

Verso la sostenibilità e ...oltre! Utilizzo del *Game-based learning* per la promozione della chimica sostenibile nelle scuole secondarie

Maria Luisa Testa¹, Marco Russo¹, Chiara Aliotta¹, Alberto Zanelli²,
Armida Torreggiani² e Francesca Deganello¹

¹Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati (ISMN), Palermo; ²Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività (ISO), Bologna

e-mail: francesca.deganello@cnr.it

Abstract. Green and sustainable chemistry is an important piece of the skills puzzle needed to foster a cultural shift in society toward sustainability, circular economy and decarbonization. We propose a learning path on Chemistry and Sustainability which exploits the Game-Based Learning and is structured in two steps. The first one is to introduce and contextualize the concepts with the games “Sustainable Cross-words”, “New materials from Waste,” and “Reduce, Recycle, Reuse,” and the second one to go into details and consolidate with the game “Toward Sustainability... and Beyond”. The training objectives include both cognitive processes and learning content.

Keywords: sostenibilità; chimica; scuola secondaria; apprendimento basato sul gioco; ricerca scientifica

1. Introduzione e motivazione

Come parte integrante dell’impegno per la transizione ecologica e la crescita sostenibile, obiettivi principali del Green Deal Europeo, la Commissione Europea ha pubblicato nel 2020 un documento [1], che è poi stato implementato nel 2024 con linee guida ancora più specifiche sulla chimica sostenibile [2]. Gli obiettivi generali del percorso tracciato dalla Commissione sono il raggiungimento di una migliore protezione dei cittadini e dell’ambiente e l’incremento di innovazione per la produzione sostenibile di prodotti chimici più sicuri per l’ambiente e la salute. In tal senso, l’utilizzo di risorse rinnovabili, la riduzione dei rifiuti e dei sottoprodotti, ma anche la loro conversione in materiali ad alto valore aggiunto, oltre che un minor sfruttamento delle materie prime, diventano indispensabili per un futuro sostenibile. Questa nuova visione della ricerca in campo chimico è alla base della “chimica verde”, poi inglobata nella più generale e olistica “chimica sostenibile” [3, 4].

La chimica è ovunque nella nostra vita quotidiana, sotto forma di materiali e di prodotti che sono gli elementi costitutivi delle tecnologie, incluse quelle a basso contenuto di carbonio, a zero inquinamento ed efficienti dal punto di vista energetico e delle risorse. Tuttavia, alcune sostanze chimiche possono causare danni alla salute umana e all’ambiente [5, 6]. Per consentire la transizione dell’industria chimica verso la neutralità climatica, la chimica *green*, i cui 12 principi sono stati stabiliti da P. Anastas e J. C. Warner ca. 25 anni fa [7], ha ridefinito il *design* dei materiali e dei processi chimici. Per esempio, nella chimica verde si ambisce a: i) ridurre o addirittura ad eliminare l’uso di solventi nocivi, per cercare di minimizzarne l’impatto su ambiente e salute, ii) lavorare sempre a temperature e pressioni non elevate, evitando così l’impiego di sistemi troppo energivori e poco sostenibili, iii) prevenire a monte la produzione di rifiuti e scarti, piuttosto che trattarli e bonificarli una volta creati. La chimica verde (Figura 1, sinistra) e la chimica sostenibile (Figura 1, destra) si applicano in sinergia a diversi settori e costituiscono ormai una scelta obbligata per un modello economico circolare che punta alla decarbonizzazione.

Promuovere tra i giovani le conoscenze sui temi di ricerca collegate alla chimica verde, all'economia circolare e al *Green Deal* rappresenta un'azione "chiave" per supportare la resilienza ai cambiamenti e favorire una trasformazione sociale basata sulla consapevolezza dei limiti dello sviluppo tecnologico e su comportamenti più sostenibili. Pertanto, è importante portare queste tematiche nelle scuole e supportare i docenti, ricordando anche che "l'istruzione è l'arma più potente che si può utilizzare per cambiare il mondo" (N. Mandela). È necessario partire dai ragazzi di oggi che vivranno su questo pianeta per cambiare l'attuale stile di vita consumistico in favore di un sistema economico circolare e sostenibile, che permetta uno sviluppo equo di tutta la società, preservando al contempo gli ecosistemi e l'ambiente naturale. Inoltre, il raggiungimento di questi obiettivi richiede di potenziare le carriere di studio negli ambiti cosiddetti STEM (*Science, Technology, Engineering, Mathematics*).



Figura 1. I "12 principi della chimica verde", pubblicati nel 1998 da P. Anastas e J. Warner [7] (sinistra); la chimica sostenibile e il suo raggio d'azione (destra)

Per inserire questi argomenti nei curricula *standard*, si è scelto di sperimentare un approccio di apprendimento basato sul gioco (*Game-Based Learning*, GBL) che, essendo un linguaggio universale adattabile a vari contesti e a ogni fascia d'età, si presta particolarmente bene a diffondere conoscenza e consapevolezza in modo informale. Infatti, grazie a un approccio ludico, è possibile catturare l'interesse dei giovani e farli riflettere su sistemi complessi, mostrando loro il ruolo fondamentale della scienza per lo sviluppo sostenibile. L'importanza del GBL per l'educazione è già nota nell'antica Grecia in cui il gioco copriva un ruolo centrale negli eventi sociali e religiosi [8].

A questa categoria appartengono sia i giochi da tavolo (*board games*) che i giochi nativi digitali o digitalizzati in quanto efficaci se ben progettati [9]. Infatti, nell'era del digitale è opportuno progettare sia nuovi giochi didattici con utilizzo *open*, ma anche investire sulla digitalizzazione di noti giochi da tavolo, perché se ne consente una maggiore diffusione e fruibilità evitando anche eventuali costi di riproduzione e distribuzione tipici dei *board games*. Alcuni *board games* possono stimolare abilità che tipicamente si acquisiscono con i giochi digitali, come ad esempio il *problem-solving* e il pensiero critico [10, 11], ma il vantaggio principale di qual si voglia GBL rimane l'incremento di motivazione all'apprendimento da parte degli studenti [12, 13]. Debit et al. [14] evidenziano l'efficacia dell'utilizzo dei *board games* nelle scuole secondarie come supporto didattico, mentre Othman et al. [15] ritengono che siano in grado di motivare e sviluppare l'interazione sociale, oltre che l'apprendimento dei contenuti disciplinari. Recentemente, è stato sottolineato come il gioco nella didattica possa anche essere uno strumento di inclusione e accoglienza, che stimola a lavorare in gruppo [15, 16]. Fra le attività GBL sono state proposte anche *Escape rooms* sulla chimica, da usare sia come consolidamento delle conoscenze pregresse degli studenti, che come strumento per facilitare l'apprendimento della disciplina [17-19]. Anche la progettazione del gioco stesso è considerato uno strumento di apprendimento sperimentale di grande valore ed efficacia [20, 21].

Se l'approccio *GBL* è già stato impiegato per diverse discipline, sono meno gli esempi che riguardano la chimica, materia considerata spesso ostica, date le difficoltà di apprendimento riscontrate dagli studenti, e che potrebbe ricevere invece un importante beneficio da un approccio ludico-educativo [9, 22]. Oltre a facilitare l'apprendimento della chimica, è importante far comprendere il collegamento fra chimica e vita quotidiana e il contributo che la chimica può dare allo sviluppo sostenibile della società [23]. In letteratura, ad esempio, è stato proposto un gioco da tavolo educativo per imparare la chimica in un contesto quotidiano [24], o in associazione a temi sociali [11] e, solo recentemente, l'approccio *GBL* è stato applicato anche alla chimica sostenibile [19, 25-27]. Parallelamente, diversi esempi sono stati discussi in letteratura riguardo la sensibilizzazione verso le problematiche ambientali, il risanamento ambientale e gli obiettivi dello sviluppo sostenibile [28-31].

In questo articolo, proponiamo una serie di attività ludico-educative di supporto alla promozione della chimica nelle scuole secondarie e del suo contributo allo sviluppo tecnologico sostenibile della società. Le attività, basate sul coinvolgimento dei partecipanti in modo da promuovere un apprendimento attivo, sono suddivise in due fasi, una preparatoria e una di consolidamento. Queste attività, proponibili nella loro interezza o solo in parte, sono state ripetutamente testate in vari contesti (es., percorsi per le competenze trasversali e l'orientamento – PCTO -, eventi di divulgazione della scienza, ecc.) e sono indirizzate sia alla scuola secondaria di primo grado che a quella di secondo grado, previa modulazione della profondità dei contenuti. Questi ultimi spaziano dal significato di sostenibilità e azioni sostenibili, al riciclo e riuso, dai materiali inorganici, organici e ibridi ai nuovi materiali ottenibili da rifiuti, dai catalizzatori eterogenei alla purificazione dell'acqua e dell'aria.

2. Struttura delle attività di *Game-Based Learning*

Il percorso formativo su Chimica e Sostenibilità che utilizza il *GBL* è strutturato in due fasi, che mirano a raggiungere alcuni specifici obiettivi di apprendimento sul legame fra chimica e sostenibilità (Figura 2). La Fase 1 ha lo scopo di contestualizzare separatamente gli argomenti "chimica" e "sostenibilità", di sottolinearne le mutue relazioni e di fornire le informazioni di base, mentre la Fase 2 è di consolidamento e consiste nell'utilizzare, attraverso un gioco a squadre, quanto appreso nella fase precedente. La Fase 1 si compone di tre giochi educativi: il gioco digitale "Cruciverba sostenibili", il gioco da tavolo "Nuova vita ai rifiuti" e il gioco memo "Ridurre, riciclare, riutilizzare". Tutti i giochi sono preceduti da una breve introduzione all'argomento.

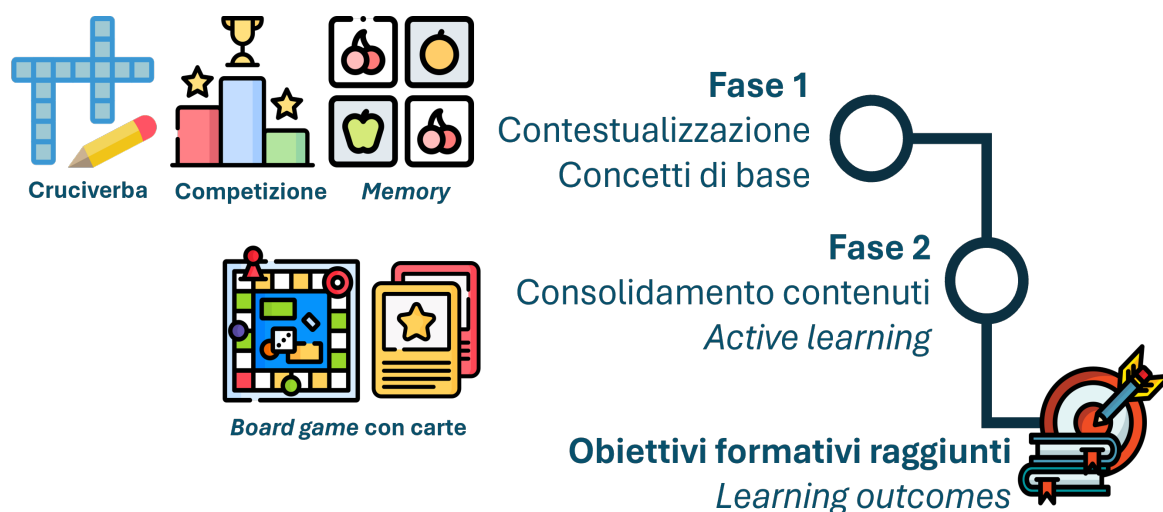


Figura 2. Struttura generale delle attività di *Game-Based Learning*, dalla fase introduttiva alla fase di consolidamento che, insieme, consentono di raggiungere gli obiettivi formativi sulle strette connessioni fra chimica e sostenibilità

Il gioco “Cruciverba sostenibili” comprende tre cruciverba digitali intitolati: «Cosa è sostenibile?», «Che collegamento c'è fra sostenibilità e chimica?», e «Cosa puoi fare tu per un mondo sostenibile?». Lo scopo è quello di introdurre il concetto di sostenibilità, il suo significato, la sua relazione con la chimica e le azioni necessarie per il suo raggiungimento. I tre cruciverba interattivi, realizzati con le risorse digitali H5P (Lumi), sono fruibili online (<https://app.Lumi.education/run/t1k3z2>; <https://app.Lumi.education/run/YzLWAY>; <https://app.Lumi.education/run/WMYukH>). In figura 3, come esempio, è mostrato uno dei tre cruciverba e una delle diapositive rappresentative che precedono lo svolgimento del cruciverba.

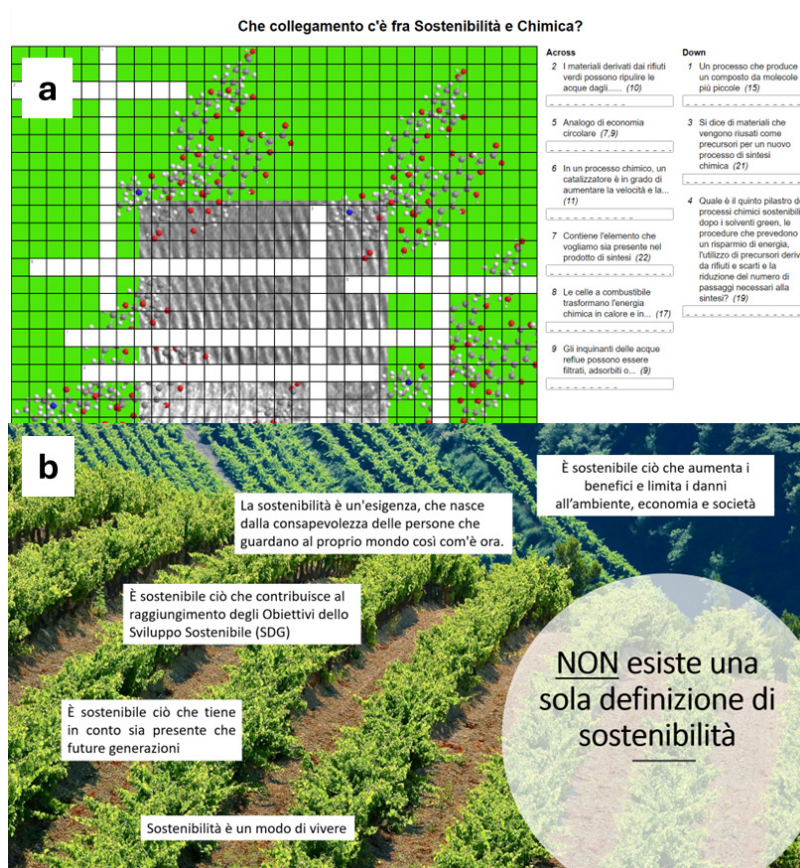


Figura 3. a) Il primo dei tre cruciverba con le domande a lato; b) una delle diapositive che precedono lo svolgimento del cruciverba

Il gioco “Nuova vita ai rifiuti”, nella versione in inglese “*New Materials from Waste*”, ha lo scopo di far comprendere ai ragazzi che tutti i rifiuti e gli scarti contengono elementi che possono essere riutilizzati come materia prima seconda per la creazione di nuovi materiali, nel rispetto dell'ambiente e con una notevole riduzione dei costi. Il gioco è pensato per due giocatori o due squadre e richiede massima attenzione, abilità al lavoro di gruppo, rapidità di pensiero e prontezza di riflessi. È stato ideato nell'ambito di un progetto su materiali per energia e ambiente, motivo per cui i composti descritti sono essenzialmente ossidi misti di metalli, quali perovskiti¹ o spinelli², due classi di composti

¹ Ossidi metallici con formula generale ABO_3 in cui il sito A è generalmente un metallo alcalino terroso o un lantanide circondato da 12 atomi di ossigeno (coordinazione dodecaedrica), mentre il sito B è generalmente un metallo di transizione circondato da 6 atomi di ossigeno (coordinazione ottaedrica).

² Ossidi metallici di formula generale AB_2O_4 in cui i siti A e B sono costituiti rispettivamente da cationi metallici con stato di ossidazione (II) e (III). Quando $A=B$ si parla di spinello; quando $A \neq B$ si parla di spinello misto.

inorganici ampiamente studiati come materiali per l'energia. Tuttavia, il gioco è versatile in quanto può facilmente essere riadattato in ambiti scientifici diversi cambiando i composti che i giocatori devono "creare". Il conduttore del gioco (es., docente, ricercatore, ecc.) legge quindi un composto da "creare", indicato in una delle carte rosa contenute nella scatola, ad esempio, la perovskite con formula LaFeO_3 , e i giocatori devono scegliere quali precursori (carte di colore verde) utilizzare per creare quel composto sulla base degli elementi che esso contiene. Ad esempio, per creare LaFeO_3 , lantanio, La, e ferro, Fe, sono gli elementi da utilizzare. È possibile scegliere di introdurre alcuni elementi sia da precursori commerciali, i.e., nitrato di ferro, che da precursori di scarto, i.e., scarti di ruggine. Si assegna il punteggio massimo (2 punti) alla squadra che risponde correttamente e che utilizza il massimo numero possibile di precursori di scarto, il punteggio intermedio (1 punto) alla squadra che seleziona i precursori corretti, sebbene non necessariamente di scarto, e nessun punteggio (0 punti) in caso di errore nella scelta dei precursori. Vince la squadra che ha conquistato più punti nel momento in cui tutti i composti sono stati "creati".

Inoltre, dopo ogni *manche*, il conduttore legge ai giocatori l'applicazione tecnologica di ogni composto. Non è necessario addentrarsi nelle tipologie di sintesi dei materiali da rifiuti e/o scarti, è sufficiente che i ragazzi comprendano che la chimica è in grado di trasformare un materiale in un altro che contiene gli stessi elementi, ma con diverse proprietà. In figura 4, viene mostrato il contenuto del gioco (Figura 4a) e due esempi di composti da creare, ZnCo_2O_4 , uno spinello, e SrFeO_3 , una perovskite ossido (Figura 4b). Per il primo composto si ottiene un punto se si selezionano $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ e $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, mentre si assegnano 2 punti se si seleziona, la pasta ad alta protezione, che contiene ZnO come principale componente inorganico. In figura 4b, sono mostrati i potenziali precursori dello zinco (Zn), quello commerciale, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, e quello di scarto a base di Zn. Anche per il secondo composto, SrFeO_3 , è mostrato sia il precursore commerciale, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, che quello di scarto, la ruggine. Se lo studente seleziona la ruggine insieme allo $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, riceve il massimo dei punti (2).



Figura 4. a) Scatola e contenuto del gioco educativo “New materials from waste” (versione in inglese); b) due esempi di composti da creare (carte rosa), due esempi di precursori commerciali (carte verdi) e due esempi di precursori di scarto

“Ridurre, riciclare, riutilizzare” è un gioco ispirato al celebre memo (*memory game*) ed è stato realizzato da un gruppo di studenti del Liceo G. Meli di Palermo in collaborazione con il CNR-ISMN Palermo. La scatola contiene delle coppie di cartoncini quadrati in cui sono raffigurate delle imma-

gini (Figura 5a). Per ogni coppia di immagini, una è relativa a un materiale o a un concetto e l'altra alla sua proprietà/funzionalità o alla sua descrizione/definizione. Il docente/tutor, o, in generale, l'esperto che guida il gioco, fornisce ai giocatori una breve spiegazione sui vari concetti affrontati nel gioco e sulle associazioni fra le immagini. Lo scopo è individuare la coppia di immagini, scoprendo a turno le carte e associando il materiale alla corretta proprietà o funzionalità e viceversa. È un gioco semplice, facilmente comprensibile che aiuta, però, a interiorizzare alcune associazioni su chimica e sostenibilità. I concetti trattati sono legati sia alla sostenibilità in generale che ai materiali funzionali, ma il gioco può essere implementato aggiungendo ulteriori associazioni legate alla chimica verde e/o sostenibile. Le carte riguardano nuovi materiali da rifiuti, materiali inorganici, organici e ibridi, catalizzatori e catalisi eterogenea, proprietà chimico-fisiche dei materiali su scala nano/meso, purificazione dell'acqua e dell'aria. In figura 5b, sono mostrati due esempi di associazioni tra immagini. La coppia "petrolio-silice idrofobica" è un esempio di associazione di carattere "chimico", in quanto si tratta di due materiali e della loro funzione: il petrolio come potenziale inquinante delle acque e la silice idrofobica utilizzata per il recupero del petrolio in caso di sversamento. La coppia "simbolo 3R-RiusoRiducoRiciclo" è un esempio di associazione "logica" in cui un concetto è associato alla sua descrizione essenziale e distintiva.

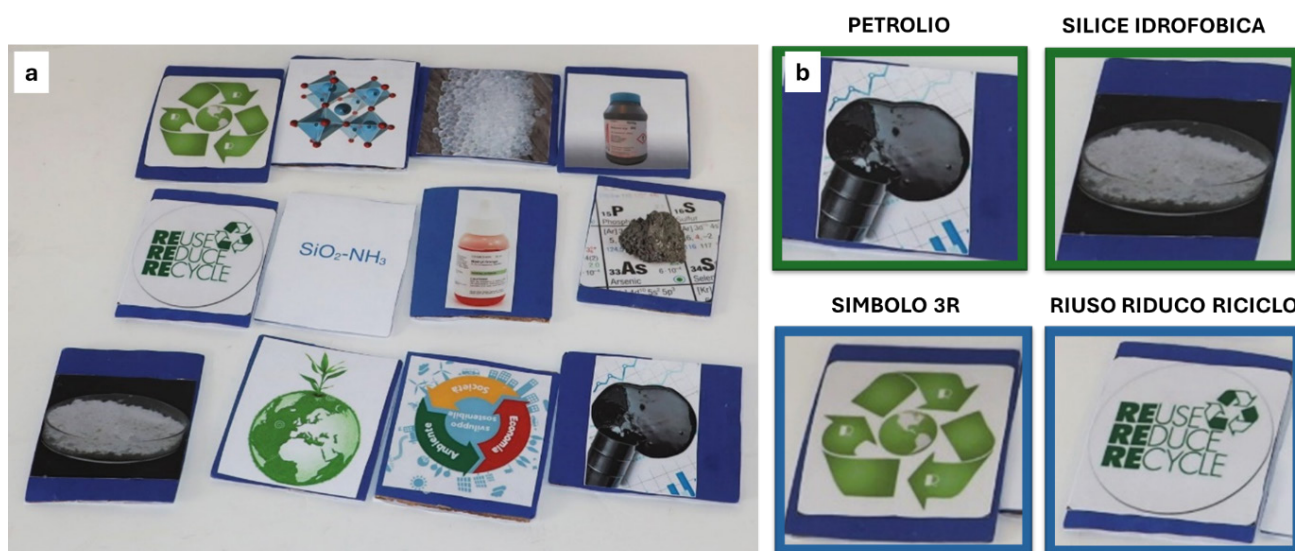


Figura 5. a) Scatola, carte e istruzioni del gioco (con note di approfondimento) "Ridurre, Riciclare, Riutilizzare"; b) due esempi grafici di associazioni fra le tessere del memo

Nella progettazione di questo percorso sulla chimica e sostenibilità, le competenze acquisite dai giochi descritti finora sono preliminari e propedeutiche alla Fase 2 di seguito sviluppata, in cui il consolidamento delle nozioni apprese nella Fase 1 avviene tramite lo sviluppo di un gioco più complesso e più lungo. Nella Fase 2 viene proposto l'utilizzo del gioco "Verso la Sostenibilità ... e Oltre", realizzato da un gruppo di studenti del Liceo G. Meli di Palermo durante un PCTO con il CNR-ISMN Palermo, che ha lo scopo di chiarire alcuni concetti base sulla sostenibilità e informare su quello che può fare la chimica dei materiali per contribuire allo sviluppo sostenibile in modo divertente. È un gioco con dadi, carte domanda e con tabelloni colorati da posizionare sul pavimento (Figura 6). Le due squadre affrontano un percorso attraverso le *Sosten Islands* per salvarle dall'inquinamento.

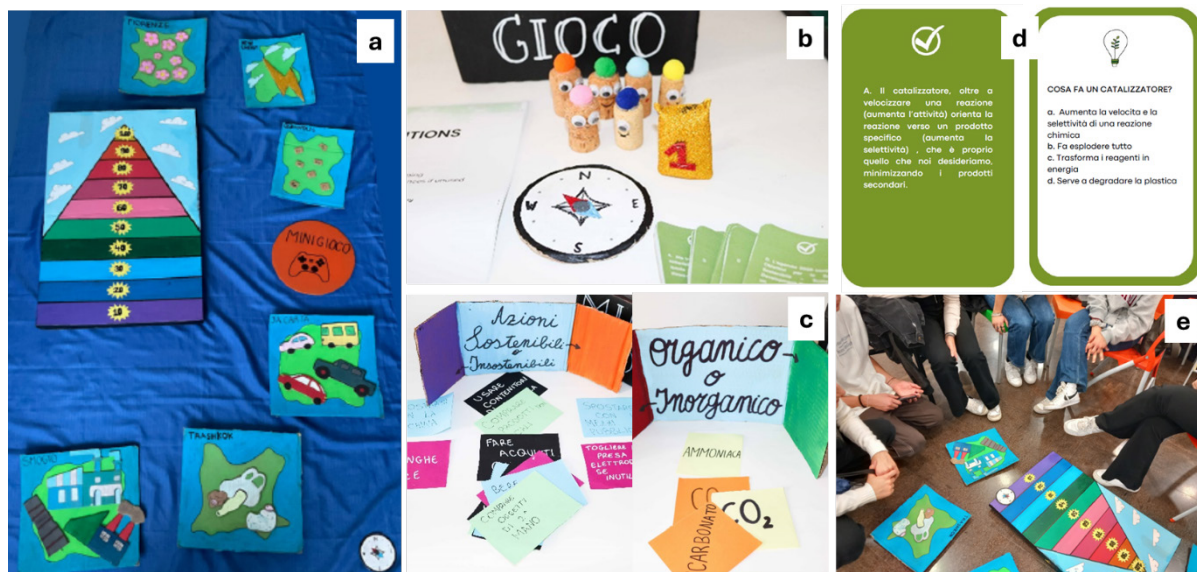


Figura 6. Contenuto del gioco educativo “Verso la sostenibilità ...e oltre”: a) 5 tabelloni, uno per ogni isola, e un tabellone finale, b) 6 pedine, c) due scatole minigioco, d) le carte domanda con le risposte sul retro, oltre al foglio con il regolamento e la descrizione del gioco, disponibile anche in formato video; nella scatola è previsto anche il materiale informativo per docenti e per studenti; e) il tabellone e le isole vanno posizionate sul pavimento come mostrato

Lo *storytelling* è il seguente: già altri esploratori erano riusciti ad arrivare in questo luogo sconosciuto e a liberare due isole inquinate ribattezzate come *New Energy* e *Fiorenze*. Purtroppo, prima di completare la loro missione, gli esploratori sono stati scoperti dall’avidio proprietario delle *Sosten Islands* e cacciati. Ora tocca ai giocatori portare avanti l’impresa dei precedenti esploratori. L’idea di un mondo sostenibile come un traguardo da raggiungere, che dipende dalle nostre azioni passate, rende bene la consapevolezza che agire in modo sostenibile è qualcosa che riguarda tutti noi. Il gioco è realizzato con materiali di scarto e ha il vantaggio di poter essere svolto in piedi, in quanto i tabelloni sono grandi e sono disposti per terra. Si gioca in due squadre che rispondono a turno ai quesiti delle carte domanda a risposta multipla. Le carte domanda possono essere selezionate in base al livello degli studenti, che siano della secondaria di primo o secondo grado. Per poter giocare a questo gioco è indispensabile consultare il materiale informativo prima di giocare o, meglio, seguire una piccola lezione del docente che spiega i concetti importanti sulla base del materiale informativo.

3. Obiettivi formativi

Gli obiettivi formativi di questo percorso basato sul *Game-Based Learning* applicato alla chimica e sostenibilità sono molteplici e sono elencati in figura 7, divisi tra processi cognitivi e contenuti di apprendimento [32]. In particolare, al termine del percorso, i partecipanti avranno acquisito conoscenze su: i) riciclo dei rifiuti, ii) alcuni concetti base sulla sostenibilità e sul rispetto per l’ambiente e la necessità/possibilità di risanarlo, iii) sintesi chimica di nuovi materiali e possibilità di preparare materiali da rifiuti e scarti, iv) catalisi eterogenea e ruolo della chimica nello sviluppo sostenibile.

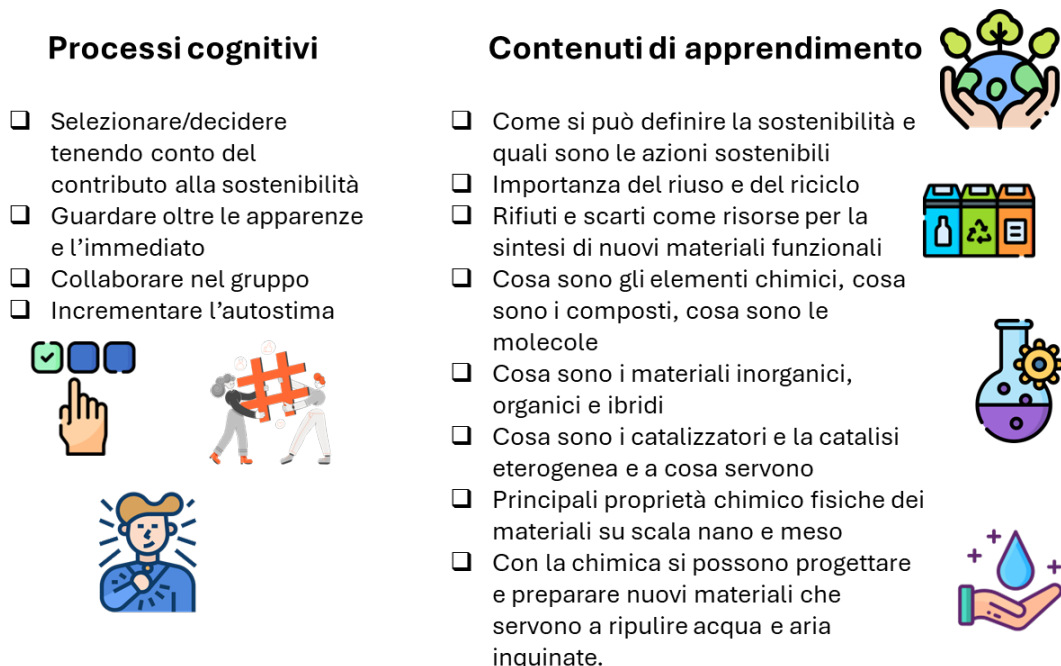


Figura 7. Obiettivi che vengono raggiunti alla fine del percorso formativo

Inoltre, i partecipanti possono acquisire maggiore consapevolezza sul fatto che un mondo sostenibile, come obiettivo finale, dipende dalle loro azioni passate, presenti e future. In termini di contenuti, alcuni di essi sono riproposti più volte nelle varie attività, in modo da concretizzare le conoscenze e abilità acquisite in diversi contesti e consolidarle come competenze. Questo percorso ludico, infine, rivela agli studenti il lato bello della chimica, sperimentando il suo ruolo nel mondo e nelle loro vite, aumenta la loro curiosità verso la chimica, la sostenibilità e argomenti correlati, e stimola la loro responsabilità verso l'ambiente e lo sviluppo sostenibile. Altre abilità che gli studenti possono acquisire a completamento del percorso riguardano la dinamicità fisica e mentale, la concentrazione, la velocità e la precisione nelle decisioni (competizione), l'osservazione e la memoria visiva (memo e cruciverba) e la collaborazione con gli altri componenti del gruppo (*board game*).

4. Conclusioni

Grazie all'approccio *Game-Based Learning* applicato alla chimica verde e alla sostenibilità è possibile far familiarizzare gli studenti con i principi della chimica verde, con il contesto più ampio della chimica sostenibile e con la loro applicazione pratica alle tematiche e alle sfide dell'odierna ricerca scientifica. Le attività sviluppate facilitano l'introduzione, in modo progressivo, di concetti chiave legati alle tematiche di ricerca presentate, consentendo agli studenti di acquisire nuove competenze sulla chimica e sulla sostenibilità e di approfondire, nonché contestualizzare, quanto appreso nei programmi scolastici. Intorno a questo, che è considerato il fulcro delle attività proposte, si snodano due altri aspetti formativi importanti. Il primo è la presa di coscienza, da parte dei discenti, di problematiche che riguardano la vita quotidiana e che non possono e non devono essere trascurate. Il secondo è l'atteggiamento positivo e propositivo nei confronti delle suddette problematiche, stimolato attraverso la conoscenza sulle soluzioni innovative che la scienza propone. Infine, fra gli obiettivi principali di questo percorso di apprendimento vi è quello di stimolare l'interesse a lungo termine dei giovani, introducendo la possibilità di intraprendere carriere "basate sulle materie STEM" per affrontare le nuove sfide della società ed essere più resilienti.

Ringraziamenti

Si ringraziano le studentesse del Liceo Giovanni Meli di Palermo coinvolte nella fase di realizzazione e test dei giochi, ovvero Simona Davì, Cristiana Capodicasa, Claudia Monteleone, Carla Cuttaia e Sara Biondo ("Verso la sostenibilità ... e oltre"), e Rosamaria Cirone, Laura Martina, Martina Guliti, Chiara Prestigiacomo, Francesca Abbagnato ("Ridurre, riciclare, riutilizzare!") e la loro docente di Scienze, Prof.ssa Anna Argento Zangara. Si ringrazia Rosalia Scalici (CNR-ISMN) per la realizzazione delle scatole del gioco "Nuova vita ai rifiuti" (e della sua versione inglese "New materials from waste"). Si ringrazia il progetto "Change the Game: Giocare per prepararsi alle sfide di una società sostenibile" (Progettidiricerca@CNR) e Raw Matters Ambassadors at Schools - RM@Schools 4.0, PA n. 20069, finanziato da EIT/EIT RawMaterials). Si ringrazia Lorenzo Forini per alcune foto dei giochi.

Riferimenti bibliografici

- [1] *Chemicals strategy*, 2022, European Commission; https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy_en (accessed February 3, 2025).
- [2] Communication from the Commission - Guiding criteria and principles for the essential use concept in EU legislation dealing with chemicals, 2024, European Commission; <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/90926c62-0365-11ef-a251-01aa75ed71a1/language-en> (accessed February 3, 2025).
- [3] V. G. Zuin, I. Eilks, M. Elschami, K. Kümmerer, *Green Chem.*, 2021, **23**, 1594.
- [4] D. J. C. Constable, *iScience*, 2021, **24**, 103489.
- [5] B. E. Erickson, *C&EN Global Enterprise*, 2019, **97**, 28.
- [6] C. M. Post, L. A. Boule, C. G. Burke, C. T. O'Dell, B. Winans, B. P. Lawrence, *iScience*, 2019, **20**, 168.
- [7] P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, 1998.
- [8] G. Colombo, *Gioco ed educazione: quando il divertimento diventa conoscenza*, Tesi di Laurea Magistrale in Culture Formazione e Società globale (AA 2022-2023), Università degli Studi di Padova.
- [9] E. Byusa, E. Kampire, A. R. Mwesigye, *Heliyon*, 2022, **8**, e09541.
- [10] D. Ilmiyati, E. Risky, U. Anis Chaeruman, M. Paristiowati, I. Istianah, *Jurnal Tadris Kimiya*, 2024, **9**, 1.
- [11] S. Y. Chen, J. C. Tsai, S. Y. Liu, C. Y. Chang, *Think. Skills Creat.*, 2021, **41**, 100921.
- [12] M. N. Mohammed Naaim, M. Karpudewan, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2024, **25**, 1251.
- [13] T. To, K. Nguyen, T. Phuong, A. Ngo, A. T. Pham, D. Dat Nguyen, P. H. Cheng, V. B. Nguyen, *EURASIA J. Math. Sci. Tech. Ed.*, 2024, **20**, 2494.
- [14] J. S. P. Debit, H. M. P. Bacoba, M. M. C. Tabanao, A. M. P. Walag, *J. Chem. Educ.*, 2024, **101**, 1610.
- [15] M. K. Othman, S. K. Ching, *Educ. Inf. Technol.*, 2024, **29**, 24525.
- [16] C. Angelelli, D. Giberti, *L'integrazione scolastica e sociale*, 2021, **20**, 99.
- [17] M. Tortora, *Quaderni CIRD*, 2022, **25**, 56.
- [18] M. L. Clapson, S. Schechtel, E. Davy, C. S. Durfy, *Educ. Sci.*, 2024, **14**, 1273.
- [19] C. Lathwesen, I. Eilks, *J. Chem. Educ.*, 2024, **101**, 3193.
- [20] E. J. Delgado-Algarra, A. A. Lorca-Marín, *Utilizing ICT for Didactics of Social and Experimental Sciences* (Chapter 11), IGI Global Scientific Publishing, New York, 2024.
- [21] A. B. Heim, E. A. Holt, *J. Microbiol. Biol. Educ.*, 2021, **22** (6 pages).
- [22] S. Chen, S. Jamiatul Husnaini, J. J. Chen, *Int. J. Sci. Educ.*, 2020, **42**, 2224.
- [23] J. Sjöström, M. Yavuzkaya, G. Guerrero, I. Eilks, *J. Chem. Educ.*, 2024, **101**, 4189.
- [24] J. C. Tsai, S. Y. Chen, C. Y. Chang, S. Y. Liu, *Educ. Sci.*, 2020, **10**, 48.
- [25] K. D. Thomas, H. E. Muga, *Handbook of Research on Pedagogical Innovations for Sustainable Development* (Chapter 7), IGI Global Scientific Publishing, New York, 2014.
- [26] J. L. Miller, M. T. Wentzel, J. H. Clark, G. A. Hurst, *J. Chem. Educ.*, 2019, **96**, 3006.
- [27] K. E. Mellor, P. Coish, B. W. Brooks, E. P. Gallagher, M. Mills, T. J. Kavanagh, N. Simcox, G. A. Lasker, D. Botta, A. Voutchkova-Kostal, J. Kostal, M. L. Mullins, S. M. Nesmith, J. Corrales, L. Kristofco, G. Saari, W. B. Steele, F. Melnikov, J. B. Zimmerman, P. T. Anastas, *Green Chem. Lett. Rev.*, 2018, **11**, 103.

- [28] P. Parekh, E. Gee, K. Tran, E. Aguilera, L. E. Pérez Cortés, T. Kessner, S. Siyahhan, *Int. J. Sci. Educ.*, 2021, **43**, 2148.
- [29] J.-C. Tsai, S.-Y. Liu, C.-Y. Chang, S.-Y. Chen, C. Mader, T.-H. Meen, C. Tijus, J.-C. Tu, *Sustainability*, 2021, **13**, 4942.
- [30] P. H. Cheng, T. K. Yeh, J. C. Tsai, C. R. Lin, C. Y. Chang, *Sustainability*, 2019, **11**, 1341.
- [31] L. C. Pope, *J. Sustain. Educ.*, 2001, **25**, 1.
- [32] D. Robasto, E. Torre, R. Trinchero, *Form@re*, 2022, **22**, 1.