

Effetti del lavaggio con acqua clorata sulla qualità e sicurezza del frutto di castagno

written by Rivista di Agraria.org | 2 settembre 2026
di Nicolò Passeri, Patrizia Salusti e Giulia Meccariello



Introduzione

Il lavaggio dei prodotti ortofrutticoli rappresenta una fase cruciale nei processi post-raccolta, finalizzata a garantire l'igiene superficiale e a ridurre la carica microbica derivante dal contatto con il suolo, i residui vegetali e la manipolazione. L'impiego di acqua clorata costituisce la pratica più diffusa per la disinfezione delle superfici alimentari, grazie alla sua comprovata efficacia antimicrobica, al costo contenuto e alla semplicità d'uso. Le normative europee sull'igiene degli alimenti (Reg. CE n. 852/2004) e quelle relative alla qualità delle acque destinate al consumo umano (D.Lgs. 18/2023) riconoscono l'uso del cloro come mezzo idoneo alla sanificazione, purché la concentrazione residua rientri entro limiti di sicurezza.

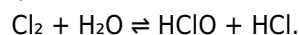
Dal punto di vista chimico, il cloro agisce principalmente sotto forma di acido ipocloroso (HClO), specie debole ma fortemente ossidante che in acqua si dissocia parzialmente in ione ipoclorito (ClO^-). L'efficacia antimicrobica è massima in un intervallo di pH compreso tra 6,0 e 7,5, dove predomina la forma molecolare non ionizzata, capace di attraversare agevolmente le membrane cellulari microbiche. A tali condizioni, la disinfezione avviene in tempi molto brevi, mentre il disinfettante residuo decade spontaneamente per volatilizzazione o per reazione con la materia organica.

Nel contesto della frutticoltura e, in particolare, dei prodotti a guscio come la castagna, il lavaggio in acqua clorata svolge un duplice ruolo: decontaminare la superficie esterna e stabilizzare l'acqua di processo, prevenendo la

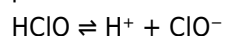
ricontaminazione incrociata. Le concentrazioni operative comunemente adottate si collocano tra 5 e 20 mg/L di cloro libero, valori che assicurano un'azione disinfettante efficace senza rischio di accumulo o alterazione del prodotto.

Principi chimici della clorazione e del decadimento del cloro

L'efficacia del cloro come disinfettante è da oltre un secolo oggetto di studio e applicazione in campo alimentare, sanitario e ambientale. Il suo comportamento chimico in acqua è noto per la rapidità delle reazioni e la transitorietà delle specie attive generate. Quando il cloro gassoso (Cl_2) o un suo sale ossidante, come l'ipoclorito di sodio (NaOCl), entra in contatto con l'acqua, avviene una reazione di idrolisi che porta alla formazione di acido ipocloroso (HClO) e acido cloridrico (HCl):



L'acido ipocloroso è la specie realmente responsabile dell'azione biocida. In soluzione acquosa, esso si dissocia parzialmente secondo l'equilibrio:



L'efficacia antimicrobica del cloro è quindi fortemente influenzata dal pH: al di sotto di 7,5 prevale la forma molecolare (HClO), più lipofila e in grado di penetrare le membrane cellulari; al di sopra di tale valore, aumenta la quota ionica (ClO^-), meno reattiva e più stabile ma di minore attività disinfettante. Questo equilibrio spiega perché i lavaggi industriali di alimenti vegetali siano condotti generalmente a pH compreso tra 6,0 e 7,0, condizione in cui l'acido ipocloroso rappresenta circa il 90% del cloro attivo disponibile.

Dal punto di vista meccanicistico, l'acido ipocloroso agisce come ossidante universale, reagendo con i gruppi funzionali delle proteine, degli enzimi e degli acidi nucleici microbici. Le principali reazioni riguardano l'ossidazione dei gruppi tiolici ($-\text{SH}$), la clorurazione delle ammine e la rottura delle catene polipeptidiche, con conseguente inattivazione enzimatica e collasso della cellula batterica. Queste reazioni avvengono in tempi dell'ordine dei secondi, soprattutto nei batteri Gram negativi, più sensibili a causa della loro membrana sottile e ricca di lipidi insaturi.

Tuttavia, il cloro è anche una molecola instabile. In acqua, subisce un naturale decadimento dovuto alla volatilizzazione e alle reazioni con sostanze inorganiche (ferro, manganese, ammoniaca) e organiche (acidi umici, proteine, zuccheri). La velocità di decadimento segue una cinetica di primo ordine e dipende dalla temperatura e dal carico organico del sistema. Onyutha e Kwio-Tamale (2022) hanno descritto come il tempo di dimezzamento del cloro libero possa ridursi da 120 minuti a 20 minuti passando da 20 °C a 40 °C. Tale instabilità, lungi dall'essere un limite, rappresenta un fattore di sicurezza, poiché impedisce l'accumulo del disinfettante o la sua persistenza nei prodotti alimentari.

Durante il lavaggio degli alimenti, il cloro disponibile viene progressivamente consumato nel reagire con la materia organica disciolta o sospesa. Questo consumo, noto come "chlorine demand", è direttamente proporzionale alla quantità di residui vegetali, polifenoli e sostanze proteiche presenti nell'acqua. Chen e Hung (2018) hanno dimostrato che la concentrazione di cloro libero si riduce del 50% nei primi due minuti di lavaggio di prodotti freschi, anche in presenza di una concentrazione iniziale di 100 mg/L, e che la quantità di sottoprodotti formati resta molto bassa.

La decomposizione finale del cloro porta alla formazione di ioni cloruro (Cl^-), ossigeno molecolare (O_2) e tracce di clorato (ClO_3^-), tutte specie chimiche stabili e non tossiche. Gil et al. (2016) hanno confermato che, in processi ben gestiti, le concentrazioni residue di clorati nei prodotti alimentari lavati restano inferiori a 0,01 mg/kg. Di conseguenza, il cloro agisce come un disinfettante istantaneo, privo di accumulo e di persistenza. La sua efficacia deriva dalla reattività estrema, ma proprio questa reattività ne limita la durata e la possibilità di interazione con la parte edule del prodotto.

Cloro nel lavaggio dei prodotti ortofrutticoli

L'applicazione del cloro nei processi di lavaggio degli alimenti vegetali risponde all'esigenza di garantire l'igiene microbiologica della superficie e di prevenire la contaminazione incrociata. L'acqua utilizzata nel lavaggio rappresenta un potenziale veicolo di diffusione di microrganismi patogeni: per questo motivo, l'aggiunta di cloro mira soprattutto a mantenere la qualità microbiologica dell'acqua, più che a sterilizzare il prodotto.

Gómez-López et al. (2014) hanno dimostrato che la concentrazione minima efficace di cloro libero per

l'inattivazione di *E. coli* O157:H7 in lavaggi dinamici di spinaci è di circa 10 mg/L. A concentrazioni superiori, l'efficacia antimicrobica non aumenta in modo proporzionale, segno che il processo è limitato dalla disponibilità di materia organica più che dalla quantità di disinfettante. Lo stesso fenomeno è stato osservato da Chen e Hung (2018) in lavaggi di lattuga e fragole, dove il mantenimento di 10 mg/L di cloro libero garantiva una riduzione di oltre 2 log dei batteri mesofili senza aumentare la formazione di sottoprodotti.

Il comportamento del cloro in questi sistemi è influenzato dalla "domanda di cloro" generata dai composti organici rilasciati dalle superfici vegetali. Il disinfettante reagisce immediatamente con queste sostanze, diminuendo la sua concentrazione attiva in tempi brevissimi. Per questo motivo, i moderni impianti di lavaggio adottano sistemi di controllo continuo dell'ossidoriduzione (ORP), regolando automaticamente il dosaggio per mantenere il livello residuo entro valori stabili e sicuri.

Gil et al. (2016) hanno osservato che i sottoprodotti di disinfezione, come clorati e trialometani, si formano solo in presenza di concentrazioni eccessive di cloro o di tempi di contatto prolungati. Nei lavaggi alimentari, in cui i tempi sono dell'ordine di pochi minuti, la loro formazione è praticamente trascurabile. Rodgers et al. (2004) hanno inoltre evidenziato che il cloro non penetra nei tessuti vegetali, ma agisce esclusivamente sulla superficie esterna, dove ossida i microrganismi e i composti organici labili.

In termini sensoriali, Delaquis et al. (2004) e Kim et al. (2019) hanno dimostrato che i trattamenti con acqua clorata o elettrolizzata non modificano colore, aroma o struttura dei prodotti, anche a concentrazioni di cloro fino a 100 mg/L. Ciò è dovuto alla rapidità della reazione e alla volatilità del disinfettante, che scompare quasi completamente durante l'asciugatura o il successivo trattamento termico.

Nel complesso, la letteratura concorda nel considerare il cloro un agente di sanificazione transitorio, che agisce in modo selettivo sulla superficie e non lascia residui persistenti. La sua efficacia dipende dal controllo della concentrazione residua, del pH e del tempo di contatto: tre variabili che, se gestite correttamente, garantiscono una disinfezione efficace e priva di effetti collaterali sul prodotto alimentare.

Residualità del cloro e comportamento nei processi termici

Il destino del cloro dopo il lavaggio è determinato da fenomeni di volatilizzazione, decomposizione e trasformazione chimica. La volatilizzazione è favorita dal calore: la solubilità del cloro gassoso in acqua diminuisce all'aumentare della temperatura, e già a 40 °C la perdita per evaporazione è significativa. Parallelamente, l'acido ipocloroso si decompone spontaneamente producendo cloruri e ossigeno.

Onyutha (2022) ha modellato la cinetica di decadimento del cloro mostrando che la costante di reazione aumenta esponenzialmente con la temperatura e che a 45 °C il tempo di dimezzamento è inferiore a 15 minuti. Ciò implica che, durante un lavaggio termico, la concentrazione di cloro attivo si riduce quasi completamente prima della fine del ciclo.

Chen e Hung (2018) hanno confermato sperimentalmente questo comportamento: nei loro test, il 90% del cloro libero iniziale si degradava entro cinque minuti di trattamento a 45 °C. Gil et al. (2016) hanno inoltre dimostrato che i clorati e i trialometani, prodotti secondari di queste reazioni, vengono distrutti dal calore e non sono più rilevabili nei prodotti sottoposti a cottura o pastorizzazione.

Nel caso dei frutti destinati a consumo cotto, come la castagna, questi fenomeni sono ulteriormente amplificati. Il riscaldamento a temperature superiori a 90 °C durante la bollitura o la torrefazione comporta la totale degradazione delle specie clorate residue. Sun et al. (2025) hanno osservato che il trattamento termico di vegetali in soluzioni disinfettanti porta alla completa eliminazione dell'acido ipocloroso e dei suoi derivati, senza alterare la composizione biochimica del prodotto.

Anche l'aspetto fisico contribuisce alla dissipazione del disinfettante: la pelatura o l'asportazione meccanica della buccia elimina lo strato superficiale eventualmente esposto al cloro, mentre la parte interna rimane completamente isolata. La presenza di polifenoli e altri antiossidanti naturali nei tessuti esterni accelera ulteriormente la decomposizione del cloro, trasformandolo in cloruri stabili.

Ne consegue che i residui di cloro o dei suoi derivati non sopravvivono alle fasi termiche successive al lavaggio. I processi di volatilizzazione, decomposizione e neutralizzazione rendono il disinfettante chimicamente inattivo e analiticamente non rilevabile sulla parte edule del prodotto.

Evidenze specifiche per il frutto di castagno

Le castagne rappresentano una matrice di particolare interesse per la valutazione del comportamento del cloro nei

processi di lavaggio, poiché combinano una superficie naturale ricca di microfessure con una struttura interna completamente isolata. La buccia esterna lignificata e il tegumento interno agiscono come doppia barriera, impedendo la penetrazione di qualsiasi composto disciolto in acqua.

Wells (1980) fu tra i primi a evidenziare l'efficacia dei trattamenti post-raccolta con acqua calda per controllare le infestazioni da insetti e muffe superficiali. Il suo studio dimostrò che immersioni a 52 °C per 15 minuti riducevano in modo significativo la carica microbica senza danneggiare la qualità sensoriale o strutturale del frutto.

Donis González et al. (2010) approfondirono questo approccio valutando sedici trattamenti differenti su castagne fresche, inclusi ipoclorito di sodio, ozono e acido peracetico. I risultati mostrarono che l'ipoclorito, alle concentrazioni di 100-200 mg/L, riduceva efficacemente le muffe del guscio senza alcun effetto negativo sulla parte edule. Gli autori notarono inoltre che il cloro non penetrava nel seme e che le sue tracce si riducevano rapidamente dopo il trattamento.

Kim, Puligundla e Mok (2019) dimostrarono che anche l'acqua elettrolizzata, contenente cloro in forma attiva fino a 490 mg/L, non modificava i parametri biochimici o sensoriali delle castagne pelate. Le analisi mostrarono un miglioramento dell'igiene superficiale accompagnato da un'invariata attività antiossidante e da un contenuto fenolico stabile.

In tutti questi studi, l'effetto del cloro è risultato confinato alla superficie del frutto. La sua decomposizione è accelerata dal contatto con la materia organica e dai polifenoli naturalmente presenti nel tegumento, che agiscono come scavenger ossidativi. Le castagne trattate con acqua clorata mostrano quindi una drastica riduzione microbica senza residui chimici misurabili.

L'insieme delle evidenze porta a una conclusione univoca: nei trattamenti post-raccolta della castagna, il cloro agisce come disinfettante di contatto e scompare rapidamente per reazioni chimiche e fisiche, senza possibilità di interazione con la parte edule.

Confronto con altre matrici alimentari

Le differenze morfologiche tra le diverse categorie di prodotti alimentari influenzano il comportamento del cloro. Nei vegetali a foglia larga, come la lattuga, la struttura porosa facilita il contatto ma non l'assorbimento del disinfettante. Lonigro, Montemurro e Laera (2017) hanno mostrato che, anche in caso di esposizione prolungata durante l'irrigazione, i livelli di cloro accumulati nei tessuti fogliari restano irrilevanti.

Nei frutti carnosi, come fragole o pomodori, il cloro agisce in superficie e si volatilizza rapidamente. Chen e Hung (2018) e Rodgers et al. (2004) hanno riscontrato residui inferiori a 0,1 mg/kg dopo il risciacquo, mentre nei prodotti a buccia spessa o a guscio, come le castagne, la penetrazione è praticamente nulla.

Le analogie con altre colture amidacee o cotte, come patate e legumi, rafforzano ulteriormente queste evidenze: in tutti i casi, il riscaldamento elimina il disinfettante e i suoi sottoprodotti. Gil et al. (2016) hanno verificato che i clorati si degradano completamente già a 60 °C.

Conclusioni

Le evidenze scientifiche disponibili delineano un quadro coerente. Il cloro è un disinfettante efficace e rapidamente degradabile, la cui azione è confinata alla superficie dei prodotti vegetali. La sua efficacia microbiologica è garantita anche a basse concentrazioni (10 mg/L), mentre la persistenza chimica è nulla in presenza di calore o materia organica.

Nel caso della castagna, la barriera fisica del pericarpo e la successiva esposizione a trattamenti termici assicurano la completa eliminazione del disinfettante e dei suoi derivati. I risultati convergono nel dimostrare che il lavaggio con acqua clorata, se condotto in condizioni controllate di temperatura e tempo, non altera la qualità nutrizionale o sensoriale del frutto e non comporta alcun rischio di residui sulla parte edule. Il cloro agisce come strumento di sicurezza transitorio e sostenibile, perfettamente compatibile con la produzione alimentare moderna.

Bibliografia

Chen, X., & Hung, Y.-C. (2018). *Development of a chlorine dosing strategy for fresh produce washing process to maintain microbial food safety and minimize residual chlorine. Journal of Food Science*, 83(6), 1701-1706. doi:10.1111/1750-3841.14189

D'Acunzo, F., Del Cimmuto, A., Marinelli, L., Aurigemma, C., & De Giusti, M. (2012). Ready-to-eat vegetables production with low-level water chlorination: An evaluation of water quality and of its impact on end products.

Annali dell'Istituto Superiore di Sanità, 48(2), 151–160.

Donis González, I. R., Fulbright, D. W., Ryser, E. T., & Guyer, D. (2010). Efficacy of postharvest treatments for reduction of molds and decay in fresh Michigan chestnuts. In G. Bounous & G. L. Beccaro (Eds.), *Proceedings of the 1st European Congress on Chestnut - Castanea 2009* (pp. 563–570). *Acta Horticulturae*, 866. doi:10.17660/ActaHortic.2010.866.76

Gil, M. I., Marín, A., Andújar, S., & Allende, A. (2016). Should chlorate residues be of concern in fresh-cut salads? *Food Control*, 60, 416–421. doi:10.1016/j.foodcont.2015.08.023

Gómez-López, V. M., Lannoo, A.-S., Gil, M. I., & Allende, A. (2014). Minimum free chlorine residual level required for the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and trihalomethane generation during dynamic washing of fresh-cut spinach. *Food Control*, 42, 132–138. doi:10.1016/j.foodcont.2014.01.034

Juhwa Kim, Puligundla, P., & Mok, C. (2019). Microbial decontamination of peeled chestnuts by electrolyzed water and its effect on biochemical and sensory properties. *Sains Malaysiana*, 48(12), 2641–2647. doi:10.17576/jsm-2019-4812-05

Lonigro, A., Montemurro, N., & Laera, G. (2017). Effects of residual disinfectant on soil and lettuce crop irrigated with chlorinated water. *Science of the Total Environment*, 584–585, 595–602. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.083

Onyutha, C., & Kwio-Tamale, J. C. (2022). Modelling chlorine residuals in drinking water: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 11613–11630. doi:10.1007/s13762-022-03924-3

Park, H., Hung, Y.-C., & Chung, D. (2004). Effects of chlorine and pH on efficacy of electrolyzed water for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes*. *International Journal of Food Microbiology*, 91(1), 13–18. doi:10.1016/S0168-1605(03)00386-2

Wells, J. M. (1980). Mycoflora and market quality of chestnuts treated with hot water to control the chestnut weevil. *Plant Disease*, 64(11), 999–1001. doi:10.1094/PD-64-999

Nicolò Passeri, Dottore Agronomo, libero professionista. Consulente per imprese agricole ed agroalimentari in ambito tecnico legale. Svolge analisi economico-estimative e di marketing dei processi produttivi. Supporta le imprese nella valorizzazione in filiera delle produzioni e nello sviluppo e dei sistemi di certificazione volontari e regolamentati. Docente presso ITS Academy Agroalimentare.

Patrizia Salusti, Tecnologo Alimentare, libero professionista. Consulente per imprese agroalimentari nell'implementazione dei sistemi di gestione per standard volontari. Svolge attività di formazione e divulgazione sui temi dell'analisi sensoriale. Collabora con enti di ricerca e università nello sviluppo e nella valorizzazione delle produzioni agroalimentari. Docente presso ITS Academy Agroalimentare.

Giulia Meccariello, Dottore Agronomo, libero professionista. Opera nel campo della certificazione in agricoltura biologica, svolgendo attività di controllo e verifica della conformità anche nell'ambito della ristorazione collettiva. Si occupa di qualità e sicurezza delle produzioni agroalimentari.