



Rosa Maria Matteucci<sup>a,b</sup>, Alberto Perrotta<sup>a</sup>,  
 Rossella Labarile<sup>b,c</sup>, Matteo Grattieri<sup>b,c</sup>, Massimo Trotta<sup>c</sup>, Paolo Stufano<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>CNR-Nanotec, Istituto di Nanotecnologie, Bari  
<sup>b</sup>Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Bari “Aldo Moro”  
<sup>c</sup>CNR-IPCF, Istituto per i Processi Chimico-Fisici, Bari

## CAFFÈ, MATERIALI “AVANZATI” ED ENERGIA

**Il caffè è la bevanda più consumata al mondo dopo acqua e tè. Per questo gli scarti derivanti da produzione e consumo di caffè sono da tempo un tema interessante per l'economia circolare. Utilizzare questi scarti materiali carboniosi per produrre dispositivi elettrochimici di accumulo e conversione di energia è un'interessante prospettiva per la transizione verso una società elettrificata.**

Quella della “carica di energia” è un'immagine iconica che accompagna il caffè, una delle bevande più conosciute e consumate al mondo. Nell'ultimo decennio questa correlazione ha trovato una nuova accezione nella scienza e nell'ingegneria dei materiali nell'ambito della produzione di materiali dagli scarti del caffè per l'utilizzo in dispositivi di accumulo e conversione di energia [1].

In un momento di transizione verso una società pienamente elettrificata, questo esempio di economia circolare risulta particolarmente interessante: gli scarti del caffè sono oggetto di numerose ricerche che puntano al loro riutilizzo e valorizzazione, vista la pervasività di questa bevanda - e dei suoi sottoprodotti - nelle nostre consuetudini alimentari.

Il caffè è, infatti, la terza bevanda per consumo al mondo dopo l'acqua, ovviamente, e il tè e l'Europa è il primo consumatore mondiale con una media di circa 6 kg pro capite all'anno. È così popolare da aver ispirato studi sul comportamento dei consumatori, anche in rapporto a diversi modelli sociali nelle diverse comunità e agli impatti etici ed ambientali lungo tutta la catena del valore [2]. La sostenibilità della produzione e del consumo di caffè è una sfida decisamente aperta visto il suo *carbon footprint* di ca. 4 kg CO<sub>2</sub> eq. pro capite all'anno in Europa e un *water footprint* di 140 litri di acqua

per tazza standard, circa cinque volte quella di una tazza di tè. Inoltre, lungo l'intera filiera dal campo al consumatore, sono generati considerevoli quantità di scarti. Per una tonnellata di chicco verde vengono generati 500 kg di polpa e 180 kg di buccia, insieme a quantità minori di pellicola e pergamino, i due strati che ricoprono il chicco. Lo scarto maggiore (650 kg per tonnellata di chicco) è tuttavia generato a valle del consumo nei “fondi di caffè” [3] (Fig. 1). Gran parte delle strategie di valorizzazione degli scarti della filiera del caffè si è quindi concentrata proprio sui fondi. Gli approcci più comuni, di più basso valore aggiunto, sono legati al loro uso in agricoltura per la preparazione di compost e vermi-compost e per la coltivazione di funghi. Il recu-

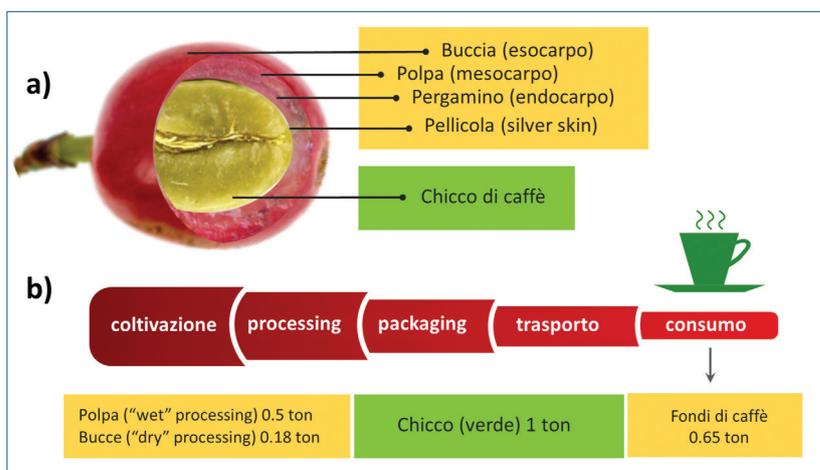


Fig. 1 - Bacca (drupa) del caffè con i suoi principali costituenti (a) e scarti generati lungo tutta la filiera (b) (adattata da [1])

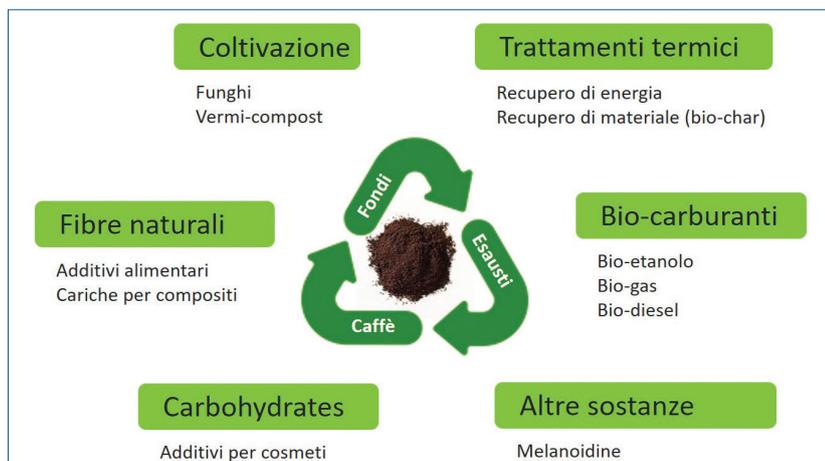
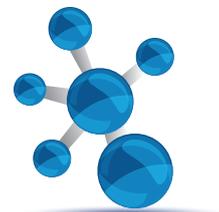


Fig. 2 - Possibili strategie di valorizzazione di fondi di caffè (adattata da [1])

però energetico è stato proposto nell'utilizzo come biocarburanti solidi o nella produzione di bio-etanolo e biogas o nell'estrazione di olii per la produzione di biodiesel. Nella gerarchia di prodotti circolari a più alto valore aggiunto si possono invece annoverare le applicazioni di estrazione ed isolamento di svariate sostanze chimiche, dalla caffeina ai carboidrati, dai composti azotati non proteici ai lipidi fino ai composti fenolici e antiossidanti. Queste sostanze trovano numerose applicazioni dirette, ad esempio nell'industria cosmetica, ma sono anche state utilizzate come intermedi per ulteriori trasformazioni in prodotti secondari. Un caso interessante è rappresentato dalla produzione di poli-idrossialcanoati (PHA), una classe di poli-esteri termoplastici biodegradabili prodotti per fermentazione batterica e utilizzati per la produzione di packaging compostabile, che sono stati prodotti sia dalla componente oleosa che da idrolisati di cellulosa ed emicellulosa estratti dai fondi di caffè [4] (Fig. 2).

Tra queste diverse vie di valorizzazione, quella del trattamento termico e termo-chimico ad alta temperatura (pirólisi) sta riscuotendo un rinnovato interesse scientifico nell'ottica di produzione di materiali carboniosi ad alto valore aggiunto attraverso la massimizzazione della frazione solida (bio-char) recuperata dal processo. Il bio-char, infatti, sottoposto ad opportuni trattamenti di attivazione, può essere utilizzato per la produzione di carbonio con elevata area superficiale e porosità "gerarchica", ideale per l'applicazione in dispositivi elettrochimici di accumulo e conversione di energia.

Ed è proprio questa applicazione emergente degli scarti di caffè che li rende un potenziale alleato in una delle sfide più grandi che la società dovrà affrontare nei prossimi decenni: la criticità delle materie prime per i dispositivi di accumulo e conversione di energia. Se, infatti, l'elettrificazione dei consumi energetici sta crescendo esponenzialmente, dalla mobilità ai dispositivi elettronici personali, le tecnologie abilitanti di accumulo elettrochimico di energia, come le batterie al litio, sono legate all'uso di metalli e materiali tutti inseriti dalla Comunità Europea nella lista di

materie prime critiche ad alta importanza economica ed alto rischio di approvvigionamento [5].

In questa prospettiva sono determinanti le ricerche sia su processi di riciclo di materiali attualmente utilizzati per produrre batterie e dispositivi allo stato dell'arte, sia su materiali alternativi, come ad esempio metalli quali sodio, potassio, magnesio, zinco e alluminio, in sostituzione del litio, ma anche l'uso di materiali carboniosi bio-derivati, ancor meglio se prodotti da scarti agro-alimentari, in sostituzione della grafite naturale, componente fondamentale delle attuali batterie ed anch'essa annoverata nella lista di "critical raw materials" (CRM). Inoltre, a seconda di specifiche applicazioni (es. accelerazioni o lunghe percorrenze di veicoli con motori elettrici), alle batterie sono sempre più affiancate tecnologie complementari o alternative come gli ultracondensatori o "supercapacitor", e le celle a combustibile (fuel cell) per la generazione di energia elettrica da idrogeno. È stato dimostrato negli ultimi anni come in tutti questi dispositivi i carboni derivati da caffè (CDC) possano rappresentare un materiale elettro-attivo estremamente interessante.

L'applicazione probabilmente più immediata e vicina dei CDC è rappresentata proprio dai sopracitati supercapacitor. Questi dispositivi sono intrinsecamente più eco-sostenibili in termini di materiali costituenti rispetto alle batterie; attualmente il materiale più diffuso commercialmente, infatti, è il carbone attivo prodotto da gusci di noce di cocco. Inoltre, un supercapacitor offre altissime velocità di carica e scarica di energia (nell'ordine di pochi minuti o addi-

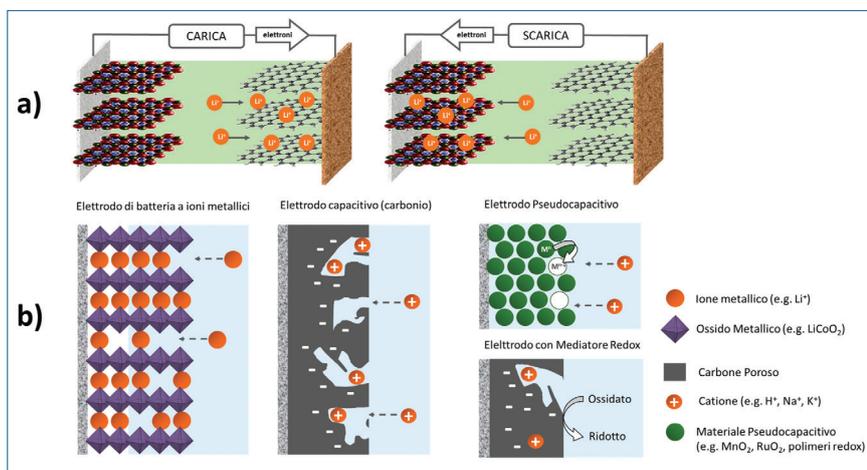


Fig. 3 - Accumulo di energia faradico in una batteria a ioni metallici (a) e differenze tra elettrodi faradici, capacitivi e pseudo-capacitivi (adattata da [1])

rittura secondi) rispetto ad una batteria, e può essere sottoposto a migliaia di cicli senza pregiudicare le prestazioni. Tuttavia, questi dispositivi possono immagazzinare molta meno energia (da 10 a 100 volte inferiore per unità di peso e volume) rispetto ad una batteria al litio. Tali differenze sono dovute ai diversi meccanismi di accumulo delle cariche nelle due classi di dispositivi, come riassunto nella Fig. 3. Una batteria utilizza reazioni faradiche “lente” di ossidazione e riduzione di ioni metallici nella struttura cristallina dell’elettrodo, mentre un *supercapacitor* sfrutta l’accumulo capacitivo “veloce” di cariche che vanno a formare un “doppio strato elettrico”. Per aumentare la densità di energia accumulata da un *supercapacitor* sono stati poi proposti dispositivi ibridi, simmetrici o asimmetrici a seconda della natura dei due elettrodi, capaci di sfruttare i due meccanismi di accumulo ai diversi elettrodi come i meccanismi “pseudo-capacitivi” tipici di ossidi metallici (es. MnO<sub>2</sub> e RuO<sub>2</sub>) [6].

In Fig. 4 è riportato schematicamente il processo generale di preparazione di carboni attivi porosi che prevede un primo passaggio di carbonizzazione dello scarto di partenza seguito da un’attivazione ad alta temperatura tipicamente in presenza di un agente chimico “porogeno” per favorire la produzione di un materiale con alta area superficiale e porosità e buona conducibilità elettri-

ca, al contempo massimizzando la resa in carbonio.

Il materiale carbonioso non è però l’unico costituente di un dispositivo e la prestazione di un *supercapacitor* dipende da diversi fattori, quali la natura dell’elettrolita, del separatore tra gli elettrodi, del processo di preparazione (es. caricamento di materiale attivo per unità di superficie e spessore dell’elettrodo) e finanche i parametri di caratterizzazione (setup della cella, velocità e potenziali/correnti di carica e scarica, cicli). Questo rende complesso il confronto tra i diversi dispositivi

che sono stati sviluppati [1], tuttavia la capacità specifica (F/g), ovvero la misura della quantità di cariche accumulate per unità di peso del materiale, riportata per i CDC è estremamente competitiva rispetto a biomasse come guscio di arachidi o buccia di arancia che hanno i valori più alti in letteratura (> 400 F/g) [7].

Sotto il profilo tecno-economico ed ambientale è utile fare alcune considerazioni sulla possibile sostenibilità dell’utilizzo di uno scarto post-consumo come i fondi di caffè come materia prima alternativa, visti i possibili costi associati alla logistica per il reperimento di un rifiuto delocalizzato. Sebbene ciò richieda studi su scala pilota o dimostrativa, recentemente è stato mostrato che, nella produzione di carboni attivi da biomasse lignocellulosiche, il maggior costo operativo (OPEX) è rappresentato dall’uso di agenti porogeni nella fase di attivazione, responsabili di più dell’80% dei costi operativi. Inoltre, sotto il profilo ambientale, più del 95% di contributo nell’impatto sulle 10 categorie conside-

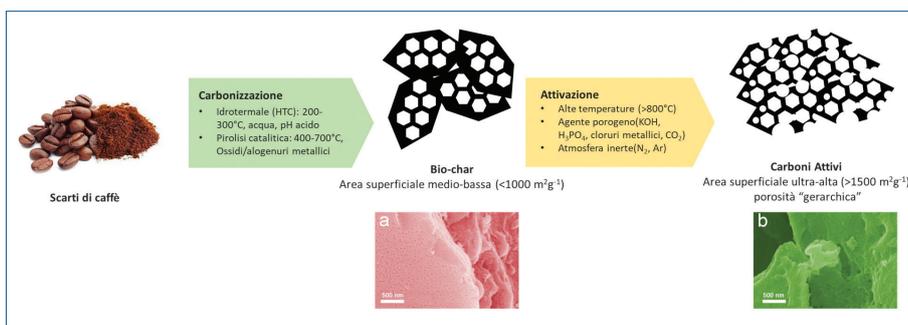
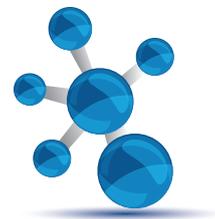


Fig. 4 - Principali step di produzione di carboni derivati da scarti di caffè (adattata da [1])



rate è associabile ai processi di carbonizzazione e attivazione (es. 96,7% delle emissioni di gas serra) [8]. Si può quindi attendere che un uso su larga scala degli scarti di caffè possa essere realistico e non peggiorativo rispetto ai processi industriali allo stato dell'arte, che richiederebbero invece una innovazione in termini di costi e sostenibilità nei processi di carbonizzazione e attivazione, comuni alla produzione di carboni attivi da biomasse (Fig. 4). L'utilizzo di carboni derivati da scarti di caffè ha mostrato, inoltre, risultati interessanti nell'applicazione in materiali compositi per batterie al litio, e anche, sebbene ad un livello di maturità tecnologica inferiore, per le cosiddette tecnologie "post-litio", come ad esempio le batterie al sodio. In questo caso la sfida tecnologica è rappresentata dalla stabilità su un numero di cicli di carica e scarica rilevante, oltre alla massimizzazione di energia accumulabile. Buoni risultati sono stati mostrati in questo caso con l'uso di compositi di CDC in catodi per batterie sodio-zolfo (fino a 2000 cicli) e nell'accoppiamento di CDC con binder a base di polisaccaridi naturali in anodi per batterie a ioni di Li e Na [1, 9-10].

È, infine, interessante riportare i promettenti risultati ottenuti con l'uso di CDC nella sostituzione dei catodi commerciali a base di platino su carbone (20% in peso) per le reazioni di riduzione dell'ossigeno in *fuel cell* ad idrogeno. In questo caso il doping dei CDC intrinseco, dovuto ai residui azotati naturali, ed estrinseco, utilizzando opportuni agenti porogeni nella fase di attivazione, ha portato a prestazioni comparabili con gli elettrodi attualmente in uso, aprendo un'alternativa concreta ad un materiale critico ed estremamente costoso come il platino [1, 11].

In conclusione, sebbene ancora tema di ricerca scientifica e ad uno stadio di maturità tecnologica pre-commerciale, l'uso degli scarti di caffè come materia prima seconda per dispositivi elettrochimici di conversione e accumulo di energia è promettente per le caratteristiche chimico-fisiche dei CDC. I prossimi studi, sia sull'ottimizzazione delle prestazioni dei materiali che sui processi di loro produzione e di fabbricazione di dispositivi su scala pilota, potranno dimostrare quanto il caffè sarà, anche dopo aver dato la giusta "carica di energia" quotidiana alle nostre giornate, un alleato strategico nelle grandi sfide di una società elettrificata.

## Bibliografia

- [1] P. Stufano, A. Perrotta *et al.*, *MRS Ener. & Sustain.*, 2022, <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00036-w> (open access)
- [2] A. Samoggia, B. Riedel, *Appetite*, 2018, **129**, 70, <https://doi.org/10.1016/j.appet.2018.07.002>
- [3] R. Campos-Vega, G. Loarca-Piña *et al.*, *Trends Food Sci. Technol.*, 2015, **45**, 24, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104446>
- [4] J. Massaya, A. Prates Pereira *et al.*, *Food Bioprod. Process*, 2019, **118**, 149, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.010>
- [5] EU Critical Raw Materials [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en)
- [6] P. Simon, Y. Gogotsi, *Nat. Mater.*, 2020, **19**, 1151, <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0747-z>
- [7] S. Saini, P. Chand, A. Joshi, *J. Ener. Stor.* 2021, **39**, 102646, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102646>
- [8] Y. Wang, J. Wang *et al.*, *Energies*, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15010351> (open access)
- [9] Q. Guo, S. Li *et al.*, *Adv. Sci.*, 2020, **7**, 1, <https://doi.org/10.1002/adv.201903246>
- [10] H. Darjazi, A. Staffolani *et al.*, *Energies*, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13236216> (open access)
- [11] D.Y. Chung, Y.J. Son *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, **9**, 41303, <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13799>

### Coffee, Advanced Materials And Energy

Coffee is the most consumed beverage in the world after water and tea. Consequently, the waste generated from coffee production and consumption has turned into an interesting target of circular economy. The production of carbon materials from coffee waste for electrochemical energy storage and conversion devices is an intriguing perspective in the transition toward an electrified society.