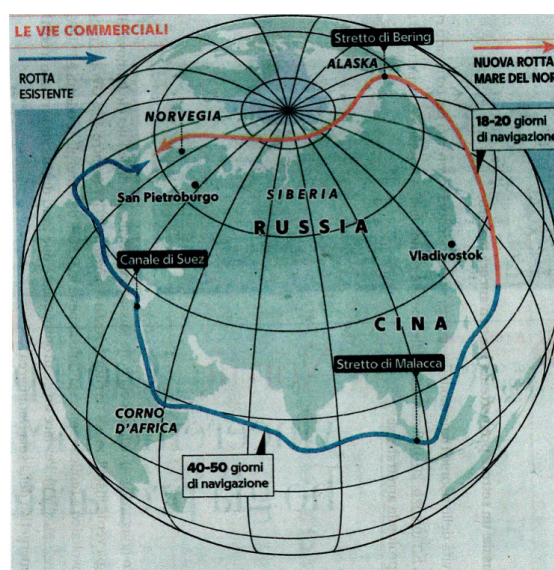
<sup>25</sup> M. Albrizio, Fumata nera a Belém, *La Nuova Ecologia*, 21 novembre 2025.

<sup>26</sup> L. Fraioli, Clima, accordo al ribasso. L'addio a petrolio e gas resta ancora un miraggio, *la Repubblica*, 23 novembre 2025.

### 3. Per concludere, uno sguardo d'insieme nel mondo

Dall'esame della situazione ambientale, si osserva che la scorsa estate ci ha consegnato un bollettino di fuoco: incendi spaventosi che hanno devastato boschi e campagne, solo in Spagna sono stati bruciati quasi 390.000 ettari; ondate di calore che hanno provocato gravi difficoltà a un'ampia gamma di popolazioni e migliaia di vittime tra i più deboli, nonché forte siccità in vari Paesi; temporali e uragani che hanno prodotto enormi danni.

È sempre più evidente il cambiamento climatico che sta avvenendo, dovuto alle sempre crescenti emissioni di gas serra. Per coloro che mostrano ancora negazionismo, basterebbe invitarli a riflettere su un dato: una portacontainer cinese farà a breve il suo viaggio sulla rotta artica,<sup>27</sup> visto che i ghiacci della calotta artica si stanno rapidamente sciogliendo. La figura 4 mostra l'enorme differenza tra la rotta artica e quella "normale" attraverso il canale Suez.



**Figura 4.** La rotta polare diventata una via commerciale: una portacontainer cinese sta per percorrerla

D'altra parte, nella lotta alla diminuzione dei gas serra, la situazione degli Stati Uniti diventerà sempre più grave sotto l'amministrazione Trump. La Cina, pur mostrando un grande impegno nel potenziamento delle fonti rinnovabili, proseguirà ancora a lungo a pesare sulle emissioni prodotte dal carbone e dal petrolio. L'India rappresenta una forte preoccupazione per il grande impiego delle fonti fossili e la sua esplicita dichiarazione che riuscirà (?) nella decarbonizzazione solo nel 2070. La Russia è un grosso problema per l'uso quasi esclusivo delle fonti energetiche fossili e non mostra intenzione di rinunciarvi. L'Europa appare la più virtuosa negli intenti, ma si sono coalizzati, sempre più pericolosamente, interessi che tendono a indebolire il Green Deal, con la sempre più probabile rinuncia a diventare davvero il primo continente a raggiungere la neutralizzazione climatica in tempi ragionevoli. In conclusione, la situazione della transizione verde a livello mondiale è ancora preoccupante e, per ricordare solo il contributo dell'energia da combustibili fossili, esso si attesta ancora globalmente intorno all'80%.

<sup>27</sup> M. Molinari, Primo viaggio sulla rotta artica, Xi guida la rivoluzione dei ghiacci, *la Repubblica*, 19 settembre 2025.



# Intelligenza artificiale: vantaggi, opportunità, rischi

Paola Bortolon

Associazione Nazionale Insegnanti Scienze Naturali (A.N.I.S.N.)

e-mail: [bortolonpaola@gmail.com](mailto:bortolonpaola@gmail.com)

---

**Abstract.** Artificial intelligence has become a central subject of study and global debate. Based on an extensive literature review and Brookings Institution reports, this article outlines the benefits and risks of AI, especially regarding its unguided use by young people outside the framework of traditional education and social norms.

**Keywords:** intelligenza artificiale; vantaggi; rischi: sfide

---

## 1. Introduzione

Nel novembre del 2022, OpenAI<sup>1</sup> ha lanciato ChatGPT, un modello di linguaggio di frontiera di grandi dimensioni (Large Language Model, LLM). Nel giro di cinque giorni, ChatGPT ha raggiunto cinque milioni di utenti. Dopo due mesi, questo numero è salito a cento milioni. Nell'agosto 2025, 700 milioni di persone in tutto il mondo utilizzavano ChatGPT (Mehta, 2025).<sup>2</sup> Molte di esse sono studenti che sfruttano il LLM per fare brainstorming, ricevere tutoraggio, creare e apprendere, per lavorare meglio e più velocemente e per esternalizzare il proprio pensiero.

Dalla comparsa di questa forma, oggi la più comune, di intelligenza artificiale generativa, sinteticamente indicata "IA", la comunità educativa discute i suoi potenziali benefici e i suoi pericoli. Anziché attendere un decennio per condurre un'analisi a posteriori sui fallimenti e sulle opportunità dell'IA, il Center for Universal Education della Brookings Institution ha avviato uno studio globale della durata di un anno, una "analisi preventiva" (premortem), sull'IA generativa, volto a rispondere alle seguenti due domande di ricerca:

- Quali sono i potenziali rischi negativi che l'IA generativa pone all'istruzione di bambini e giovani?
- Alla luce di questi potenziali rischi, che cosa si può fare per prevenirli, massimizzando al contempo i benefici potenziali dell'IA?

L'analisi preventiva (premortem) ha incluso interviste, focus group e consultazioni con 505 studenti, insegnanti, genitori, dirigenti scolastici ed esperti di tecnologia in 50 Paesi. I risultati si sono basati sulle loro esperienze con l'IA, su un'attenta revisione di centinaia di studi e su un panel Delphi.

Considerata la natura emergente del settore e la necessità di fare luce su come l'IA venga implementata nell'istruzione, le esperienze dei bambini e quelle degli adulti che li circondano hanno costituito il fulcro dell'analisi.

È stato esaminato soprattutto il *ruolo dell'IA nello sviluppo cognitivo, sociale ed emotivo dei bambini, sia a scuola sia al di fuori di essa*, includendo la crescente interazione con agenti artificiali configurati come "amici".

---

<sup>1</sup> OpenAI è un laboratorio di ricerca sull'intelligenza artificiale composto da OpenAI, Inc., un'organizzazione senza scopo di lucro, e dalla sua sussidiaria OpenAI, L.P., una società a scopo di lucro. Fu fondata il 10 dicembre 2015, con sede a San Francisco, con lo scopo di "collaborare liberamente" con altre istituzioni e ricercatori rendendo i suoi brevetti e ricerche aperti al pubblico. Tra i fondatori vi sono Elon Musk e Sam Altman.

<sup>2</sup> I. Mehta, *OpenAI says ChatGPT is on track to reach 700M weekly users*, TechCrunch, 2025, 4 agosto (<https://techcrunch.com/2025/08/04/openai-says-chatgpt-is-on-track-to-reach-700m-weekly-users/>).

La tecnologia e l'uso dell'IA nelle scuole (Reich, 2025)<sup>3</sup> può arricchire l'istruzione, può far superare i vincoli esistenti nei sistemi educativi, può personalizzare i processi di insegnamento-apprendimento, ma l'impiego massivo o uno scorretto utilizzo non migliorano gli esiti dei percorsi formativi (OCSE 2015; West, 2023).<sup>4</sup>

Ad esempio, sebbene l'espansione di Internet sia correlata allo sviluppo economico, uno studio condotto su 2,5 milioni di quindicenni in 82 Paesi suggerisce che l'introduzione della copertura 3G tra il 2000 e il 2018 abbia prodotto diminuzioni statisticamente significative nei punteggi di matematica, lettura e scienze, nonché nelle relazioni sociali degli studenti e nel loro senso di appartenenza (Jain e Stemper 2024).<sup>5</sup> La retorica secondo cui l'adozione della tecnologia, di per sé, rappresenterebbe innovazione e progresso non è solo falsa, ma compromette anche la capacità della società di comprendere come sfruttare efficacemente l'IA per promuovere l'istruzione dei minori (Reich, 2025). Le ricerche indicano che la tecnologia contribuisce in modo più efficace al miglioramento dell'istruzione solo se viene inserita all'interno di strategie attentamente progettate e implementate (Hardman, Atkinson, & Meyer, 2019).<sup>6</sup> Gli strumenti e le piattaforme devono essere progettati in modo etico e responsabile, basandosi sulle scienze dell'apprendimento. Scuole e famiglie devono poi collaborare per garantire che l'uso dell'IA da parte dei bambini sostenga, e non danneggi, il loro sviluppo. Gli strumenti devono inoltre supportare le relazioni umane, inclusa la relazione insegnante-studente, utilizzando pratiche pedagogiche solide progettate per integrare, e non sostituire, l'apprendimento. Educatori e studenti sono invitati a considerare e riflettere sia sui benefici sia sui rischi che queste tecnologie comportano.

Comprenderne i benefici e i danni non è però cosa semplice. Non vi è ancora un numero significativo di ricerche di tipo longitudinale sui suoi effetti per quanto attiene sia all'apprendimento sia al benessere dei ragazzi.

Attualmente, i rischi non sono sempre chiari e prevedibili e, soprattutto, non sono sempre condivisi. Se, infatti, strumenti e piattaforme ben progettati possono offrire numerosi vantaggi educativi e anche ampliare l'accesso all'istruzione agli studenti precedentemente esclusi dalle esperienze formative, se è possibile personalizzare l'apprendimento attraverso piattaforme adattive, strumenti di scrittura e programmi di tutoraggio che si adattano alle esigenze individuali, se, nello stesso tempo, gli insegnanti hanno l'opportunità di migliorare professionalmente, un'eccessiva dipendenza da questi strumenti può inficiare la capacità di apprendere, il benessere sociale ed emotivo degli studenti e alterare le relazioni di fiducia con insegnanti e coetanei. L'implementazione indiscriminata dell'IA rischia inoltre di accentuare le divisioni sociali.

## 2. Che cos'è l'AI generativa?

L'IA generativa indica una famiglia di tecnologie che, addestrate su enormi quantità di contenuti digitali (parole, immagini, suoni), sono in grado di creare nuovi output, come testi, immagini, audio o video, in risposta agli input degli utenti.

L'IA va considerata come un ecosistema ampio e spesso interconnesso di piattaforme e applicazioni, progettate per essere utilizzate dagli studenti, o a supporto del lavoro degli insegnanti o per far interagire tra loro "amici" e "compagni virtuali" (Box 1).

La perfetta integrazione dell'IA in più piattaforme digitali rende sempre più labile il confine tra tecnologia didattica, amicizia, ricerca di informazioni e intrattenimento.

Giochi, come Roblox 2025a e Roblox 2025b, incentrati sulle discipline STEM, non sono semplici giochi, ma strumenti che potenziano le competenze scientifiche, tecnologiche e di progettazione.

<sup>3</sup> J. Reich, *A Guide to AI in Schools: Perspectives for the Perplexed*, MIT Teaching Systems Lab, 2025.

<sup>4</sup> M. West, *An ed-tech tragedy? Educational technologies and school closures in the time of COVID-19*, UNESCO, 2023 (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386701>).

<sup>5</sup> R. Jain, S. Stemper, *3G internet and human capital development*, University of Zurich Department of Economics, Working Paper No. 453, 2024 (<https://www.ictworks.org/wp-content/uploads/2025/07/3G-use-reducestest-score.pdf>).

<sup>6</sup> J. Hardman, R. Atkinson, L. Meyer, *Technology and learning: Designing for impact*, Routledge, 2019.

Gli appunti delle lezioni caricati su Google NotebookLM servono per creare flashcard, con cui prepararsi ai test. Tramite i social media l'IA diventa uno strumento quotidiano accessibile a tutti.

### Box 1 - Tipologie di strumenti e di piattaforme di IA comunemente utilizzati

*Strumenti per la produttività e la pianificazione degli insegnanti:* piattaforme come Gradescope, MagicSchool e Notion.ai, che automatizzano la valutazione e il feedback, generano materiali per lezioni e verifiche allineati agli standard, producono risorse differenziate e assistono nella documentazione.

*Sistemi adattivi e di apprendimento rivolti agli studenti:* piattaforme come MATHia, Knewton Alta e DreamBox, che personalizzano l'apprendimento analizzando in tempo reale le risposte degli studenti, regolando il livello di difficoltà dei contenuti, individuando le misconcezioni e fornendo feedback mirati per colmare le lacune.

*IA generativa di uso generale:* come ChatGPT, Claude e Gemini, strumenti versatili per facilitare i compiti e migliorare l'efficienza (Quezzaire, 2025<sup>7</sup>; Kestin et al., 2025<sup>8</sup>). Questi stessi strumenti possono essere utilizzati per redigere piani di lezione, progettare valutazioni e creare materiali didattici o quale supporto alla ricerca, alla scrittura, alla programmazione e alla comprensione concettuale in diversi ambiti.

*Piattaforme di compagnia:* come Character.ai e Replika.ai, che offrono agli utenti "compagni" o "amici" basati sull'IA, simulando conversazioni o interazioni continuative. Sono progettati per massimizzare il coinvolgimento e prolungare il tempo trascorso sulla piattaforma.

*Strumenti accademici e specialistici per dominio:* Piattaforme specifiche per supportare l'apprendimento in ambiti particolari; tra questi Duolingo per l'acquisizione linguistica, Photomath per la risoluzione di problemi matematici e GitHub Copilot per la programmazione e i compiti computazionali.

*Sistemi di IA istituzionali e amministrativi:* come Civitas Learning, PowerSchool o PraxiSchool, utilizzati da scuole o ministeri per l'analisi predittiva, il monitoraggio delle presenze o i sistemi di allerta precoce.

*Tecnologie assistive potenziate dall'IA:* strumenti che supportano l'accessibilità, come il riconoscimento vocale (speech-to-text) di Otter.ai, la sintesi vocale (text-to-speech) o la traduzione in tempo reale, come Microsoft Translator e Seeing AI.



<sup>7</sup> P. Quezzaire, *A Frank Chat (Bot) with AI: Using AI for Genuine Inquiry*. Webinar. International Baccalaureate Exchange Community Events, 2025, April 14 (<https://events.zoom.us/j/8123456789>).

<sup>8</sup> G. Kestin, K. Miller, A. Klales, T. Milbourne, G. Ponti, AI tutoring outperforms in-class active learning: An RCT introducing a novel research-based design in an authentic educational setting, *Scientific Reports*, 2025, 15(1), Articolo 17458 (<https://doi.org/10.1038/s41598-025-97652-6>).

### 3. Intelligenza artificiale: un vantaggio per gli insegnanti?

Un sondaggio interno condotto da Brookings<sup>9</sup> su 303 insegnanti negli Stati Uniti e in India ha rivelato diversi livelli di adozione dell'IA. Il 27% si è descritto come “all’inizio dell’esplorazione”, il 37% ha riferito di “aver provato alcune cose”, il 34% ha indicato di “integrare regolarmente” l'IA nella pratica, il 24% ha riferito di creare attività specifiche di IA e il 17% ha descritto la formazione o il supporto ai colleghi insegnanti nell’uso dell’IA. Solo il 3% ha riferito di non utilizzare l’IA.

Si è osservata inoltre una progressione nella sua adozione: dalla comprensione iniziale, all’uso meccanico fino all’integrazione e al perfezionamento.

Circa le più frequenti tipologie di utilizzo, queste riguardano la predisposizione di e-mail ai genitori, la valutazione e i feedback, la traduzione di materiali, la creazione di rubriche, quiz e piani di lezione, lo sviluppo di contenuti, il tutoraggio degli studenti, la creazione di piani educativi personalizzati, l’automazione della valutazione dei compiti e la verifica dell’autenticità dei lavori (Ferman et al., 2021).<sup>10</sup>

Altri studi (Roy et al., 2024)<sup>11</sup> hanno rivelato che l’utilizzo di ChatGPT per la preparazione delle lezioni ha comportato una riduzione del 31% del tempo impiegato, senza compromissione della qualità.

Il tempo risparmiato può così essere utilizzato per attività più complesse, come la costruzione di relazioni interpersonali con gli studenti, le attività non direttamente rivolte ai ragazzi, quali l’ampliamento delle personali conoscenze disciplinari e didattiche, gli interventi mirati e personalizzati.

In alcuni contesti particolarmente complessi, dove maggiore è il bisogno di interventi educativi di alta qualità e maggiore l’impegno richiesto agli insegnanti, l’alleggerimento del carico di lavoro può prevenire situazioni di burnout, causa rilevante dell’abbandono della professione (Steiner et al., 2023).<sup>12</sup>

### 4. L’Intelligenza artificiale a beneficio delle disabilità

A livello globale, oltre 2,5 miliardi di persone, tra cui bambini e adulti, necessitano di dispositivi assistivi come sedie a rotelle, apparecchi acustici o app, che supportano la comunicazione e le funzioni cognitive.

Quasi un miliardo di persone non ha però accesso a tali dispositivi, in particolare nei paesi a basso e medio reddito, dove la disponibilità soddisfa solo il 3% del fabbisogno (Organizzazione Mondiale della Sanità UNICEF, 2022).<sup>13</sup> L’IA offre soluzioni promettenti per colmare questo divario di accessibilità attraverso applicazioni che vanno dalle valutazioni adattive a meccanismi di erogazione innovativi.

I chatbot sociali o compagni artificiali, inclusi chatbot di compagnia e di supporto emotivo, intrattengono conversazioni empatiche con gli esseri umani, incorporando deliberatamente caratteristiche antropomorfe per promuovere lo sviluppo delle abilità sociali.

Queste applicazioni sono risultate particolarmente attraenti per gli individui con disturbo dello spettro autistico (DSA), che sperimentano difficoltà sociali significative e hanno meno amicizie rispetto ai coetanei con sviluppo tipico. Chatbot online, simulando scenari di comunicazione della vita reale,

<sup>9</sup> La *Brookings Institution* è un’organizzazione di ricerca non profit con sede a Washington D.C., dedicata all’analisi delle politiche pubbliche. Fondata nel 1916, è considerata uno dei centri studi più influenti al mondo nei settori dell’economia, della governance e della politica estera.

<sup>10</sup> B. Ferman, L. Lima, F. Riva, *Artificial Intelligence, Teacher Tasks and Individualized pedagogy*, SocArXiv. Center for Open Science, 2021 (<https://ideas.repec.org/p/osf/socarx/qw249.html>).

<sup>11</sup> P. Roy, H. Poet, R. Staunton, K. Aston, D. Thomas, *ChatGPT in lesson preparation: A teacher choices trial*, National Foundation for Educational Research, 2024 (<https://www.nfer.ac.uk/publications/chatgpt-in-lesson-preparation-a-teacher-choices-trial/>).

<sup>12</sup> E. D. Steiner, A. Woo, S. Doan, *All work and no pay—Teachers’ perceptions of their pay and hours worked: Findings from the 2023 State of the American Teacher Survey*, RAND Corporation, 2023 (<https://doi.org/10.7249/RR1108-9>).

<sup>13</sup> *Global Report on Assistive Technology (GrEAT)*, pubblicato nel 2022 dall’Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e dall’UNICEF, è il primo documento di portata mondiale che analizza il bisogno e l’accesso alle tecnologie assistive (TA).

forniscono uno spazio sicuro per esercitarsi nelle interazioni senza il rischio di essere giudicati o rifiutati (Franze et al., 2023;<sup>14</sup> Ali et al. 2023;<sup>15</sup> Zhao et al., 2025<sup>16</sup>).

La tecnologia può essere utile anche per gli studenti con dislessia, che costituiscono circa il 15-20% della popolazione mondiale. Senza un supporto adeguato, notevoli sono le difficoltà di apprendimento, dovute a confusione nell'ordine delle lettere, nella lettura lenta, nella scrittura a mano e nell'elaborazione fonologica.

Trackball adattate e tastiere alternative aiutano gli studenti con disabilità motorie; lettori di schermo come JAWS (Job Access With Speech), libri parlanti digitali e software di sintesi vocale assistono gli studenti ipovedenti; app di comunicazione, sintetizzatori vocali e risorse per la lingua dei segni aiutano gli studenti che non sono in grado di usare il linguaggio verbale.

## 5. Si può parlare di intelligenza?

Sebbene i sistemi di IA generino risposte che spesso appaiono intelligenti e contestualmente appropriate, i loro output derivano da sofisticati meccanismi statistici di riconoscimento di schemi, piuttosto che da una conoscenza autentica o da un vero ragionamento creativo (Kleiman & Gallagher, 2024).<sup>17</sup>

Se da un lato l'IA è molto più avanzata degli esseri umani nei calcoli, dall'altro, almeno allo stato attuale, rimane meno competente in abilità come la flessibilità cognitiva e la pianificazione a lungo termine in situazioni nuove (Cukurova, 2024).<sup>18</sup>

L'IA rappresenta infatti una conoscenza priva di esperienza e non può sostituire l'ampia gamma di esperienze e interazioni umane (Kleiman & Gallagher, 2024),<sup>19</sup> una distinzione questa che ha profonde implicazioni sulla pratica educativa, ma anche sulla vita futura dei cittadini, indipendentemente dall'età e dal livello sociale.

Da varie ricerche condotte, inoltre, si evince una scarsa consapevolezza dei genitori e dei caregiver sulla gamma di vantaggi e rischi che l'IA comporta per l'apprendimento e lo sviluppo dei figli, come pure sull'importanza di prepararsi a un suo utilizzo competente.

Ancora limitate, infatti, sono le attività di sensibilizzazione o alfabetizzazione fornite alle famiglie e alle organizzazioni sociali che si prendono cura dei bambini e dei ragazzi, anche se, in alcuni contesti, questa alfabetizzazione sembra essere desiderata e auspicata.

## 6. Rischi dell'Intelligenza artificiale

Come già detto, l'utilizzo non corretto della IA può ostacolare lo sviluppo cognitivo e sociale, può alterare il processo di attaccamento figlio-genitore, può deprimere gli sforzi e le fatiche che aiutano a crescere.

Qualcuno ha definito l'AI il fast food dell'istruzione,<sup>20</sup> uno strumento che non fa utilizzare il cervello.

<sup>14</sup> A. Franze, C. R. Galanis, D. L. King, Social chatbot use (e.g., ChatGPT) among individuals with social deficits: Risks and opportunities, *Journal of Behavioral Addictions*, 2023, **12**(4), 871-872 (<https://doi.org/10.1556/2006.2023.00057>).

<sup>15</sup> F. Ali, Q. Zhang, M. Z. Tauni, K. Shahzad, Social chatbot: My friend in my distress, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2024, **40**(7), 1702-1712 (<https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2150745>).

<sup>16</sup> S. Zhao, S. C. Xiong, B. Pang, X. Tang, P. He, Let AI read first: Enhancing reading abilities for individuals with dyslexia through artificial intelligence, *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2025, 1-16 (<https://doi.org/10.1145/3706599.3720113>).

<sup>17</sup> G. M. Kleiman, H. A. Gallagher, *State education policy and the new artificial intelligence*. National Association of State Boards of Education, 2024 (<https://www.nasbe.org/state-education-policy-and-the-new-artificial-intelligence/>).

<sup>18</sup> M. Cukurova, The interplay of learning analytics and artificial intelligence in education: A vision for hybrid intelligence, *British Journal of Educational Technology*, 2024, **56**(2), 469-488.

<sup>19</sup> G. M. Kleiman, H. A. Gallagher, *State education policy and the new artificial intelligence*. National Association of State Boards of Education (NASBE), 2024 (<https://www.nasbe.org/state-education-policy-and-the-new-artificial-intelligence/>).

<sup>20</sup> Si tratta di una metafora critica che è diventata virale tra la fine del 2024 e l'inizio del 2026 nel dibattito pedagogico.

Jonathan Haidt<sup>21</sup> ha sottolineato i rischi che si verificano nell'uso dei social media e degli smartphone, rischi estendibili alla stessa AI, che hanno portato gli adolescenti a ridurre drasticamente i contatti reali a vantaggio di quelli virtuali con conseguente incremento dei così detti disturbi internalizzanti: ansia, depressione, atti autolesionistici, suicidi.

Lo sviluppo cognitivo, definito come “la crescita e la maturazione dei processi di pensiero di ogni tipo, tra cui la percezione, la memoria, la formazione di concetti, la risoluzione di problemi, l'immaginazione e il ragionamento” (American Psychological Association, 2018), può subire un declino a causa di una sempre maggior dipendenza dall'AI. Si potrebbe infatti creare un circolo virtuoso rinforzante: si ottengono risultati positivi con risparmio di impegno e di fatica mentale, che portano a proseguire nel vantaggio percepito.

Se le persone adulte e i professionisti, attraverso l'uso dell'intelligenza artificiale, possono accelerare i processi di lavoro, ampliare le conoscenze e favorire il progresso nei diversi ambiti della ricerca, come avvenuto, ad esempio, nel campo della salute pubblica, dove l'AI ha permesso di identificare precocemente la presenza di virus nelle acque reflue, contribuendo alla prevenzione di epidemie (Zhuang et al., 2025),<sup>22</sup> o in ambito medico, in cui la mappatura delle proteine umane ha reso possibili nuovi trattamenti terapeutici (Tunyasuvunakool et al., 2021),<sup>23</sup> la situazione appare differente quando a utilizzare l'AI sono giovani e bambini. Questi ultimi, infatti, non dispongono ancora di quella flessibilità cognitiva, maturata attraverso l'esperienza, che consente di orientarsi criticamente tra le informazioni, valutarle, assimilarle, modificarle o rifiutarle consapevolmente.

Un eccessivo affidamento all'AI ha portato molti studenti a una progressiva “dissociazione” dal proprio lavoro scolastico, manifestata nella riduzione della presa di appunti, nella mancata esecuzione delle letture assegnate, o persino nella diminuzione dell'attenzione durante le lezioni.

L'efficienza dell'AI, intesa come rapidità e sostituzione delle attività cognitive, può così favorire il disimpegno, limitare i processi di apprendimento e demotivare gli studenti, incidendo negativamente sull'autostima e sul senso di orgoglio derivante da un lavoro svolto in modo personale e autonomo (Anderson e Winthrop, 2025).<sup>24</sup>

È stato segnalato inoltre il fenomeno della “amnesia indotta dal digitale” (Lee et al., 2025),<sup>25</sup> per cui gli studenti faticano a ricordare informazioni da loro stessi precedentemente prodotte o condivise online, evidenziando significative carenze nei processi di memorizzazione (Sparrow et al., 2011).<sup>26</sup> Non mancano poi studi che evidenziano un declino nella padronanza dei contenuti, nella lettura e nella scrittura (Thompson, 2025).<sup>27</sup>

Maryanne Wolf, in *Reader, Come Home* (2018),<sup>28</sup> sottolinea che la capacità dell'IA di sintetizzare letture di lunga durata, indebolisce la “pazienza cognitiva” e la lettura approfondita, ovvero la capacità di mantenere l'attenzione concentrata su idee complesse, con compromissione della comprensione.

<sup>21</sup> J. Haidt, *La generazione ansiosa*. Rizzoli, 2024.

<sup>22</sup> X. Zhuang, M. Van Vo, M. A. Moshi, et al., Early detection of emerging SARS-CoV-2 variants from wastewater through genome sequencing and machine learning, *Nature Communications*, 2025, **16**(1), Articolo 6272 (<https://doi.org/10.1038/s41467-025-61280-5>).

<sup>23</sup> K. Tunyasuvunakool, J. Adler, Z. Wu, et al., Highly accurate protein structure prediction for the human proteome. *Nature*, 2021, **596**(7873), 590-596 (<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03828-1>).

<sup>24</sup> J. Anderson, R. Winthrop, *The disengaged teen: Helping kids learn better, feel better, and live better*, Penguin Random House, 2025.

<sup>25</sup> H. P. Lee, S. Advait, L. Tankelevitch, et al., The impact of generative AI on critical thinking: Self-reported reductions in cognitive effort and confidence effects from a survey of knowledge workers, In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Articolo 1121, pp. 1-22), Association for Computing Machinery.

<sup>26</sup> B. Sparrow, J. Liu, D. M. Wegner, Google effects on memory: Cognitive consequences of having information at our fingertips, *Science*, 2011, **333**(6043), 776-778 (<https://doi.org/10.1126/science.1207745>).

<sup>27</sup> D. Thompson, *The End of Thinking*, Derek Thompson (blog), 2025, July 9 (<https://www.derekthompson.org/p/the-end-of-thinking>).

<sup>28</sup> M. Wolf, *Reader, Come Home: The Reading Brain in a Digital World*, Harper Collins Publishers, 2018.

Anche la scrittura, con la sua doppia natura di atto privato e pubblico, cognitivo e socioculturale, riflessivo e comunicativo, è fondamentale per l'apprendimento e la formazione delle idee (Epstein, 2025).<sup>29</sup> Attraverso di essa si sviluppano la creatività, l'immaginazione, il pensiero critico, la retorica. Scarse capacità di scrittura ostacolano l'apprendimento in tutte le materie e nella vita quotidiana e possono limitare il futuro successo professionale (Graham, 2019).<sup>30</sup>

## 7. Conclusione

La portata, gli effetti e le conseguenze dell'Intelligenza artificiale sono difficili da comprendere, interpretare e valutare.

Agli indubbi aspetti positivi si contrappongono rischi, limitazioni, naufragi cognitivi e possibili forme di dipendenza e disumanizzazione.

Ignorarla non è e non sarà possibile; sta a noi saperla integrare nella prassi tradizionale, adottarla in modo critico, affinché amplifichi e non sostituisca il potenziale umano.

La conoscenza resta, anche in questo caso, il presupposto indispensabile per compiere scelte responsabili e consapevoli, libere da mode e condizionamenti, e può evitare che si realizzi quanto Stanley Kubrick ha rappresentato nel film "2001: Odissea nello spazio".<sup>31</sup>

---

<sup>29</sup> K. Epstein, We, Robots. Persuasion (blog), 2025, January 13 (<https://www.persuasion.community/p/we-robots>).

<sup>30</sup> S. Graham, Changing How Writing Is Taught, *Review of Research in Education*, 2019, **43**(1), 277-303 (<https://doi.org/10.3102/0091732X18821125>).

<sup>31</sup> *2001: Odissea nello spazio*, film di Stanley Kubrick del 1968, esplora il rapporto tra l'uomo e la tecnologia, mettendo in scena i rischi di una delega incontrollata dell'intelligenza e delle decisioni umane alle macchine.



# Carcinoma mammario: tra prevenzione e ricerca

Emine Tasan

*Dipartimento di Farmacia e Scienze della Salute e della Nutrizione,  
Università della Calabria*  
e-mail: emine.tasan@unical.it

---

**Abstract.** Imagine a woman touching her breast and discovering a small lump. Behind that simple gesture, there is a world of science, prevention and courage. Breast cancer is the most commonly diagnosed cancer in women worldwide. Addressing risk factors, such as obesity, and adopting a healthy lifestyle are key strategies to prevent this disease. Epidemiological studies have shown that obesity significantly increases the modifiable risk of developing breast cancer, particularly after menopause, when adipose tissue becomes a real source of estrogen, which promotes the development of some forms of cancer. But this story must also be linked to the hard work of women scientists who, defying all barriers and prejudices, have given great help to research and treatment. They have demonstrated that being a woman and a scientist is not an exception, but a valuable force for progress. This article aims to offer a reflection on researchers who have dedicated themselves to ambitious projects channelling their passion at the service of science and women's health and well-being.

**Keywords:** carcinoma; prevenzione; rischio

---

## 1. Il carcinoma mammario: prevenzione e rischio

Il carcinoma mammario rappresenta da sempre una delle più grandi sfide della medicina moderna. Sebbene la scienza abbia compiuto progressi straordinari nella diagnosi e nel trattamento di questa malattia, resta fondamentale diffondere una cultura della prevenzione e della consapevolezza. Parlare di tumore al seno oggi significa affrontare non solo aspetti clinici, ma anche questioni sociali e culturali: dall'importanza dei corretti stili di vita, come il controllo del peso, fino al riconoscimento del ruolo delle donne nella ricerca scientifica.

Il carcinoma mammario è un tumore che colpisce principalmente le ghiandole mammarie e, se diagnosticato precocemente, può essere trattato con successo. Infatti, negli ultimi decenni i progressi nella ricerca e nella medicina hanno reso il carcinoma mammario sempre più trattabile, con terapie mirate e meno invasive rispetto al passato. Le nuove possibilità di cura, insieme a un miglioramento della consapevolezza e alla diffusione degli screening, hanno aumentato significativamente la sopravvivenza delle donne [1]. Nonostante l'incremento dei casi, in Italia l'88% delle donne è ancora viva a 5 anni dalla diagnosi [2]. Questo dato incoraggiante stimola una continua ricerca per migliorare diagnosi, prevenzione e terapie. L'incremento della diagnosi precoce e la crescente consapevolezza della malattia hanno migliorato notevolmente le possibilità di trattamento e guarigione. Le donne sono sempre più attente a eventuali cambiamenti nel proprio corpo e ai segnali del tumore al seno. Il 90% delle masse mammarie è di natura benigna, come fibroadenomi, cisti e alterazioni fibrocistiche [3]. I tumori al seno possono presentarsi come:

- un nodulo al seno e/o ascellare che può avere caratteristiche dure, immobili, irregolari o fisse;
- gonfiore del seno o cambiamenti di forma e dimensioni;
- cambiamenti della pelle tra cui eritema, fossette, vaiolatura, ulcerazione e pelle a buccia d'arancia;
- modifiche del capezzolo come inversione, alterazioni della pelle o secrezioni [4].

Sebbene estremamente comune, il dolore al seno senza altri segni è raramente indice del cancro al seno [5].

Dal punto di vista istologico, i carcinomi si dividono principalmente in due categorie: duttali e lobulari, a seconda dell'area della ghiandola interessata. A loro volta, possono essere "in situ" (non invasivi) o "infiltranti" (invasivi) ed esistono anche forme più rare con caratteristiche morfologiche specifiche [6]. Per classificare, invece, l'estensione della malattia, si utilizza il sistema TNM (Tumore, Linfonodi, Metastasi), che definisce lo stadio del tumore [7]. Gli stadi variano da Tis (tumore in situ) a IV (presenza di metastasi a distanza), e guidano le scelte terapeutiche [8] che includono:

- *chirurgia*, che rappresenta il trattamento principale nelle fasi iniziali; in queste situazioni, la malattia può essere potenzialmente curabile [9];
- *radioterapia*, che agisce sia direttamente, danneggiando il DNA delle cellule tumorali, sia indirettamente, generando specie reattive dell'ossigeno (ROS) che alterano le funzioni cellulari [10];
- *chemioterapia*, che utilizza farmaci citotossici per eliminare o ridurre il tumore, alleviare i sintomi e prolungare la sopravvivenza [11];
- *terapia endocrina*, che blocca l'azione degli ormoni estrogeni nei tumori recettori-positivi [12, 13];
- *terapie mirate*, che agiscono in particolare contro il recettore HER2, la cui attivazione promuove la proliferazione cellulare attraverso vie di segnalazione intracellulari; le terapie mirate bloccano questi meccanismi, contrastando la progressione del tumore [14].

La progressione del tumore non dipende esclusivamente dalle caratteristiche intrinseche delle cellule tumorali, ma è anche fortemente influenzata dalle interazioni che queste instaurano con lo stroma circostante, ovvero il microambiente tumorale. Quest'ultimo gioca un ruolo cruciale nel favorire la crescita, l'invasione e la metastasi del tumore, creando un contesto in cui le cellule tumorali possono prosperare e adattarsi anche a condizioni ambientali sfavorevoli [15, 16]. Le cellule tumorali non esistono in isolamento; al contrario, sono immerse in un microambiente altamente dinamico che include diverse cellule stromali come adipociti, fibroblasti, cellule endoteliali e cellule immunitarie, e una matrice extracellulare che fornisce supporto strutturale e segnalazioni biochimiche essenziali. Queste cellule stromali interagiscono con le cellule tumorali, promuovendo la loro crescita attraverso segnali chimici e fisici [17].

Uno degli aspetti più studiati negli ultimi anni è il legame tra obesità e carcinoma mammario, che ha rivelato come gli adipociti, presenti nel microambiente tumorale, attraverso la secrezione di adipochine e altri mediatori favoriscano la crescita, l'invasione e la metastasi del tumore, creando un contesto favorevole che supporta l'adattamento delle cellule tumorali alle condizioni ambientali sfavorevoli. Il grasso corporeo, infatti, non è solo una riserva energetica, ma è anche un tessuto metabolico attivo che produce ormoni e adipochine, molecole che possono influenzare la crescita dei tumori. In particolare, l'obesità cronica è associata a un'infiammazione costante nei tessuti, che può stimolare la formazione e la progressione dei tumori. Questo legame è ancora oggetto di approfondite ricerche, ma è ormai noto che le donne obese corrono un rischio maggiore di sviluppare carcinoma mammario, soprattutto dopo la menopausa, quando il tessuto adiposo diventa una fonte primaria di estrogeni [18, 19]. Queste alterazioni aiutano il tumore a crescere più velocemente, a diffondersi e, purtroppo, a rispondere meno bene alle terapie. Le donne obese con carcinoma mammario hanno spesso una prognosi meno favorevole: il rischio di recidiva o di metastasi è maggiore, così come le difficoltà a tollerare alcuni trattamenti [20].

Per fortuna, anche se l'obesità è un importante fattore di rischio, esistono delle misure preventive. La prevenzione primaria del carcinoma mammario include strategie per ridurre l'esposizione ai fattori di rischio noti, tra cui l'obesità, la sedentarietà, il consumo di alcol e il fumo. Mantenere un peso corporeo sano e praticare attività fisica regolare sono considerati strumenti chiave per ridurre il rischio di sviluppare il carcinoma mammario [21]; anche un'alimentazione, ricca di frutta, verdura e fibra, associata a un basso consumo di grassi saturi, è stata associata a un rischio ridotto di sviluppare il carcinoma mammario [22].

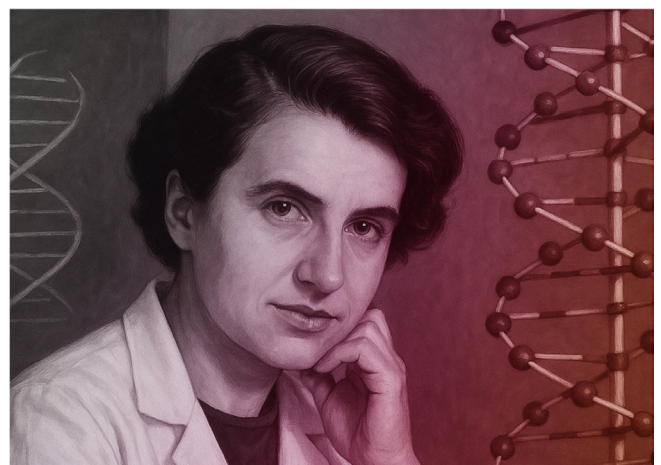
La prevenzione secondaria si concentra sulla diagnosi precoce attraverso screening regolari, come la mammografia, che può rilevare il tumore prima che compaiano segni evidenti. La mammografia è raccomandata per le donne di età compresa tra i 50 e i 69 anni, con intervalli biennali, ma potrebbe

essere indicata anche per donne più giovani con fattori di rischio elevati [23]. Inoltre, per le donne ad alto rischio, come quelle portatrici di mutazioni nei geni BRCA1 o BRCA2, è raccomandata la sorveglianza intensiva, che può includere mammografie annuali, risonanza magnetica (RM) e, in alcuni casi, interventi preventivi come la mastectomia profilattica [24]. Le terapie ormonali preventive, come il tamoxifene, sono anche utilizzate per ridurre il rischio di carcinoma mammario nelle donne ad alto rischio [25].

Per questo la prevenzione non può essere solo una corsa contro il tempo per scoprire il tumore quando è già presente, ma deve cominciare molto prima, curando ogni giorno il nostro corpo come si farebbe con un giardino: scegliendo i giusti “semi” (una dieta sana), togliendo le “erbacce” (le abitudini dannose) e irrigandolo con costanza (l’attività fisica). Controllare il peso corporeo e seguire abitudini di vita salutari sono scelte tangibili che possono effettivamente abbassare il rischio di insorgenza del carcinoma mammario. Investire nella prevenzione significa, quindi, investire nella nostra salute futura e anche nel futuro delle nuove generazioni, educandole fin da subito all’importanza di ascoltare e proteggere il proprio corpo.

Durante questo percorso, il ruolo della donna nel campo scientifico diventa ancora più significativo. Le donne scienziate, con la loro determinazione e il loro sguardo attento, hanno dato — e continuano a dare — contributi essenziali nella comprensione dei tumori, nella promozione della prevenzione e nell’innovazione terapeutica. Non si tratta solo di numeri o statistiche: si tratta di donne che studiano per altre donne, di vite che cambiano grazie alla passione, al coraggio e alla competenza di chi ha scelto di dedicare la propria carriera alla ricerca.

Oggi più che mai è fondamentale valorizzare queste figure, offrendo loro spazio, riconoscimento e opportunità. Perché sostenere le donne nella scienza significa non solo dare voce al talento, ma anche costruire una medicina più vicina alle persone, più attenta ai bisogni reali, più umana. Purtroppo, sebbene le donne abbiano dato un apporto fondamentale alla scienza, spesso sono rimaste nell’ombra, con pochi riflettori puntati su di loro. Eppure, scienziate come Mary-Claire King (Figura 1, sinistra), genetista statunitense che ha scoperto il gene BRCA1, è stata fondamentale per la comprensione ereditaria del carcinoma mammario e ovarico [26]. Il suo lavoro ha rivoluzionato la diagnosi precoce e la prevenzione, salvando migliaia di vite. Ancora oggi, i test genetici basati sulle sue scoperte rappresentano uno degli strumenti più potenti nella lotta contro il tumore al seno. Non è solo una questione di scoperte scientifiche: la presenza delle donne nella ricerca porta una prospettiva più inclusiva, capace di considerare le differenze biologiche, ambientali e sociali che influenzano la salute. Anche il lavoro di Rosalind Franklin (Figura 1, destra) sulla struttura del DNA, purtroppo spesso ignorato, è stato essenziale per comprendere le basi genetiche del cancro e ha avuto un impatto duraturo sulla medicina e sulla vita di milioni di donne.



**Figura 1.** Mary-Claire King (sinistra) e Rosalind Franklin (destra)

Nonostante le difficoltà, queste scienziate ci ricordano quanto sia cruciale l'inclusione delle donne nel mondo della ricerca scientifica. Non solo perché il loro contributo è stato fondamentale, ma anche perché il mondo della scienza ha bisogno di tutte le voci per progredire. Le donne devono avere l'opportunità di portare il loro talento, la loro intelligenza e la loro determinazione, contribuendo in maniera paritaria alla lotta contro il carcinoma mammario e altre malattie. Se, da un lato, è necessario un impegno costante nella ricerca, dall'altro è fondamentale che più ragazze si avvicinino alla scienza e comprendano che il loro futuro professionale può e deve essere anche nelle scienze biomediche, in medicina e nella ricerca.

La scienza, infatti, non ha genere: è attraverso la parità di accesso alle ricerche scientifiche che potremo ottenere un vero progresso. Con il lavoro delle scienziate, la lotta contro il carcinoma mammario diventa non solo una questione di salute, ma anche di opportunità, inclusività e giustizia.

## 2. Conclusione

Il carcinoma mammario, sebbene rappresenti una delle principali cause di morte tra le donne, ha visto progressi significativi grazie alla ricerca e alla diagnosi precoce. Questo tipo di tumore si origina principalmente dalle cellule delle ghiandole mammarie e può manifestarsi in varie forme istologiche, tra cui i carcinomi duttali e lobulari, che a loro volta possono essere invasivi o non invasivi. La sua natura biologica e clinica può variare considerevolmente da un caso all'altro, rendendo ogni diagnosi un aspetto fondamentale per l'individuazione del trattamento più efficace. L'aumento dei casi nelle società moderne è legato a vari fattori, tra cui lo stile di vita e l'obesità, che si confermano come fattori di rischio importanti per lo sviluppo della malattia. Nonostante l'incidenza crescente, possibilità di cura e sopravvivenza delle pazienti sono migliorate notevolmente grazie all'introduzione di trattamenti mirati, come le terapie ormonali e le terapie biologiche.

Comunque, la prevenzione rimane uno degli strumenti più potenti nella lotta contro il carcinoma mammario, con l'importanza cruciale di programmi di screening e di educazione alla salute. In questo contesto, il ruolo delle donne scienziate è fondamentale. Le donne hanno contribuito in modo significativo alla ricerca e al miglioramento delle terapie, ma c'è ancora molto lavoro da fare per garantire una piena inclusività e uguaglianza di opportunità nella scienza. Promuovere la figura della donna scienziate, riconoscendo e valorizzando il suo contributo, è essenziale per continuare a fare progressi nella cura del carcinoma mammario e nella ricerca in generale.

Per affrontare efficacemente questo argomento non solo bisogna intervenire sul piano clinico, ma anche agire sul fronte della conoscenza e della prevenzione, fin dalle età più giovani. La scuola, in questo senso, può e deve diventare un luogo importante per promuovere una maggiore consapevolezza sui temi della salute, dell'alimentazione, dell'attività fisica e della prevenzione delle malattie per sensibilizzare sempre di più le ragazze e i ragazzi.

Educare le/i giovani a conoscere il proprio corpo, le malattie, a comprendere i fattori di rischio e a riconoscere l'importanza della ricerca scientifica significa costruire una società più responsabile e informata. Parlare di tumori, di corretti stili di vita e del contributo fondamentale della scienza – e delle donne nella scienza – non solo favorisce la prevenzione, ma stimola una coscienza critica e una cultura della salute che durerà nel tempo.

La scienza, dunque, non è distante dalla quotidianità: entra nelle aule scolastiche come strumento di crescita personale e collettiva, capace di guidare comportamenti consapevoli e di ispirare ragazze e ragazzi- e ricercatrici e ricercatori – del futuro.

## Riferimenti bibliografici

- [1] L. C. Hartmann, T. A. Sellers, M. H. Frost, et al., Benign breast disease and the risk of breast cancer, *New England Journal of Medicine*, 2005, **353**(3), 229-237.
- [2] Fondazione AIOM, AIRTUM, Centro Nazionale di Prevenzione delle Malattie e Promozione della Salute, *I numeri del cancro in Italia*, Intermedia editore, 2020.
- [3] Organizzazione mondiale della sanità (OMS), 2021 (<https://www.biodiritto.org/Biolaw-pedia/Docs/Rapporto-OMS-2021-World-Health-Statistics-Monitoring-Health-for-the-Sustainable-Development-Goal>).

- [4] C. Katsura, I. Ogunmwonyi, H. K. Kankam, S. Saha, Breast cancer: presentation, investigation and management, *British Journal of Hospital Medicine*, 2022, **83**(2), 1-7.
- [5] M. M. Fonseca, L. R. Lamb, R. Verma, et al., (2019). Breast pain and cancer: should we continue to work-up isolated breast pain?, *Breast Cancer Research and Treatment*, 2019, **177**(3), 619-627.
- [6] S. R. Lakhani, I. O. Ellis, S. Schnitt, et al., *WHO Classification of Tumours of the Breast*, 2012 (<https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Who-Classification-Of-Tumours/WHO-Classification-Of-Tumours-Of-The-Breast-2012>).
- [7] J. D. Brierley, M. K. Gospodarowicz, C. Wittekind, *TNM. Classification des tumeurs malignes*, 2017 ([http://mom.gov.az/resources/content\\_files/ebook/TNM-Classification-of-Malignant-Tumours-8th-edition.pdf](http://mom.gov.az/resources/content_files/ebook/TNM-Classification-of-Malignant-Tumours-8th-edition.pdf)).
- [8] O. H. Beahrs, Staging of cancer of the breast as a guide to therapy, *Cancer*, 1984, **53**(S3), 592-594.
- [9] N. Harbeck, M. Gnant, Interpretation of the evidence for the efficacy and safety of statin therapy, *Lancet*, 2017, **389**(10074), 1134-1150.
- [10] O. A. Martin, R. F. Martin, Cancer radiotherapy: understanding the price of tumor eradication, *Frontiers in cell and developmental biology*, 2020, **8**, 261.
- [11] V. T. Devita, S. Hellman, S. A. Rosenberg (Eds.), *Cancer: principles and practice of oncology*, Lippincott Williams & Wilkins Publishers, 2001.
- [12] M. Giuliano, R. Schiff, C. K. Osborne, M. Trivedi, Biological mechanisms and clinical implications of endocrine resistance in breast cancer, *The Breast*, 2011, **20**, S42-S49.
- [13] M. Chang, Tamoxifen resistance in breast cancer, *Biomolecules & Therapeutics*, 2012, **20**(3), 256.
- [14] Y. Yarden, M. X. Sliwkowski, Untangling the ErbB signalling network, *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2001, **2**(2), 127-137.
- [15] D. Hanahan, R. A. Weinberg, Hallmarks of cancer: the next generation, *Cell*, 2011, **144**(5), 646-674.
- [16] J. A. Joyce, J. W. Pollard, Microenvironmental regulation of metastasis, *Nature Reviews Cancer*, 2009, **9**(4), 239-252.
- [17] D. F. Quail, J. A. Joyce, Microenvironmental regulation of tumor progression and metastasis, *Nature Medicine*, 2013, **19**(11), 1423-1437.
- [18] P. Mishra, D. Banerjee, A. Ben-Baruch, Chemokines at the crossroads of tumor-fibroblast interactions that promote malignancy, *Journal of Leukocyte Biology*, 2011, **89**(1), 31-39.
- [19] R. E. Coleman, W. Gregory, H. Marshall, et al., The metastatic microenvironment of breast cancer: clinical implications, *The Breast*, 2013, **22**, S50-S56.
- [20] M. Ewertz, M. B. Jensen, K. Á. Gunnarsdóttir, et al., Effect of obesity on prognosis after early-stage breast cancer, *Journal of Clinical Oncology*, 2011, **29**(1), 25-31.
- [21] M. Harvie A. Howell, Energy balance adiposity and breast cancer: impact of obesity and caloric intake on cancer risk and recurrence, *Future Oncology*, 2012, **8**(9), 999-1014.
- [22] G. Block, B. Patterson, A. Subar, Fruit, vegetables, and breast cancer risk: a review of the epidemiological evidence, *Nutrition and Cancer*, 1992, **18**(1), 1-29.
- [23] A. Bleyer, H. G. Welch, Effect of three decades of screening mammography on breast-cancer incidence, *New England Journal of Medicine*, 2012, **367**(21), 1998-2005.
- [24] K. Metcalfe, S. Gershman, H. T. Lynch, et al., Predictors of contralateral breast cancer in BRCA1 and BRCA2 mutation carriers, *British Journal of Cancer*, 2011, **104**(9), 1384-1392.
- [25] Cuzick J., et al., Overview of the main outcomes in breast-cancer prevention trials, *The Lancet*, 2003, **361**(9354), 296-300.
- [26] M. C. King, J. H. Marks, J. B. Mandell, Breast and ovarian cancer risks due to inherited mutations in BRCA1 and BRCA2, *Science*, 2003, **302**(5645), 643-646.



# I cent'anni della Meccanica Quantistica

## La relazione con i concetti classici della chimica e didattica

Giovanni Villani

*Coordinatore del Gruppo Tematico Epistemologia e Storia della Chimica della Società Chimica Italiana*

*e-mail: giovanni.villani@cnr.it*

---

**Abstract.** The United Nations General Assembly has designated 2025 as the “International Year of Quantum Science and Technology”. Quantum science, in fact, provides the foundation for basic research and the interpretation of the atomic/molecular world, and its beginning can be dated back to the works of Heisenberg and Pauli in 1925. The study of the molecular world, however, did not begin that year. Nineteenth-century chemists, in fact, developed useful concepts in this world and connected them to the macroscopic properties of chemical substances. In this educational paper, we intend to discuss the conceptual aspects and “open issues” of the relationship between quantum mechanics and the historical concepts of chemistry. Although this physical theory represented a revolutionary change in the study of the atomic/molecular world, it still struggles to gain traction in the educational and general/cultural contexts, both for “objective” reasons and due to the current lack of attention to the analysis of the conceptual/philosophical problems of this theory and their educational treatment.

**Keywords:** meccanica quantistica; rapporto con la chimica classica; didattica

---

### 1. Introduzione

È passato un secolo da quando la meccanica quantistica ha dispiegato le sue potenzialità nell'analizzare il mondo sub-microscopico della materia. Tale mondo è fondamentale per l'interpretazione chimica dell'universo che ci circonda. Alla nascita della meccanica quantistica ha concorso in maniera evidente lo studio dell'atomo e della sua struttura. Ben noti sono i modelli atomici di inizio Novecento che, a partire da Bohr, hanno introdotto la quantizzazione dell'energia nell'atomo. Ben presto, però, l'analisi dell'atomo come sistema di molti costituenti è stata affiancata dalla riflessione su cosa tenesse insieme un gruppo di atomi, formando una molecola.

La molecola, infatti, più ancora che l'atomo, era stato un problema difficilmente razionalizzabile nella scienza atomistica del XIX secolo. Un atomo nel senso letterale del termine, cioè un pezzo di materia dotato di massa, con o senza una sua propria forma specifica, ma “chiuso in sé stesso” faceva fatica a spiegare l'interazione con gli altri atomi e, ancora di più, l'interazione selettiva collegata alle affinità chimiche delle sostanze.

I fisici, fin dal XVII secolo, avevano relazionato l'interazione tra le particelle, e quindi anche quelle microscopiche tra gli atomi, a due concetti: quello di urto e quello di forza. Vi era, quindi, da un lato, una visione dell'interazione come istantanea e a contatto (urto) e, dall'altro lato, come permanente e dipendente dalla distanza, assimilata alla forza gravitazionale e/o elettrica. In quest'ultima visione, gli stessi atomi potevano essere “dematerializzati” a punti di forza dotati di massa [1]. I chimici, invece, da Dalton in poi, avevano concettualizzato gli atomi come particelle di materia, differenziate per massa (il cosiddetto “peso atomico”). La variazione del peso atomico degli elementi (e relativi atomi che li costituivano), tuttavia, appariva difficilmente spiegabile, non trovando delle facili regolarità: il peso atomico, infatti, non variava né linearmente né in forme più complesse ma razionalizzabili, come quella cubica che avrebbe relazionato il peso atomico al volume della particella. Vi era, poi, il problema della periodicità tra le proprietà chimiche degli elementi evidenziate

dalla Tavola Periodica di Mendeleev. Questi problemi erano impossibili da capire senza penetrare all'interno dell'atomo.

Dopo la scoperta dei componenti atomici, prima l'elettrone, poi il nucleo e, infine, la sua differenziazione in protoni e neutroni, il problema della struttura atomica non poteva più essere eluso. La soluzione trovata nel XX secolo ha fuso insieme l'immaterialità (punti di forza) dei fisici e la materialità (particella di materia) dei chimici in un mondo atomico duale, un'onda/particella sia per i costituenti atomici sia per l'intero atomo. Il concetto di molecola, invece, è stato definito come un gruppo di atomi con posizioni definite stabile dal punto di vista energetico.

Dopo cent'anni di meccanica quantistica, restano ancora da capire se e come alcune caratteristiche teoriche/generali di tale teoria fisica si possono rapportare ai concetti elaborati dalla tradizione chimica. Questo argomento è troppo vasto per essere analizzato in dettaglio in questo lavoro e, quindi, qui analizzeremo solamente come la visione quantistica fisica e chimica sviluppino il rapporto tra le caratteristiche degli enti atomici e quelli molecolari. Chiuderemo il lavoro con delle considerazioni didattiche su come e quando introdurre le problematiche quantistiche a scuola e all'università.

## 2. Dalle proprietà atomiche a quelle molecolari

In questo paragrafo cercheremo di dare una risposta su come la meccanica quantistica e la chimica classica connettono le proprietà atomiche a quelle molecolari e, quindi, dall'ente atomico a quello molecolare.

Per dare una risposta alla domanda sulla differente connessione tra le proprietà atomiche e quelle molecolari in questi due ambiti, dobbiamo ricordare il diverso significato che hanno le parti di un sistema per questi due ambiti scientifici. La meccanica quantistica è una teoria olistica, nel senso che vuole calcolare gli stati stazionari del sistema globale studiato e tali stati sono distribuiti su tutto il sistema e non identificano relazioni particolari tra i costituenti. Questo non significa, ovviamente, che sono stati globali distribuiti uniformemente su tutti i costituenti, ma i costituenti e i loro stati sono parti del tutto all'interno del sistema e non hanno più, quindi, una loro realtà indipendente. Anche quando tale teoria utilizza gli stati dei componenti per ottenere questi stati globali, come nella impostazione LCAO-MO degli stati elettronici molecolari, dove gli stati stazionari globali della molecola (molecular orbital, MO) sono una combinazione lineare degli orbitali dei componenti atomici (linear combination of atomic orbitals, LCAO), gli stati dei costituenti sono una delle possibili basi (in senso matematico) per la costruzione degli stati stazionari del sistema molecolare globale. Gli stati atomici (e, con essi, i relativi sistemi atomici) perdono all'interno della molecola qualsiasi significato "reale" e la loro combinazione (i coefficienti della combinazione lineare nell'approccio LCAO) servono solo come una possibile determinazione dello stato globale. Una qualsiasi altra base matematica, per esempio una distribuita equamente nello spazio molecolare, potrebbe svolgere lo stesso scopo. Ovviamente, dovendo descrivere sia gli elettroni interni, che restano vicino ai nuclei atomici anche nelle molecole, sia quelli di legami, distribuiti su tutto lo spazio molecolare, tale base necessiterebbe di più funzioni, alcune che restano essenzialmente localizzate intorno ai nuclei ed altre diffuse su tutto il sistema. La dimensione della base, cioè il numero di funzioni necessarie, in questo caso, sarebbe maggiore.

La chimica, invece, e quindi anche la chimica quantistica, ritiene che sia utile "connettere" gli stati molecolari e le relative proprietà agli stati atomi e alle proprietà degli atomi.<sup>1</sup> Questo non significa che il chimico quantistico ritenga che gli stati atomici continuino a esistere nella molecola. Avendo, tuttavia, come fine non solo quello di calcolare le proprietà molecolari, ma anche quello di "proiettarle" sugli atomi costituenti per consentire di comparare e raggruppare le molecole, ritiene che i costituenti (sia gli stati sia gli enti) continuino a essere essenziali.

<sup>1</sup> Tutte le teorie chimiche quantistiche, alcune esplicitamente e altre implicitamente, si pongono la problematica di trasformare le proprietà molecolari in proprietà atomiche. Teorie come QTAIM (Quantum Theory of Atoms in Molecules) ne sono un chiaro ed evidente esempio. Per un'introduzione a questa teoria si veda [https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527307486\\_c01.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527307486_c01.pdf).

L'importanza degli atomi nella molecola è evidenziata dalla formula chimica che ci dice che la molecola dell'acqua è formata da 2 atomi d'idrogeno e uno di ossigeno,  $H_2O$ . Va, tuttavia, precisato che per il chimico, sebbene usi gli stessi simboli (H e O), questo non significa che l'idrogeno e l'ossigeno nell'acqua siano uguali a quelli degli atomi isolati e neppure a quelli degli stessi atomi presenti in altre molecole: essi sono degli atomi *in situ*, cioè nelle condizioni specifiche della molecola [2]. Talvolta, questo viene evidenziato sovrascrivendo agli atomi delle cariche parziali ( $\delta^+$  e  $\delta^-$ ), ma anche quando non ci sono cariche parziali, come nella situazione degli elementi poliatomici, per esempio l'atomo d'idrogeno in  $H_2$  e quello di ossigeno in  $O_2$ , gli atomi costituenti una molecola sono diversi dagli atomi isolati.

Inoltre, possiamo dire che per la meccanica quantistica il concetto di molecola è meno rilevante che per la chimica. Consideriamo l'esempio di due isomeri e analizziamo la particella elementare di  $C_2H_6O$ . Per il chimico esistono due molecole,  $C_2H_5OH$  e  $CH_3OCH_3$ , ricollegabili alla formula bruta  $C_2H_6O$ : esse sono le particelle elementari di due sostanze molto differenti. La prima è l'alcol etilico, sostanza liquida a temperatura ambiente e che viene utilizzato, per esempio, per preparare le bevande alcoliche; la seconda è l'etere dimetilico, una sostanza gassosa a temperatura ambiente e tossico per l'uomo ed è "parente" del famoso etere (etere dietilico) che in passato veniva usato come anestetico (Figura 1). Tali molecole, quindi, corrispondono a due sostanze macroscopiche con proprietà molto differenti.



**Figura 1.** 30 marzo 1842: primo intervento chirurgico con l'uso dell'etere come anestetico

Nella descrizione quantistica di  $C_2H_6O$  si costruisce la superficie di energia potenziale multidimensionale di questo sistema e si nota che esistono due minimi molto marcati: uno relativo alla particella elementare con un atomo d'idrogeno vicino all'atomo d'ossigeno e un'altra senza questa particolarità. Notiamo che questo discorso può essere fatto solo nell'approssimazione di Born-Oppenheimer, quella che considera un approccio di meccanica classica per i nuclei atomici e ne fissa le posizioni. Tale approssimazione può essere evitata nella trattazione quantistica di qualche sistema molecolare semplice, ma, in questo caso, si accentuano i problemi con l'ottica chimica. Nella meccanica quantistica, infatti, i componenti atomici dello stesso tipo non possono essere differenziati. Non possiamo, per esempio, identificare differenti tipi di elettroni, neppure posizionandoli sugli atomi: quello sull'atomo 1, quello sull'atomo 2, eccetera, ma dobbiamo permutare tutti gli elettroni su tutti gli atomi per ottenere un solo tipo di elettrone. Se queste permutazioni venissero applicate anche agli atomi, nell'e-

sempio della molecola dell'alcol etilico non potremmo più distinguere differenti tipi di atomi d'idrogeno [3]. Per il chimico, invece, è essenziale distinguere tra i due i tipi di atomi d'idrogeno presente nell'alcol etilico ( $C_2H_5OH$ ): quelli legati agli atomi di carbonio da quello legato all'atomo di ossigeno. Non sarebbe, quindi, più possibile associare questa sostanza alla categoria degli alcoli per la presenza di un gruppo funzionale O-H [4].

L'esistenza all'interno della stessa molecola di più tipi di atomi dello stesso elemento, sebbene indicati con lo stesso simbolo, è essenziale per spiegare alcune proprietà delle sostanze chimiche e, in particolare, la loro reattività. Per esempio, la differenza di reattività tra gli eteri e gli alcoli, o quella tra gli eteri e i composti carbonilici nel caso di due tipi di atomi di ossigeno differenti all'interno della stessa molecola, è legata a specifici atomi nella molecola. Tutta la chimica organica, e buona parte della biochimica, utilizzano queste specificità.

Quindi, la sola prospettiva quantistica fisica risulta insufficiente in questi casi per importanti problematiche conoscitive della chimica perché essa deve rispondere a suoi interrogativi specifici, come quelli sulla reattività.

### 3. La trattazione quantistica delle reazioni chimiche: storia e prospettive

Dopo aver considerato come la fisica e la chimica quantistica trattano le proprietà delle molecole, andiamo a occuparci della proprietà di trasformazione delle molecole: le reazioni chimiche. Iniziamo con il guardare come la nascente meccanica quantistica fu collegata al problema storico dello studio delle reazioni chimiche. Fra il 1915 e il 1940 furono oggetto di un'intensa rielaborazione due gruppi di problemi riguardanti la trattazione teorica delle reazioni chimiche: il meccanismo delle reazioni, cioè l'identificazione di tutte le tappe dello svolgersi di una reazione chimica, e la natura dell'atto elementare della reazione [5, 6].

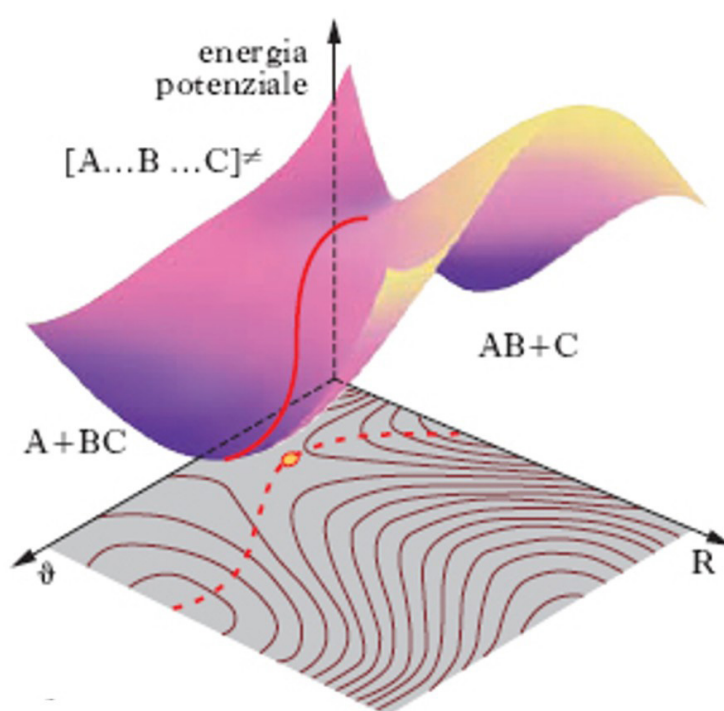
In questo contesto, vogliamo sottolineare un aspetto generale di filosofia della scienza poco noto, ma indicativo. Il concetto di meccanismo di reazione ha acquisito in questo inizio del XXI secolo un ruolo sempre più generale e importante nella spiegazione scientifica della realtà [7, 8]. All'articolo di Machamer, Darden e Craver intitolato *Thinking about mechanisms* è stata collegata la nascita di una nuova corrente filosofica, quella denominata *New mechanism philosophy*. Questa nuova corrente filosofica è nata da esempi di biologia e di neuroscienze (Machamer è un filosofo e storico della scienza, Darden una filosofa della biologia e Craven un filosofo delle neuroscienze), ponendo nessuna attenzione al concetto di meccanismo dei processi chimici utilizzato da un secolo dai chimici, come ha sottolineato il filosofo della chimica Robin Hendry nel suo lavoro sul meccanismo in chimica [9]. È, quindi, importante a nostro avviso che, chi si occupa di filosofia della chimica e del ruolo culturale che questa disciplina ha avuto (e ha) all'interno delle scienze naturali, rivendichi il ruolo che storicamente la chimica ha svolto nell'elaborazione del concetto di meccanismo di un processo. Nella chimica teorica attuale, l'approccio principale allo studio delle reazioni chimiche è la teoria dello stato di transizione (TST), anche nota come "Teoria della velocità assoluta di reazione" o "Teoria del complesso attivato", le cui radici risalgono all'inizio del Novecento.

La teoria statistica delle reazioni chimiche parte con il lavoro di Marcelin del 1915 [10]. È poi sviluppata principalmente da Eyring nel 1935 [11], per calcolare la "velocità assoluta di reazione" nelle reazioni bimolecolari, e da Evans e Polanyi come teoria dello "stato di transizione" [12, 13]. L'idea di base di questa teoria è che durante la reazione il sistema debba superare una regione critica (stato di transizione o complesso attivato) nello spazio delle configurazioni<sup>2</sup> per passare dallo stato iniziale (regione dei reagenti) allo stato finale (regione dei prodotti). Assumendo la distribuzione

<sup>2</sup> Lo "spazio delle configurazioni" è uno spazio vettoriale generato dalle coordinate generalizzate che descrivono un insieme di punti  $q_i$ ,  $i=1, \dots$ , nell'interno del quale sono determinate univocamente tutte le loro posizioni. Esso è ben noto ai fisici essendo uno dei concetti essenziali della meccanica razionale, studiata in tutti i Corsi di Laurea in Fisica. Forse non è altrettanto noto ai chimici. Una sua trattazione semplice si trova in un qualunque libro di Meccanica Razionale. In rete, può essere recuperata negli appunti universitari di tali corsi, come, per esempio, in Appunti dalle Lezioni di Meccanica Razionale tenute dal prof. Raffaele Esposito - Università degli Studi dell'Aquila, <https://people.disim.univaq.it/~serva/teaching/Esposito.pdf>.

di equilibrio termico negli stati iniziali dei reagenti e negli stati del complesso attivato, fu derivata, sulla base della meccanica statistica, la formula per la velocità di reazione in funzione delle probabilità di trovare il sistema nello stato iniziale e nello stato finale, della velocità media con la quale il sistema passa nella stretta regione attivata dello spazio delle configurazioni e della probabilità che il sistema, passato lo stato di transizione, raggiunga lo stato finale dei prodotti [14, 15]. In seguito, Pelzer e Wigner [16] introdussero l'uso delle superfici di energia potenziale in questa trattazione statistica delle reazioni chimiche, identificando lo stato di transizione con il punto di sella (minimo di energia in tutte le coordinate meno una nella quale abbiamo un massimo di energia) di una superficie potenziale (Figura 2).

Il percorso di minima energia che connette i reagenti, lo stato di transizione e i prodotti, identifica quello che viene chiamato "cammino di reazione" (indicato con la curva continua in rosso nella parte alta di figura 2). Furono Hirshfelder e Wigner [17] che per primi discussero la validità della teoria del complesso attivato dal punto di vista della meccanica quantistica. Essi mostrarono che la nozione di complesso attivato era compatibile con il principio di indeterminazione di Heisenberg solo quando la variazione dell'energia potenziale lungo il cammino di reazione nella regione del complesso attivato era "sufficientemente piatta".



**Figura 2.** Generica curva di energia potenziale per la reazione  $A + BC \rightarrow AB + C$  (in alto) e sua proiezione nel piano (in basso)

Questa condizione era necessaria sia per la definizione di "complesso attivato" sia per il movimento di traslazione lungo la coordinata di reazione. Solo se tale condizione fosse stata rispettata, infatti, il movimento lungo la coordinata di reazione poteva essere descritto dalla meccanica classica. Tale condizione, tuttavia, non era sufficiente da sola per la definizione del complesso attivato come una configurazione stabile. Era necessario, infatti, assumere che il tempo di vita del complesso attivato fosse sufficientemente da far sì che, mentre il sistema passava nella regione intermedia dello spazio delle configurazioni, avvenissero molte vibrazioni e rotazioni per il complesso attivato. In pratica, la teoria del complesso attivato era giustificata in presenza di un movimento lungo la coordinata di reazione

così lento da far variare con continuità gli stati del complesso attivato. Ciò assicurava la possibilità di trattare in maniera quantomeccanica sia gli stati del complesso attivato sia la loro distribuzione di equilibrio termico.

Analizziamo adesso i concetti fondamentali su cui si basa la TST. Nella teoria cinetica delle collisioni si suppone che le molecole siano non interagenti tranne che in un infinitamente breve lasso di tempo in cui si urtano. Sono questi urti che permettono la distribuzione di Boltzmann tipica dell'equilibrio termico delle velocità molecolari e, quando casualmente le molecole superano, come energia scambiata, una soglia prefissata, innescano la reazione. Dietro questa teoria c'è una visione da meccanica classica delle molecole. Esse sono dei gruppi di palline che urtandosi si separano. Il problema è che questa visione semplicistica può andare bene solo per pochi tipi di reazione, in particolare per le reazioni unimolecolari. Sono, infatti, queste le reazioni in cui due molecole della stessa specie si urtano e una delle due acquista un'energia che la porta a dividersi in frammenti. In generale, una reazione chimica porta a una globale ristrutturazione delle molecole implicate nell'urto, così globale da dare vita ad altre molecole. Una teoria delle reazioni deve, quindi, spiegare i complessi meccanismi che permettono di sostituire atomi e formare selettivi legami, oltre che spiegare la rottura di alcuni legami. È per così dire la parte di "riorganizzazione" delle molecole più che la parte di rottura a mancare. A nostro avviso, tale teoria è ancora legata sostanzialmente al concetto di molecola come "insieme di sfere rigide", cioè sistema in cui "struttura molecolare" coincide con "disposizione" degli atomi. Noi, invece, abbiamo già mostrato [5, 6] che, oltre alla variazione delle posizioni degli atomi, una reazione chimica può essere vista come "una disorganizzazione seguita da riorganizzazione". Inoltre, tale teoria cerca di interpretare tutti i fenomeni sotto un aspetto puramente meccanicistico e non considera le specifiche interazioni chimiche. Questa problematica diventa sempre più evidente all'aumentare della dimensione molecolare e, quindi, per le macromolecole. I siti attivi ed allosterici delle proteine [18] ne sono un ottimo esempio.

Concludendo questo paragrafo, le trasformazioni chimiche sono una parte fondamentale dell'approccio chimico allo studio del mondo materiale. Per questa scienza, infatti, i milioni di enti che la caratterizzano, le molecole nel piano microscopico e le sostanze chimiche in quello macroscopico, sono il plurale qualitativo del mondo, ma sono anche la base con cui spiegare la sua trasformazione. La capacità di tenere insieme tanto gli aspetti statici, proprietà degli enti, quanto quelli dinamici, loro trasformazione, è il risultato storico di una scienza che ha sempre dato una notevole importanza all'aspetto di varietà e trasformabilità della materia.

#### **4. Le sfide nell'insegnamento della meccanica quantistica nella scuola secondaria di secondo grado**

Andiamo adesso ad analizzare gli aspetti didattici della meccanica quantistica, in particolare lo studio quantistico del mondo atomico/molecolare nelle scuole secondarie di secondo grado. Una problematica simile si riscontra anche nel suo insegnamento all'inizio dell'università.

La meccanica quantistica è spesso considerata troppo avanzata per tali studenti e sorgono diverse sfide nel cercare di insegnarla. Queste includono concetti astratti (come la dualità onda-particella, la configurazione elettronica e i numeri quantici) e la necessità di una solida preparazione matematica. Esiste, tuttavia, una crescente quantità di ricerche su come insegnare e apprendere la meccanica quantistica a livello di scuola secondaria di secondo grado, con un focus sul miglioramento della comprensione concettuale [19-23]; anche in Italia ci si è occupati di queste problematiche generali [24, 25], sull'uso di simulazioni computerizzate [26, 27] e sull'integrazione di applicazioni reali. A volte si può ricorrere a un "gioco" per superare le difficoltà concettuali [28].

Se questa è la situazione internazionale, possiamo notare un "ritardo" della scuola italiana nello studio di questo argomento. Sebbene questo sia uno dei problemi generali della impreparazione scientifica, c'è anche il problema opposto, cioè quello di accennare, senza poter chiarire, i concetti del mondo atomico/molecolare ad alunni della primaria. Io credo che sia ormai impossibile non utilizzare i termini di atomo e molecola con gli studenti di tutte le età, perché il "mondo esterno" alla scuola uti-

lizza tali termini ormai a ogni livello di informazione, dalla pubblicità in avanti. In tutti i casi, questo non è “studiare gli atomi e le molecole” e ancora di più non è, e non può essere, studiare gli atomi e le molecole della scienza contemporanea.

La mia idea è che l'età migliore per iniziare uno studio sistematico del mondo submicroscopico sia il terzo anno delle scuole secondaria di secondo grado. Attualmente, non è questa la situazione del Liceo Scientifico tradizionale. Se si guarda ai testi scolastici di Chimica più diffusi, l'atomo e la molecola quantistica sono trattati nel volume del primo biennio. Le Indicazioni Nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento per il Liceo Scientifico, invece, recitano che al primo biennio si dovrebbero trattare le leggi fondamentali e il modello atomico di Dalton, lasciando al secondo biennio “lo studio della struttura atomica e dei modelli atomici, il sistema periodico, le proprietà periodiche e i legami chimici”.

Il passaggio dalla meccanica classica a quella quantistica è uno snodo culturale, oltre che tecnico. Esso andrebbe trattato e approfondito, quanto possibile, in maniera interdisciplinare. All'inizio del XX secolo, infatti, in quasi tutti gli ambiti culturali sono avvenute “rivoluzioni” che hanno scardinato l'immagine classica e semplice del mondo. Fare anche solo intuire allo studente che la complessità dell'odierna visione scientifica del mondo possa essere ricollegata alla complessità dell'arte contemporanea, per esempio, sarebbe un punto culturale importante.

L'approccio al mondo quantistico è ricco di implicazioni filosofiche ed epistemologiche che vanno esplicitate, nei limiti del possibile. Per esempio, se non è chiaro il concetto di modello scientifico è difficile far capire agli studenti perché si considerano “tanti” modelli atomici [29].

Il mondo atomico e molecolare va introdotto a scuola seguendo il percorso storico che ha portato alla sua nascita e al successivo consolidamento nel mondo quantistico. È vero che attualmente questi argomenti scolastici della scienza sono tra i pochi introdotti con riferimenti storici (il modello atomico di Thomson prima del modello atomico di Bohr, per esempio), ma spesso in tale approccio scolastico manca la problematicità storica, mancano le motivazioni culturali e non solo che hanno “costretto” gli scienziati a superare un modello di atomo per passare a un altro. Senza questi “collegamenti”, la trattazione storica di questi argomenti diviene un susseguirsi di modelli senza un filo logico.

Anche alcuni aspetti “tecnici” della proposta didattica della meccanica quantistica vanno, a mio avviso, rivisti come, per esempio, l'impostazione, seguita da molti libri di testo, di partire dalla doppia natura onda-particella della luce e della materia come primo argomento da trattare nell'introduzione alla quantistica. L'idea generale sottesa a tale scelta è che, dopo aver introdotto la doppia natura della luce e della materia, si possa passare “naturalmente” all'equazione di Schrödinger e poi agli orbitali. Quest'ordine di trattazione è, a mio avviso, sbagliato perché, oltre a essere falso storicamente, rischia di far mancare il graduale passaggio tra l'orbita dell'elettrone della meccanica classica, l'orbita quantizzata di Bohr e il concetto di orbitale (il cui stesso nome è collegato, non causalmente, all'orbita), togliendo a quest'ultimo concetto il suo ancoraggio storico. In pratica, bisogna procedere con la meccanica classica fino al modello atomico di Bohr (e di Sommerfeld, se si vuole accennare a tale modello) e, solo dopo aver introdotto la quantizzazione delle orbite, introdurre la doppia natura della luce e della materia.

Resta poi da capire quale materia scolastica dovrebbe occuparsi di questo studio, cioè dove inserire lo studio dell'approccio quantistico. Sicuramente la meccanica quantistica va studiata al liceo al quinto anno nell'ambito della fisica. Ad essa e alla meccanica relativistica è riservato un posto importante nelle Indicazioni ministeriali per il quinto anno del liceo scientifico: “Il percorso didattico comprenderà le conoscenze sviluppate nel XX secolo relative al microcosmo e al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa ed energia”. Non credo, tuttavia, che allo studente liceale degli anni precedenti al quinto possa essere evitato completamente il contatto con la meccanica quantistica. Quest'idea è supportata, come abbiamo visto, dalle indicazioni ministeriali per Scienze Naturali, ma anche e soprattutto dall'idea che, senza un approccio quantistico nel secondo biennio del Liceo da parte degli insegnanti di Scienze Naturali, lo

studio del mondo molecolare risulta monco. Per esempio, sarebbe difficile, e solamente mnemonico, andare a parlare di “doppietti elettronici” per prevedere la forma delle molecole, anche con approcci semplici come quelli della *VSEPR*, se non ci fosse alle spalle un’introduzione alla meccanica quantistica. Non credo, infatti, che l’insegnamento della chimica si possa “spogliare” degli aspetti quantistici, delegandoli alla fisica. La fisica, infatti, sia per sua natura disciplinare sia per la preparazione universitaria dei suoi insegnanti (a maggior ragione di quelli laureati in matematica) non si occupa molto di molecole e introduce aspetti quantistici solo per la radiazione elettromagnetica e al massimo per gli atomi.

Vi è, infine, un altro problema generale. Alcuni ritengono che, se non è possibile sviluppare un concetto scientifico in una rigorosa trattazione matematica, è meglio non trattarlo. Seguendo questa linea di pensiero, si potrebbe fare ben poco di meccanica quantistica anche nei corsi generali universitari (per esempio, in Chimica Generale del primo anno). Io non credo all’idea che un concetto scientifico in ambito didattico non possa essere “capito” senza una rigorosa formalizzazione. Prima e dietro alla formalizzazione di un concetto scientifico per lo studente deve, infatti, esserci una “visualizzazione” modellistica, una contestualizzazione nelle problematiche scientifiche e, infine, per i concetti scientifici più importanti che hanno travalicato l’ambito disciplinare, una contestualizzazione culturale fuori dell’ambito scientifico. Sono queste le principali competenze che le discipline scientifiche devono dare del mondo atomico/molecolare allo studente di oggi, cittadino di domani.

## 5. Conclusione

In conclusione, possiamo riassumere gli aspetti essenziali analizzati del rapporto della meccanica quantistica con la tradizione chimica e nell’analisi delle problematiche generali della didattica di questi argomenti.

Nel presente contributo e in altri lavori [3, 4] ho cercato di mostrare che l’impostazione generale della chimica e della meccanica quantistica sono differenti. La chimica si propone di padroneggiare un mondo complesso di milioni di sostanze differenti nel piano macroscopico e un mondo molecolare altrettanto complesso a livello microscopico. La strategia utilizzata è quella di raggruppare le sostanze/molecole in categorie che identificano delle caratteristiche essenziali comuni sia statiche (proprietà), collegate alla struttura molecolare, sia dinamiche (reattività), collegate alla variazione nel tempo della struttura molecolare [5, 6]. In particolare, nell’ottica chimica microscopica è essenziale determinare l’organizzazione delle interazioni interatomiche e in particolare “chi è legato a chi”. Il concetto di legame chimico diventa, quindi, il cardine della strutturazione dell’edificio molecolare e della sua trasformazione nelle reazioni chimiche [4].

La meccanica quantistica applicata al mondo molecolare può svolgere una funzione importante nel determinare se una particolare struttura sia stabile e in quali particolari stati; nel determinare i movimenti vincolati della struttura molecolare (roto-vibrazioni), con la possibilità di partire da questi per analizzare il percorso reattivo che modifica lo stato globale del sistema. In quest’ottica globale della molecola, i suoi componenti non sono essenziali e le loro caratteristiche *in situ* e le loro modifiche nel processo reattivo si possono ritrovare *a posteriori* per proiezione dalle caratteristiche globali.

Un discorso aggiuntivo va fatto per il concetto di meccanismo di reazione. Qui, la “strutturazione interna” degli enti entra in competizione con la strutturazione tra gli enti per rendere possibile l’atto reattivo. Con questo intendiamo dire che, oltre alla disposizione spaziale degli atomi nelle molecole, è la disposizione delle molecole (e dei relativi atomi) tra di loro a rendere possibile l’atto reattivo. Tale disposizione intermolecolare viene trattata dalla meccanica quantistica solo per reazioni che implicano molecole molto semplici. Spesso si preferisce sviluppare questo aspetto intermolecolare con simulazioni di meccanica classica e, una volta identificata una distribuzione specifica delle molecole, fare per questa il calcolo quantomeccanico. Abbiamo poi accennato alle problematiche sul concetto di meccanismo [7-9], ma il suo rapporto con la meccanica quantistica è ad oggi quasi tutto da indagare.

Infine, nel caso delle macromolecole, il meccanismo di reazione ritorna del tutto “interno” all’ente in gioco, alla struttura interna della macromolecola, identificando specifiche sue parti come sito di reazione e/o allosterico. La componente “esterna”, la molecola che si lega al sito allosterico, agisce da “stimolo” (specie attivante) o da repressore (specie disattivante) per il processo reattivo che avviene nel sito di reazione.

Riguardo agli aspetti didattici della meccanica quantistica, possiamo dire che il mondo atomico/molecolare è una risorsa importante per il docente di Scienze Naturali e di Fisica, una risorsa utile sia sul piano motivazionale, perché permette al docente di parlare di “cose attuali”, sia per gli stretti intrecci che tali argomenti consentono con le altre discipline scolastiche. Una risorsa a patto di non introdurlo troppo presto (primo biennio) e, soprattutto, di trattarlo in maniera generale e non esclusivamente formale. Non serve, infatti, una “testa riempita di molecole” (Figure 3), ma una comprensione del perché introduciamo un piano molecolare tra quello atomico e quello macroscopico.

---



**Figura 3.** Una testa “riempita” di molecole

---

Infine, per affrontare in maniera sistematica le sfide educative nell’insegnamento della meccanica quantistica a livello di scuola superiore, i ricercatori sottolineano la necessità di adattare i curricula, di utilizzare la tecnologia e di applicare strategie didattiche innovative che semplifichino la natura astratta della meccanica quantistica, rendendola più accessibile. Inoltre, anche una formazione specifica degli insegnanti [30] è fondamentale per migliorare la comprensione della meccanica quantistica agli studenti e superare le loro convinzioni intuitive che spesso in quest’ambito si rivelano errate.

## Riferimenti bibliografici

- [1] M. P. Banchetti-Robino, G. Villani, *From the Atom to Living Systems. A Chemical and Philosophical Journey into Modern and Contemporary Science*, Oxford University Press, New York, 2023, pp. 55-59.
- [2] E. Ghibaudi, L. Cerruti, G. Villani, Structure, shape, topology: entangled concepts in molecular chemistry, *Foundations of Chemistry*, 2020, **22**, 279-307.
- [3] G. Villani, M. V. Cubellis, Overview of the complex but fruitful relationship between molecular chemistry and quantum mechanics, in celebration of the Year of Quantum Sciences and Technologies, *Top Italian Scientists Journal*, 2025, **2**(4) (<https://www.doi.org/10.62684/JDPO8893>).
- [4] O. Lombardi, G. Villani, About the concept of molecular structure, *Foundations of Science*, 2024 (<https://doi.org/10.1007/s10699-024-09963-y>).
- [5] G. Villani, *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*, CUEN, Napoli, 2001, pp. 129-144.
- [6] G. Villani, *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*, Franco-Angeli, Milano, 2008, pp. 58-62.
- [7] P. Machamer, L. Darden, C. Craver, Thinking about mechanisms, *Philosophy of Science*, 2000, **67**, 1-25.
- [8] W. Bechtel, Mechanism and Biological Explanation, *Philosophy of Science*, 2011, **78**, 533-557.
- [9] R. F. Hendry, Mechanisms in Chemistry, in *New Mechanism. Explanation, Emergence and Reduction*, J. L. Cordovil, G. Santos, D. Vecchi, D. (Eds.), Cham:Springer, 2023, **35**, 139-160.
- [10] R. Marcelin, Contribution a l'étude de la cinétique physico-chimique. *Annales de Physique*, 1915, **9**(3), 120-231.
- [11] H. Eyring, The activated complex in chemical reactions, *Journal of Chemical Physics*, 1935, **3**, 107-115.
- [12] M. G. Evans, M. Polanyi, Further considerations on the thermodynamics of chemical equilibria and reaction rates, *Trans. Faraday Soc.*, 1936, **32**, 1333-1360.
- [13] M. G. Evans, M. Polanyi, Inertia and driving force of chemical reactions, *Trans. Faraday Soc.*, 1938, **34**, 11-24.
- [14] H. Eyring, Men, mines, and molecules, *Annual Review of Physical Chemistry*, 1977, **28**, 1-15.
- [15] M. C. Gupta, *Statistical thermodynamics*, New Age International Publishers, New Delhi, 2007.
- [16] S. G. Christov, Historical Introduction, in *Collision Theory and Statistical Theory of Chemical Reactions, Lecture Notes in Chemistry*, Springer, Berlin, Vol. 18, 1980.
- [17] J. O. Hirshfelder, E. Wigner, Some quantum-mechanical considerations in the theory of reactions involving an activation energy, *J. Chem. Phys.*, 1939, **7**, 616-628.
- [18] G. Villani, A time-dependent quantum approach to allostery and a comparison with light-harvesting in photosynthetic phenomenon, *Frontiers in Molecular Biosciences*, 2020, **7** (<https://doi.org/10.3389/FMOLB.2020.00156>).
- [19] R. Blonder, et al., Teaching quantum mechanics concepts through problem solving, *Physics Education*, 2014, **49**(2), 208-213.
- [20] P. R. L. Heron, et al., Quantum mechanics and the role of interpretation in high school education, *Physics Education*, 2017, **52**(6), 065004.
- [21] H. Friedrich, G. Holton, Teaching quantum mechanics at the high school level, *Journal of Physics Education*, 2003, **42**(2), 81-84.
- [22] A. Lurio, Teaching quantum mechanics: challenges and innovations, *Physics Education*, 2001, **36**(1), 9-12.
- [23] R. Chabay, B. Sherwood, Quantum mechanics: A new approach for teaching and learning, *Physics Education*, 2010, **45**(5), 474-481.
- [24] G. Villani, Studiare gli atomi e le molecole nei licei. Alcune considerazioni generali, *Nuova Secondaria*, 2020, **XXXVIII**(2), 42-45.
- [25] U. Cosentino, M. Venanzi, Percorsi didattici di introduzione alla Meccanica Quantistica, in *I tanti*

- volti della chimica. Percorsi innovativi per insegnarla e comprenderla (a cura di E. Aquilini, E. Ghibaudi, M. Venturi, G. Villani), CLUEB, Bologna, 2024, pp. 323-351.
- [26] D. Wick, D. Finkelstein, Using interactive simulations to teach quantum mechanics, *International Journal of Quantum Chemistry*, 2015, **115**(6), 369-377.
- [27] D. Smith, R. Hemmings, Exploring quantum mechanics through virtual labs and simulations, *Journal of Educational Technology Systems*, 2020, **49**(4), 483-501.
- [28] C. A. L. Mahunyag, et al., ELQUAN: A game-based learning tool to master electron configuration and quantum numbers, *Journal of Chemical Education*, 2025, **102**(1), 444-451.
- [29] E. Ghibaudi, G. Villani, L'approccio scientifico alla realtà: una riflessione epistemologica, in *I tanti volti della chimica. Percorsi innovativi per insegnarla e comprenderla* (a cura di E. Aquilini, E. Ghibaudi, M. Venturi, G. Villani), Bologna, 2024, CLUEB, Bologna, 2024, pp. 23-36.
- [30] T. Traube, R. Blonder, A computational chemistry course for teachers: From research laboratories to high-school chemistry teaching, *Journal of Chemical Education*, 2023, **100**(11), 4360-4368.



## 16<sup>a</sup> Conferenza della European Science Education Research Association (ESERA), 25-29 agosto 2025

Elena Ghibaudi

Dipartimento di Chimica dell'Università di Torino

e-mail: elena.ghibaudi@unito.it

Nell'ultima settimana di agosto 2025 si è svolta a Copenhagen la sedicesima conferenza della società ESERA, la European Science Education Research Association.



L'occasione era di quelle solenni in quanto, proprio quest'anno, la European Science Education Research Association (ESERA) ha festeggiato i 30 anni dalla sua fondazione. Ma cosa è ESERA? L'associazione si costituì nell'aprile 1995, in occasione della Conferenza europea sulla ricerca nell'ambito dell'educazione scientifica tenutasi a Leeds, in Inghilterra. Gli obiettivi dichiarati, leggibili sul sito web della medesima (<https://www.esera.org/>) sono:

- ampliare la portata e migliorare la qualità della ricerca e della formazione alla ricerca nell'ambito dell'educazione scientifica in Europa
- fornire un forum per la collaborazione nella ricerca sull'educazione scientifica tra i Paesi europei
- rappresentare gli interessi professionali dei ricercatori nel campo dell'educazione scientifica in Europa
- cercare di collegare la ricerca alle politiche e alle pratiche dell'educazione scientifica in Europa
- promuovere i legami tra i ricercatori nel campo dell'educazione scientifica in Europa e comunità simili in altre parti del mondo

ESERA si pone, dunque, come "luogo" di scambio e discussione per tutti coloro che, a vario titolo, si occupano di didattica delle scienze, vuoi a partire da una prospettiva disciplinare, vuoi pedagogica, o didattica. L'attuale presidente è Lucy Avraamidou, dell'Università di Groningen (Paesi Bassi) e il direttivo rispecchia la trans-nazionalità di ESERA, che ha raggiunto quasi 2000 iscritti, provenienti da tutti i Paesi europei, da Paesi vicini (come Turchia e Israele), ma anche da realtà più lontane (geograficamente e culturalmente) come gli USA, l'Australia, la Cina e i Paesi dell'America del Sud.

Aspetti salienti di ESERA sono il tentativo di condividere metodologie di ricerca e di creare uno spazio europeo della ricerca in didattica delle scienze; la multiculturalità, espressa dalla varietà di tradizioni educative tipiche dei differenti Paesi e dei loro vari sistemi educativi; l'apertura a tematiche transdisciplinari e a un approccio complesso alla realtà; l'apertura alla società civile e alle sfide che essa deve affrontare.

Il tema principale della conferenza ESERA di quest'anno 2025 (*Transitions in Science Education: Sustainability and Digital Advances*, <https://esera2025.org>) rifletteva due tematiche peculiari dei tempi

in cui viviamo, che rappresentano una grande sfida e avranno forte impatto sulla vita delle nuove generazioni. Il cambiamento climatico e la pervasività del paradigma digitale sollevano interrogativi che riguardano tanto il futuro del pianeta quanto quello della nostra specie e che sconfinano nel campo antropologico culturale (in che modo il digitale e l'Intelligenza Artificiale modificano l'esperienza umana?), toccando inevitabilmente la sfera della formazione. Gli organizzatori, nella pagina iniziale del sito web del convegno, proponevano i seguenti interrogativi:

*“Verso cosa sta cambiando la società e, per estensione, l'educazione scientifica? Come possiamo progettare, attuare e valutare i nostri sforzi di trasformazione? In che modo i cambiamenti sociali influenzeranno l'istruzione, l'insegnamento e l'apprendimento e, a loro volta, in che modo l'istruzione, l'insegnamento e l'apprendimento influenzeranno i cambiamenti sociali?”*

Questi temi sono stati oggetto delle conferenze plenarie, tenute da esperti (<https://esera2025.org/keynote-speakers/>) alcuni dei quali sono di seguito citati.

Alfredo Jornet (Università di Girona, Spagna), nel suo intervento, intitolato *“Understanding the climate crisis from within: A critical, life-centered approach to sustainability in science education”*, si è posto il problema di come promuovere atteggiamenti pro-attivi a favore dell'ambiente, da parte degli studenti nella loro dimensione di vita quotidiana.

Laura Colucci-Gray, formatasi in Italia, ma docente a Edimburgo, nel suo contributo, dal titolo *“Awakening kinship and crafting new nature imaginaries through sciences and arts”*, ha insistito sulla necessità di modificare l'immaginario collettivo in merito al nostro rapporto con l'ambiente, mediante la sinergia tra discipline artistiche e scientifiche (il cosiddetto approccio STEAM).

Kason Ka Ching Cheung della Education University of Hong Kong, in una presentazione intitolata *“Intersection between GenAI and nature of science: Current and future research directions”* ha parlato della transizione digitale nell'era dell'Intelligenza Artificiale Generativa (GenAI) e del suo impatto sulle pratiche di insegnamento delle scienze. Partendo dalle preoccupazioni degli insegnanti, e supportato da una revisione della letteratura recente, Cheung ha evidenziato come i primi tentativi di introdurre l'utilizzo di chatbot di intelligenza artificiale negli interventi didattici non integrino adeguatamente l'apprendimento disciplinare e la natura della scienza. Ricerche condotte dalla scuola primaria all'università rivelano infatti che gli studenti non comprendono appieno come la GenAI generi informazioni scientifiche e in che modo queste siano connesse ai principi, alle norme e alle istituzioni del mondo reale che governano la creazione e l'uso della conoscenza scientifica. Cheung ha, quindi, sollecitato la revisione dei *framework* pedagogici per allineare la GenAI con l'educazione alla natura della scienza e ha proposto direzioni future per la ricerca, in sintonia con le esigenze degli educatori. La conferenza è stata molto partecipata (ca. 1600 iscritti) e, parallelamente ai temi portanti, ha ospitato contributi su vari aspetti della ricerca in didattica delle scienze, distribuiti su numerose sessioni parallele: sono stati toccati aspetti metodologici, pedagogici, didattici, concettuali e sociologici. I contributi hanno, inoltre, riguardato tutti i livelli della formazione, dalla scuola materna fino all'università.

La partecipazione a questo evento offre un formidabile colpo d'occhio sul panorama della ricerca in didattica delle scienze, sia in merito ai temi di ricerca che sono attualmente al centro dell'interesse di questa comunità, sia in merito alle metodologie di ricerca, che sono specifiche del settore e in continuo sviluppo.

L'assunto di partenza – ormai consolidato e condiviso dall'intera comunità di ricerca – è che il protagonista del processo di apprendimento è lo studente. Conseguentemente, l'intervento didattico non deve essere passivizzante né limitarsi a una trasmissione di informazioni, ma deve puntare alla comprensione e comportare un cambiamento concettuale nella mente dello studente.

Le proposte di ricerca e di indagine presentate a ESERA2025 hanno riguardato approcci didattici volti a raggiungere questi obiettivi, attraverso varie strategie: i) l'incremento degli aspetti motivazionali (mediante la gamification o l'informal learning); ii) la promozione del pensiero critico (mediante, ad es., l'uso di approcci ispirati all'inquiry-based learning o di *escape rooms*); iii) lo studio delle concezioni difformi e di strategie per il loro superamento (quali, ad es., l'uso di *refutation texts*); iv) la promo-

zione della comprensione concettuale di ciascuna disciplina (ad es., incorporando elementi di Natura della Scienza nella trasposizione didattica); v) il coinvolgimento degli studenti in attività di modellizzazione (*model-based learning*) e di rappresentazioni modellistiche della realtà (simulazioni, realtà virtuale, ecc.); vi) l'esplorazione dell'intreccio tra dimensione affettiva (emozioni, sensazioni, ecc.) e dimensione cognitiva (concetti, teorie, modelli); vii) l'integrazione di problematiche socio-scientifiche (*socio-scientific issues*, SSI) nell'insegnamento delle scienze; viii) i metodi di valutazione delle competenze e delle abilità.

Come è tradizione di questo settore di ricerca, gli studi presentati a ESERA2025 adottavano approcci quantitativi (basati, ad es., su questionari, test, analisi statistica, e mirati a identificare tendenze in atto o a verificare la coerenza di ipotesi, prassi consolidate, proposte innovative, ecc.), qualitativi (basati, ad es., su interviste, narrazioni, rappresentazioni, pratiche osservative su discenti e docenti, utili a esplorare fenomeni complessi come le dinamiche di classe, le esperienze degli studenti e la percezione dei docenti), oppure approcci misti.

Chiudo questa breve descrizione riportando di seguito tre impressioni maturate durante la partecipazione a ESERA2025, come componente della piccola comunità italiana che si occupa di didattica chimica.

- ◆ La ricerca in didattica delle scienze, come ogni ricerca, è caratterizzata da metodologie specifiche, ben strutturate, che poggiano su quadri teorici consolidate. Lo sviluppo di questo tipo di ricerca in Italia, in ambito chimico, deve *necessariamente* passare attraverso l'acquisizione e il consolidamento di tali metodologie e la conoscenza dei quadri teorici di riferimento.
- ◆ Contrariamente alla ricerca scientifica sperimentale, la ricerca in didattica delle scienze risente fortemente dei contesti nazionali e manifesta alcune specificità di obiettivi che derivano, almeno in parte, dai diversi contesti culturali nei quali tale ricerca viene svolta; ad es., la ricerca didattica non può prescindere dalla strutturazione del sistema di formazione degli studenti e dei docenti, che è specifico di ogni nazione. In molte nazioni europee, esiste una forte sinergia tra mondo della ricerca didattica e settore educativo, resa possibile dall'esistenza di centri di ricerca, ove la realtà della scuola e quella della ricerca si incontrano e lavorano insieme. Se l'Italia vuole restare al passo con i tempi, è *fondamentale* che i Teaching and Learning Centers, nati nelle diverse sedi universitarie, diventino a tutti gli effetti luoghi di promozione di tale sinergia.
- ◆ La partecipazione della comunità chimica internazionale a ESERA2025 è stata molto più contenuta rispetto ad altre comunità (tipicamente, quella fisica e matematica). Non è un caso che queste due discipline abbiano una lunga e riconosciuta tradizione di ricerca in campo didattico, contrariamente a quanto accade per la chimica. È, dunque, tempo che la comunità chimica prenda atto della *necessità di promuovere e sostenere* questo ambito di ricerca, soprattutto a fronte di risultati di apprendimento della chimica decisamente critici. Lo spazio didattico è lo spazio nel quale il sapere disciplinare si tramanda e si perpetua. Prendersene cura significa assicurare alla disciplina la continuità che le è indispensabile, riconoscere il valore di quello specifico sapere e garantire attenzione da parte della società, nelle sue varie componenti.



## Conferenza ICCE ed ECRICE 2026 a Erzurum, come Roma 2012

Liberato Cardellini

*e-mail:* l.cardellini21@outlook.it

Organizzate in collaborazione con la Società Chimica Turca (fondata nel 1919), la 28th IUPAC International Conference on Chemistry Education e la 17<sup>th</sup> EuChemS European Conference on Research in Chemical Education (ICCECRICE 2026), avranno luogo congiuntamente (Figura 1) dal 13 al 17 luglio 2026 alla Atatürk University in Erzurum, bella cittadina del nord-est della Turchia, con un ricco patrimonio culturale e storico.



**Figura 1.** Le due conferenze insieme per la seconda volta (<https://iccecrice2026.org/>)

L'istruzione chimica, in senso lato, si occupa dell'insegnamento e dell'apprendimento della chimica. La ricerca sull'istruzione chimica spazia dalla comprensione della storia e della filosofia della chimica, che guida nello sviluppo della conoscenza chimica, agli sviluppi e alle applicazioni di tecnologie e strumenti moderni per un insegnamento e un apprendimento della chimica più efficace e interessante.

La ricerca didattica in chimica ha registrato una crescita significativa negli ultimi 60 anni, ma è ancora una parte della chimica relativamente giovane. Sebbene siano stati compiuti progressi sostanziali nell'identificazione di strategie basate sull'evidenza scientifica a supporto dell'insegnamento e

dell'apprendimento, non si è ancora assistito a un cambiamento sistemico e diffuso nelle modalità dell'insegnamento della chimica, sia nella scuola secondaria che all'università.

Il collegamento degli insegnanti di chimica della scuola secondaria con quanto di interessante e utile la ricerca in didattica della chimica viene realizzato nel mondo accademico non è mai stato così importante, eppure questi mondi sono ancora purtroppo divisi.

La partecipazione a questa conferenza, il cui tema è *Chemistry Education in the Age of Artificial Intelligence*, sarà una occasione per unire questi due mondi e per conoscere l'impatto dell'intelligenza artificiale nell'insegnamento della chimica.

Tutte le informazioni si possono trovare al seguente link: <https://iccecrice2026.org/>