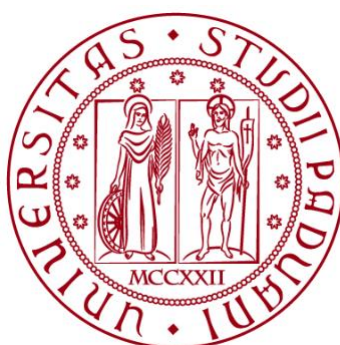


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI di LAUREA triennale

**Analisi del depuratore di Arzignano: ottimizzazione
della gestione dei fanghi e prospettive di riduzione del
carico inquinante tramite l'introduzione di pelle bio-
based**

Supervisore
Prof. Maria Cristina Lavagnolo

Studente
Sofia Maggi
matr. 2103059

Anno accademico 2025-2026

*Alla mia nonna, per avermi trasmesso il suo
amore sconfinato per lo studio ed il sapere...*

RINGRAZIAMENTI

Credo che nessun traguardo appartenga davvero soltanto a chi lo raggiunge. Dietro queste pagine ci sono anni di studio, curiosità, entusiasmo, dubbi, fatica e sogni, ma soprattutto le persone che, in modi diversi, hanno contribuito a rendermi la persona che sono oggi. Se questa tesi parla di ambiente, ricerca e desiderio di comprendere il mondo, è perché qualcuno, molto prima di me, mi ha insegnato ad amare tutte queste cose.

Alla mia mamma e al mio papà, per aver costruito attorno a me un ambiente ricco di stimoli, nel quale nulla è mai sembrato impossibile e in cui ogni sogno poteva diventare realtà con impegno, costanza e fiducia in sé stessi. Grazie per avermi dato la libertà di inseguire ciò che amo e la sicurezza di sapere che, qualunque cosa accada, ci sarete sempre.

A mio fratello Lorenzo, perché riesce sempre a restituirmi la calma quando la mia mente è in balia della tempesta, a capirmi fino in fondo senza il bisogno che io proferisca parola.

Ai miei nonni, Lina, Adolfo, Lelia e Carlo, per avermi sempre fatto sentire profondamente amata. Grazie per aver creduto in me e per avermi insegnato, ciascuno a modo proprio, il valore della famiglia, della gentilezza e delle piccole cose che contano davvero.

Ad Emma, che ormai considero una sorella. In quel piccolo appartamento di Galleria Santa Lucia 15 abbiamo affrontato giornate infinite, sessioni impossibili e momenti complicati, ma soprattutto siamo cresciute insieme. Siamo entrate da quella porta come due ragazze e ne siamo uscite persone diverse. E, tutto sommato, sappiamo che quelle due bambine, che sognavano ad occhi aperti il giorno in cui “da grandi” avrebbero vissuto assieme, sarebbero fiere di noi, anche solo per il fatto di essere riuscite a non mandare a fuoco casa.

E naturalmente a Luca, il nostro terzo coinquilino al 33,3%, che ha riempito le nostre giornate di battute, risate e leggerezza.

A Veronica, Davide e Maddalena, che mi hanno dimostrato come il tempo trascorso insieme non sia ciò che misura un'amicizia. In soli tre anni siete passati dall'essere per me perfetti sconosciuti, a diventare persone fondamentali della mia vita.

Ringrazio poi tutta quella splendida banda che è riuscita a trasformare sessioni infinite, panico pre-esame e interminabili giornate in aula studio in alcuni dei ricordi più belli di questi anni. È difficile spiegare quanto sia stato importante affrontare questo percorso insieme.

Alle mie amiche storiche e alle mie girls, che, fuori dall'università, mi hanno ricordato che esiste anche la vita oltre gli esami.

Alla mia professoressa e relatrice Maria Cristina Lavagnolo, agli ingegneri Andrea Chiorboli e Umberto Rizzato, e a Mirko Balsemin, senza il cui aiuto e tempo la scrittura di questa tesi non sarebbe stata possibile.

So, di non essere riuscita a nominare tutte le persone che, in modi diversi, hanno lasciato un segno in questo percorso. Lo spazio di queste pagine non sarebbe comunque sufficiente per ringraziare davvero ciascuno di voi. Ho la fortuna immensa di essere circondata da persone che mi vogliono bene, che credono in me e che, ogni giorno, mi ricordano quanto sia prezioso condividere il proprio cammino con gli altri. Se oggi sono qui, è anche merito vostro.

Grazie.

SOMMARIO

ABSTRACT	5
1 IL DISTRETTO CONCIARIO DI ARZIGNANO E L'IMPATTO DEI REFLUI INDUSTRIALI	6
1.1 INQUADRAMENTO SOCIOECONOMICO E FLUSSI IDRICI DELLA VALLE DEL CHIAMPO	6
1.2 LA CHIMICA DEL PROCESSO CONCIARIO TRADIZIONALE E L'USO DEL CROMO	8
1.3 GLI ATTORI DELLA GESTIONE IDRICA COLLETTIVA: ACQUE DEL CHIAMPO E IL CONSORZIO A.RI.C.A.	11
2 ANALISI INGEGNERISTICA DEL DEPURATORE E DELLA LINEA FANGHI	14
2.1 LAYOUT D'IMPIANTO: SEPARAZIONE TRA LINEA INDUSTRIALE E LINEA CIVILE.....	14
2.1.1 <i>Linea civile</i>	15
2.1.2 <i>Linea Industriale</i>	16
2.1.3 <i>Inquinanti critici per l'impianto</i>	20
2.2 CRITICITÀ DELLA LINEA FANGHI	21
3 NUOVE TECNOLOGIE PER LA GESTIONE DEI FANGHI.....	24
3.1 IL BANDO DEL 2017 PER IL RECUPERO TERMICO	24
3.2 IL GASSIFICATORE	28
3.2.1 <i>Gassificatore e cromo</i>	28
3.2.2 <i>Gassificatore e PFAS</i>	29
3.2.3 <i>Autosostentamento dell'impianto</i>	30
4 STRATEGIE DI RIDUZIONE ALLA FONTE: SOSTITUZIONE CON BIOMATERIALI FUNGINI	31
4.1 MATERIALI SOSTITUTIVI DELLA PELLE	31
4.2 CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-FISICA DELLO SCARICO DI UNA CONCERIA TIPO	33
4.3 CARATTERIZZAZIONE DEI REFLUI GENERATI DAI PROCESSI DI CONCIA DELLA BIOMASSA FUNGINA.....	34
4.3.1 <i>Ganoderma lucidum con concia a genipina</i>	34
4.3.2 <i>Ganoderma lucidum con concia minerale</i>	37
4.3.3 <i>Reishi™</i>	39
4.4 SCENARIO DI CONVERSIONE PARZIALE (20%)	44
5 CONCLUSIONI.....	46
6 DICHIARAZIONE UTILIZZO INTELLIGENZA ARTIFICIALE.....	48
7 INDICE DELLE FIGURE	49
8 BIBLIOGRAFIA	50

ABSTRACT

L'industria conciaria rappresenta un pilastro economico fondamentale per il distretto della Valle del Chiampo, ma comporta sfide ambientali complesse, in primis la gestione degli ingenti carichi idrici e dei fanghi di supero.

Il presente elaborato analizza lo schema dell'impianto di depurazione consortile di Arzignano, gestito da Acque del Chiampo S.p.A., con l'obiettivo di valutare soluzioni ingegneristiche per l'ottimizzazione della linea fanghi e la riduzione del carico inquinante alla fonte.

Gli approcci affrontati sono due:

- implementazione di nuove strutture che si occupino dello smaltimento dei fanghi di supero prodotti
- modifica delle caratteristiche quantitative/ qualitative del carico in entrata all'impianto, con conseguente modifica delle caratteristiche del fango.

Per il primo approccio, viene proposta un'analisi di fattibilità teorica per l'introduzione di un processo di gassificazione: si evidenzia come tale tecnologia, operando in condizioni sub-stechiometriche, possa da un lato prevenire l'ossidazione del cromo trivalente a cromo esavalente tossico, e dall'altro, tramite un'architettura a doppio stadio, garantire la distruzione termica dei composti perfluoroalchilici (PFAS), consentendo parallelamente il recupero energetico tramite syngas.

Per il secondo approccio, si esplora una strategia di riduzione alla fonte, simulando gli effetti dell'introduzione di biomateriali fungini in parziale sostituzione (20%) della pelle bovina tradizionale. Attraverso l'analisi comparativa di processi di concia applicati a pelli alternative (micelio con concia alla genipina, micelio con concia minerale e materiale commerciale Reishi™), si stima una riduzione del carico idraulico industriale tra il 16% e il 20%.

Lo studio conclude come tale transizione azzererebbe l'immissione di metalli pesanti e solfuri per la quota convertita, e ridurrebbe notevolmente lo sfruttamento idrico.

1 IL DISTRETTO CONCIARIO DI ARZIGNANO E L'IMPATTO DEI REFLUI INDUSTRIALI

1.1 Inquadramento socioeconomico e flussi idrici della Valle del Chiampo

La storia della Valle del Chiampo è, prima di tutto, una storia d'acqua.

È l'acqua che ha modellato il territorio, sostenuto il suo sviluppo economico e accompagnato le principali trasformazioni produttive che, nel corso del Novecento, hanno reso questa valle uno dei distretti manifatturieri più importanti d'Europa. Per anni fu l'industria della seta a trovare lungo il torrente Chiampo le condizioni ideali per svilupparsi: filande, mulini e opifici sorsero grazie a una risorsa tanto abbondante quanto indispensabile. La crisi dell'industria tessile, con la chiusura dell'ultima filanda di Arzignano, avvenuta nel 1968, segnò simbolicamente la fine di un'epoca e il definitivo insediamento del settore conciario.

Nel giro di pochi decenni la Valle del Chiampo passò dall'ospitare poche realtà artigianali a diventare un sistema produttivo composto da centinaia di concerie, evolvendosi progressivamente verso una struttura industriale altamente specializzata. Nel 1991, su una popolazione di circa 90.000 abitanti, oltre 8.000 persone risultavano occupate nel settore della concia, simbolo del ruolo centrale assunto da questa attività nello sviluppo economico e sociale del territorio.

Oggi il distretto rappresenta il principale polo italiano per la produzione di pelli bovine di grandi dimensioni destinate ai settori della calzatura, della pelletteria, dell'arredamento e del automotive, ed è stato formalmente riconosciuto dalla Regione Veneto come distretto manifatturiero nel 2014 (Balsemin, 2025)

Alla base di questo successo vi è sempre stata la stessa protagonista: l'acqua. Migliaia di litri sono necessari per trasformare una pelle grezza nel materiale destinato alla produzione di scarpe, borse, cinture, arredamenti e numerosi altri manufatti. L'acqua ha rappresentato, allo stesso tempo, la principale risorsa su cui si è fondato il benessere della valle e l'elemento naturale maggiormente sfruttato dalla sua rapida industrializzazione.

Lo sviluppo economico del distretto è stato infatti accompagnato da un intenso impatto ambientale sui corsi d'acqua locali. Si trova emblematico ricordare Antonio Boscardin, insegnante di Applicazioni Tecniche presso la scuola media di Arzignano, che tra il 1970 e il 1985 coinvolse i propri studenti nel monitoraggio sistematico del torrente Chiampo. Attraverso osservazioni dirette, rilievi rudimentali del pH e dei solidi sospesi, fotografie e mappature, le loro relazioni rappresentano ancora oggi una preziosa testimonianza di una fase storica in cui la crescita industriale e la tutela ambientale apparivano profondamente sbilanciate. (Fracasso, 2010)

Negli anni successivi il territorio ha intrapreso un importante percorso di cambiamento. La realizzazione del depuratore di Arzignano, seguita dall'entrata in funzione del collettore ARICA e dal continuo sviluppo di tecnologie depurative sempre più efficienti, ha consentito di ridurre progressivamente gli impatti ambientali.

Nella Valle del Chiampo, tuttavia, resta un equilibrio complesso: da una parte un patrimonio produttivo, economico e tecnologico che costituisce una risorsa fondamentale per il territorio; dall'altra la necessità di ridurre ulteriormente il consumo di risorse naturali e il carico inquinante associato ai processi produttivi.

È proprio all'interno di questa prospettiva che si inserisce il presente elaborato. L'obiettivo della tesi è analizzare l'attuale trattamento delle acque, e fornire possibili spunti per la risoluzione di ciò che tutt'ora è un importante problema: la gestione dei fanghi.

1.2 *La chimica del processo conciario tradizionale e l'uso del Cromo*

Per poter affrontare l'analisi che questo elaborato si propone, si ritiene necessario analizzare di seguito le fasi dell'intero processo chimico e meccanico di lavorazione della pelle.

1. Conservazione e Operazioni Preliminari (Hide and skin storage and beamhouse operations)
 - Rifilatura (Trimming): taglio di alcune parti periferiche di cuoio e pelle, come zampe, code, muso, mammelle, ecc.
 - Conservazione e stoccaggio (Curing and storage): impiega sale (NaCl) e biocidi (sostanze chimiche per distruggere organismi biologici dannosi) impiegati per evitare la degradazione.
 - Rinverdimento (Soaking): fase di lavorazione della pelle, volta a farle assorbire l'acqua persa e a ripulirla. Le acque reflue presentano un elevato carico di BOD, COD, solidi sospesi (SS). Si rinvergono anche sali, azoto organico, composti organici alogenati assorbibili (AOX), tensioattivi e biocidi.
2. Lavorazioni di Riviera o Calcinaio (Beamhouse operations)
 - Scarnatura (Fleshing): raschiatura meccanica del materiale organico in eccesso dalla pelle. Rilascia reflui ricchi di BOD, COD, grassi, tessuti connettivi e carne.
 - Depilazione e Calcinazione (Liming and unhairing): rimuove il pelo, l'epidermide e, in una certa misura, le proteine interfibrillari. Gli scarichi contengono forti concentrazioni di solfuri (NaHS or Na₂S), calce, BOD, COD, solidi sospesi, azoto organico, tensioattivi e pH molto elevato (12-13).
 - Spaccatura in trippa (Lime splitting): genera residui di croste e ritagli;
 - Decalcinazione e Macerazione (Deliming and bating): graduale abbassamento del pH (mediante lavaggio in acqua dolce o con soluzioni acide deboli o con sali come il cloruro o il solfato d'ammonio o l'acido borico), aumento della temperatura e rimozione dei prodotti chimici residui e dei componenti della pelle degradati, con successiva pulizia enzimatica per dare elasticità e morbidezza. Le acque reflue contengono sali di calcio (solfati), azoto ammoniacale (NH₄-N), solfuri residui, BOD, COD, proteine degradate ed enzimi.
3. Concia (Tanyard operations)
 - Sgrassaggio (Degreasing)
 - Piclaggio (Pickling): trattamento della partita macerata con una soluzione di acido solforico e cloruro di sodio. Eseguito per ridurre il pH della pelle prima della concia minerale e di alcune conce organiche, sterilizzando così la pelle, ponendo fine all'azione di macerazione e migliorando la penetrazione del successivo materiale conciante. Il pH del mezzo viene mantenuto intorno a 3,5.
 - Concia (Tanning): le fibre collagene vengono stabilizzate dall'azione di reticolazione degli agenti concianti. Dopo la concia, i cuoi o le pelli non sono soggetti a putrefazione, e la loro stabilità dimensionale, la resistenza all'azione meccanica e la resistenza al calore aumentano.

Esiste un'ampia varietà di metodi e materiali di concia: conce minerali, tannini vegetali (detta concia al vegetale), tannini sintetici, aldeidi, concia all'olio. L'agente conciante più comunemente utilizzato è il solfato basico di cromo ($\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$). Un'elevata percentuale (80 – 90%) di tutta la pelle prodotta oggi è conciata utilizzando sali di cromo(III). Il cromo esavalente (cromo(VI)), al contrario, non viene utilizzato nel processo di concia e non ha alcun effetto conciante. La possibile formazione di cromo(VI) nella pelle durante la sua produzione dipende dagli effetti sinergici di diversi componenti.

- Messa a vento e Pressatura (Draining, samming and setting): le acque di spremitura contengono residui degli agenti concianti utilizzati nel passaggio precedente.
- Spaccatura e Rasatura (Splitting & Shaving): sono processi meccanici che generano scarti solidi (ritagli e rasature) contenenti sostanze concianti e polveri/particolato, specialmente se la rasatura viene effettuata a secco.

4. Operazioni Post-concia (Post-tanning operations / Wet finishing)

- Neutralizzazione (Neutralisation): viene alzato il pH. Scarichi idrici contenenti solidi sospesi, BOD, COD e residui di agenti concianti. Si può verificare il rilascio di ammoniaca nell'aria.
- Riconcia (Retanning): migliora ulteriormente la pienezza e resistenza, utilizzando nuovamente tannini, cromo o resine
- Tintura (Dyeing): Colorazione delle pelli all'interno di bottali rotanti. Provoca un'alta colorazione dei reflui idrici e immette scarichi con solventi organici, ammoniaca (NH_3), composti alogenati (AOX) e fenoli.
- Ingrassio (Fatliquoring): applicazione di oli e grassi per garantire morbidezza, impermeabilità e resistenza nel tempo.
- Asciugaggio / Essiccazione (Drying): Richiede ingente energia e genera calore, possibili fumi acidi e, in alcuni casi, esalazioni di biocidi usati per proteggere il cuoio o formaldeide.

5. Rifinitura (Finishing)

- Lavorazioni Meccaniche (Milling, buffing, staking, ecc.): Sprigionano grandi quantità di polveri sottili e particolato di cuoio nell'ambiente di lavoro e verso l'esterno, rendendo necessari sistemi di filtrazione ad aria o a umido, e causano inquinamento acustico.
- Copertura o Applicazione del Film (Coating): Prevede l'uso di lacche, solventi e leganti. Rappresenta la principale fonte di Composti Organici Volatili (VOC) per via dell'impiego di solventi chimici o aerosol generati dagli spray. Rilascia scarti pericolosi (fanghi da verniciatura, resine e metalli pesanti), nonché possibili emissioni di formaldeide impiegata come agente fissante.
- Rifilatura finale (Final Trimming): Genera scarti e frammenti di pelle finita (con o senza laccatura di rifinitura).

(Black, et al., 2013)

Le concerie del distretto di Arzignano gestiscono il passaggio della pelle dallo stato grezzo fino al prodotto finito, ma non tutte si occupano del processo completo, o della medesima sezione di processo.

Alcune aziende, ad esempio, lavorano dal grezzo fino al prodotto intermedio come:

- Wet Blue: pelle che è stata sottoposta ai processi di calcinazione e di concia al cromo, assumendo di conseguenza una caratteristica colorazione blu e venendo mantenuta in stato umido, trasportabile e immagazzinabile
- Wet White: pelle che, dopo la fase di calcinazione, viene conciata utilizzando agenti esenti da cromo (come ad esempio aldeidi, sali di alluminio, titanio o sintani). A causa dell'assenza di cromo, la pelle mantiene una colorazione biancastra e si presenta in stato umido. Analogamente al wet blue, rappresenta un prodotto intermedio che può essere immagazzinato per un periodo limitato oppure commercializzato.

Altre partono dal semilavorato (Wet Blue) per arrivare al finito.

Altre ancora lavorano fino al crust leather: cuoio (o pelle) che, dopo le fasi di concia, riconcia, tintura e ingrasso, è stato semplicemente essiccato, senza aver ancora subito ulteriori processi di rifinizione superficiali.

Infine, una piccola categoria si focalizza sul solo rinverdimento (soaking).

(Team tecnico Acque del Chiampo, 2026)

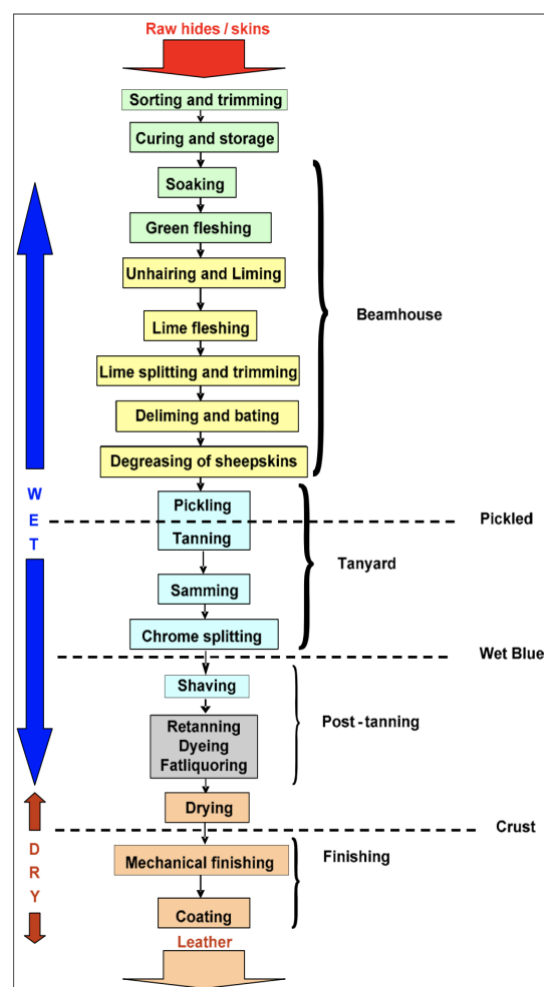


Figura 1.2.1: step di processo concia al cromo (Black, et al., 2013)

Arica – Aziende Riunite Collettore Acque è il Consorzio che gestisce per conto della Regione Veneto il collettore delle acque dei cinque impianti di depurazione del Vicentino: Trissino, Arzignano, Montebello, Montebello e Lonigo.

Costituito nel 2000 per iniziativa delle società di servizio idrico integrato della zona, ora Viacqua, Acque del Chiampo e Medio Chiampo, il Consorzio Arica non si limita ad assicurare la gestione dell'impianto di canalizzazione, ma rappresenta l'ente di monitoraggio del rispetto dei limiti di stabiliti per le acque conferite dagli impianti di depurazione e agisce per farli osservare. (A.Ri.C.A., 2026)

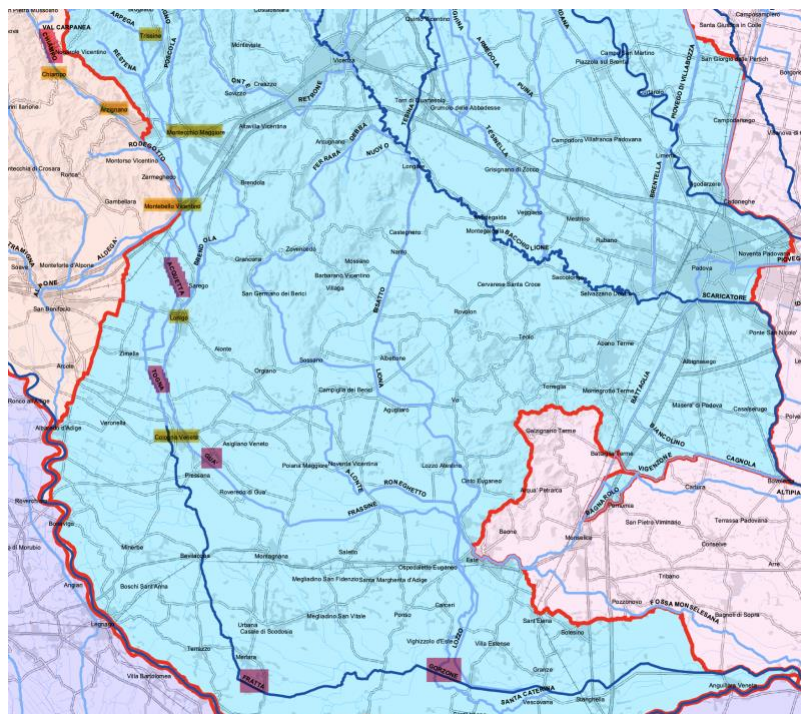


Figura 1.3.2: zoom su contesto Chiampo – Togna – Fratta - Gorzone

Nel 2000 Arica ha attivato un primo tronco del Collettore, con recapito a Bagnolo di Lonigo (VI), dotato già dall'anno successivo di un impianto di disinfezione centralizzato. Anche quest'ultimo ricettore però, a causa della variazione di temperature e precipitazioni degli ultimi anni, presentava portate sempre più modeste e nel 2007 il Consorzio ha messo in funzione un secondo tronco, portando così i reflui a monte di Cologna Veneta (VR) (Figura 1.3.3), oltrepassando quindi la zona di ricarica degli acquiferi e inserendo a monte dello scarico un impianto di disinfezione a raggi UV, il quale è composto da due linee di trattamento affiancate per un totale di 936 lampade UV. Accanto alla disinfezione primaria con raggi UV è presente un impianto secondario di disinfezione ad acido peracetico, ma poiché la disinfezione comporta l'aggiunta di sostanze chimiche e quindi un aumento di taluni parametri ossigeno (es. COD), questo impianto interviene a supporto del sistema primario a raggi UV solo quando necessario. È ora in programma un'ulteriore estensione della canalizzazione, per raccogliere anche le acque del depuratore di Cologna, con l'obiettivo di collegare lo scarico del depuratore di Cologna Veneta nel sistema collettore e dunque imporre così al Fratta un'unica fonte di pressione composta da scarichi di depuratori pubblici con maggiore possibilità di controllo e di intervento con azioni congiunte. (A.Ri.C.A., 2026)

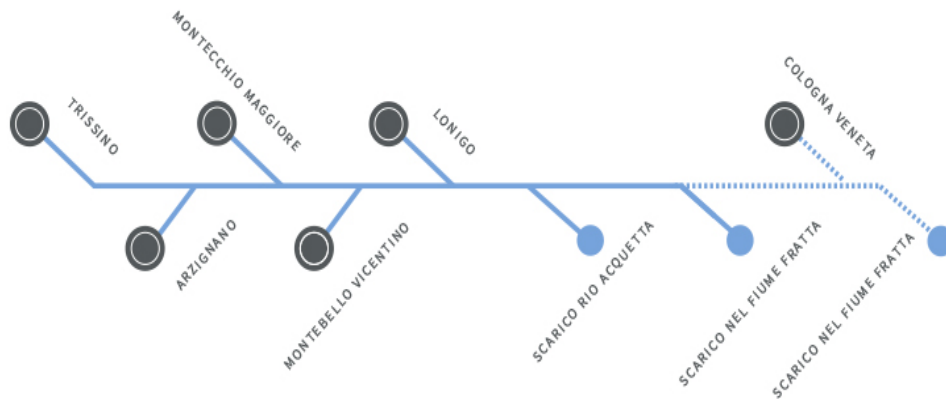


Figura 1.3.3: canalizzazione collettore Arica (A.Ri.C.A., 2026)

La portata del Collettore varia sia in ragione dell'andamento delle attività industriali allacciate alle fognature afferenti agli impianti di depurazione, sia della variabilità meteorologica, che condiziona i volumi dei reflui civili. In media, negli ultimi tre anni è stata di circa 90.000 m³/giorno tra acque reflue urbane e industriali, con potenzialità per oltre 2.200.000 abitanti equivalenti. Il contributo idraulico dei vari impianti collettati è circa del 24% per l'impianto di Trissino, del 44% per l'impianto di Arzignano, del 7% per l'impianto di Montecchio Maggiore, del 15% per l'impianto di Montebello Vicentino e del 10% per l'impianto di Lonigo.

Oggi, nel suo complesso, il Collettore si estende per oltre 32 Km e raggiunge in diametro, nel suo punto massimo di 1600 mm. (A.Ri.C.A., 2026)

2 ANALISI INGEGNERISTICA DEL DEPURATORE E DELLA LINEA FANGHI

2.1 *Layout d'impianto: separazione tra Linea Industriale e Linea Civile*

All'interno dell'impianto di depurazione di Arzignano vengono trattati i liquami provenienti da circa 130 aziende allacciate attraverso la fognatura industriale, e quelli provenienti dalle fognature civili di 7 dei 10 comuni della vallata.

Il depuratore ha una potenzialità di 1.633.000 abitanti equivalenti, una portata media giornaliera di 40.000 m³/giorno e un'area servita di 124 km², ed il carico in entrata è costituito per il 90% da reflui industriali, provenienti dalle concerie, e per il 10% da reflui civili: la linea civile viaggia su una fognatura separata. (Acque del Chiampo, 2026)

L'indirizzo strategico indicato dagli amministratori dell'epoca e dagli industriali Arzignanesi negli anni '70 di un depuratore centralizzato ad Arzignano per la linea industriale, si è dimostrato essere lungimirante: permette una significativa riduzione degli impatti ambientali sul territorio e consente, dal punto di vista economico, di sostenere i costi per l'adozione di tecniche avanzate, di un maggior numero di esperti e di maggior controllo, rispetto all'approccio di sistemi di depurazione minori e interni alle singole concerie. Altrettanto lungimirante fu la scelta del materiale della fognatura industriale, che ne permette il perfetto funzionamento ancora oggi: la rete di collettori, per una lunghezza di circa 40 chilometri, è realizzata in polietilene, materiale che resiste ottimamente all'aggressione delle sostanze chimiche contenute nei reflui industriali e garantisce una perfetta tenuta idraulica. (Team tecnico Acque del Chiampo, 2026)

2.1.1 Linea civile

Come si è già anticipato, nel depuratore di Arzignano la linea civile è separata dalla linea industriale, in quanto presenta caratteristiche chimico-fisiche alquanto differenti.



Figura 2.1.1: vista dall'alto depuratore di Arzignano con linea civile in rosso (Acque del Chiampo, 2026)

Come è possibile osservare in figura 2.1.1., la linea civile, evidenziata in rosso, è nettamente inferiore alla linea industriale, e si compone di:

1. Pretrattamento con due sezioni di grigliatura e successiva dissabbiatura con sedimentazione discreta, uguali, e in grado di trattare una portata influente di 1300 m³/h ciascuna
2. Tre vasche di prima pioggia del volume di 800 m³ ciascuna, che entrano in funzione in caso di elevato afflusso durante le piogge, per accogliere la portata eccedente i primi 5 mm di pioggia.
3. Non è presente sedimentazione primaria e il refluo pretrattato è inviato alla pre-denitrificazione, dove i batteri eterotrofi facoltativi riducono il nitrato, in presenza di carbonio organico, prima a nitriti NO₂⁻ e poi ad azoto gas N₂. Qui i nitrati vengono inseriti tramite ricircolo dalla successiva vasca biologica di aerazione dove si formano.
4. Si passa a questo punto alla vasca biologica a fanghi attivi, dove avvengono ossidazione e nitrificazione.
5. Segue la sedimentazione secondaria, composta da due vasche di volume pari a 1100 m³ ciascuna, per separare per gravità il fango attivo dall'acqua depurata.
6. Una percentuale dell'acqua depurata viene, a questo punto, raccolta in vasca per il riutilizzo interno a scopo industriale, per raffreddare motori, o abbattere le schiume.
7. La restante portata d'acqua depurata viene fatta confluire con l'acqua industriale depurata e viene inviata a monte della sezione di chiariflocculazione dove attraverso precipitazione chimica con uso di sali quali cloruro ferrico, policloruro di alluminio e flocculanti organici come polielettroliti sono rimosse le ultime torbidità, separando sostanze di tipo colloidale, e abbattendo ulteriormente il cromo e il fosforo residuo.

(Acque del Chiampo, 2026) (Team tecnico Acque del Chiampo, 2026)

2.1.2 Linea Industriale

Si passa ora a trattare le unità che costituiscono lo schema di trattamento della linea industriale di Arzignano.



Figura 2.1.2: vista dall'alto depuratore di Arzignano con numeri in blu per la linea industriale (Acque del Chiampo, 2026)

Come è possibile osservare nella figura 2.1.2, nella quale i numeri corrispondono all'unità di seguito trattata, l'impianto è articolato in:

1. Grigliatura: due griglie automatiche subverticali a tappeto autopulente di larghezza 2 m e spaziatura 6 mm permettono l'eliminazione dei materiali grossolani mediante filtrazione convenzionale. Il materiale asportato viene compattato e condotto a gestione rifiuti.
2. Dissabbiatura, che avviene in dissabbiatori circolari tipo "a pista". La sabbia si viene a sedimentare sul fondo, all'interno della tramoggia centrale posizionata ad un livello più basso rispetto alla pista, dalla quale è poi estratta con air-lift ed inviata ad un classificatore a coclea per la separazione solido/liquido. Qui una grande vite senza fine (coclea) pesca le sabbie e le trascina verso l'alto lungo il piano inclinato: durante questa lenta risalita fuori dall'acqua la sabbia cede l'acqua in eccesso. Le sabbie sono raccolte in big-bag tal quali, (no essiccazione), e vengono inviate a recupero.



Figura 2.1.3: coclee (Archivio di Acque del Chiampo S.p.A. Società Benefit, 2026)

3. Omogeneizzazione: consiste nell'equalizzazione del refluo prima dei trattamenti successivi. Negli anni '90, un'indagine ha individuato che i forti odori avvertiti nel territorio derivavano dal rilascio di acido solfidrico dalle vasche di omogeneizzazione dell'impianto. Negli anni successivi il progetto Giada con Arpav ha permesso di monitorare le emissioni di COV e solfuri, riscontrandone una progressiva riduzione, probabilmente dovuta alle modifiche apportate dalle concerie alle ricette di processo utilizzate. L'impianto di Acque del Chiampo, in questo contesto, ha contribuito investendo nella copertura di tutte le vasche e in sistemi di aspirazione e trattamento dei gas aspirati. L'omogeneizzazione avviene dunque ora in un totale di 5 vasche circolari, coperte, di 44 m di diametro e 7000 m³ di volume e di 1 vasca di diametro 40 m e 6000 m³ di volume: tutte dotate di ponte raschiatore sul fondo ed aspirazione dei gas odorigeni.
4. Trattamento odori: per il trattamento dell'aspirato è stata impiegata una tecnologia del settore petrolchimico. I gas odorigeni contenenti acido solfidrico aspirati dalla omogeneizzazione, grigliatura, fognatura, canali di trattamento reflui, sedimentazione primaria, ispessitori e reattori fanghi liquidi, sono trattati in una sezione composta da 2 colonne a letto fluidizzato dove, mediante colonna di stripping con processo catalitico denominato LO-CAT© si ottiene zolfo dall'eliminazione dell'acido solfidrico. Successivamente i gas sono ulteriormente trattati in un biofiltro. Lo zolfo viene poi separato dalla soluzione mediante filtrazione con sacchi tessili, e venduto in big-bag al settore dell'agricoltura, dove è impiegato come fertilizzante.
5. Sedimentazione primaria: avviene in 6 vasche rettangolari, per un volume complessivo di 5760 m³, equipaggiate di ponti raschiafango. Qui avviene la sedimentazione e separazione della maggior parte del fango contenuto nei reflui.
6. Pre-denitrificazione e ossidazione/nitrificazione biologica:
Come molti altri depuratori, inizialmente l'impianto operava tramite un trattamento chimico-fisico, il quale comportava elevati costi di gestione e un'elevata produzione di fanghi. Negli anni, con l'evolversi delle tecnologie di gestione sanitaria ambientale, Acque del Chiampo ha investito nel passaggio al sistema biologico. Attualmente si hanno 2 linee biologiche separate, di volume complesso 130.000 m³, che si compone in:
 - i) pre-denitrificazione: vasca dove i batteri eterotrofi facoltativi riducono il nitrato, in presenza di carbonio organico prontamente disponibile, e in assenza di O₂, ad azoto gas N₂. I nitrati vengono qui forniti tramite ricircolo della miscela areata dalla successiva vasca di ossido-nitrificazione tramite coclee nella linea 1 e pompe sommergibili nella linea 2.
 - ii) ossidazione/nitrificazione biologica: il processo è a fanghi attivi con rimozione del carbonio e dell'azoto attraverso microrganismi aerobici. I batteri eterotrofi aerobici ossidano la S.O. in CO₂ che viene poi utilizzata dai batteri autotrofi come fonte di carbonio nel loro metabolismo di nitrificazione, in cui viene ossidato l'azoto ammoniacale FSA (Free and Saline Ammonia) in nitriti e poi in nitrati. Qui l'aria è insufflata tramite strutture con telaio a cono di altezza 6 m. L'aria esce dalla base del telaio, mentre gli agitatori al loro interno muovono le masse d'acqua.
È estremamente importante che ci sia abbastanza ossigeno per entrambi i microrganismi eterotrofi e autotrofi (entrambi aerobi). Vengono dunque monitorate

in continuo sia la concentrazione di ossigeno disciolto, che l'ammoniaca e l'azoto nitrico.

7. Flottazione: questa è una delle caratteristiche distintive dell'impianto. Solitamente i fanghi della vasca biologica vengono rimossi attraverso sedimentazione secondaria, ma i fanghi attivi generati dai reflui della concia, essendo carichi di grassi e molto leggeri, sono difficilmente sedimentabili: l'età del fango è infatti elevata, c'è una forte presenza di batteri filamentosi e spesso si cade nel bulking. La flottazione permette di risolvere il problema; la separazione dei fanghi attivi dal liquame depurato avviene dunque, previa aggiunta di un flocculante organico (polielettrolita), nella fase di flottazione ad aria disciolta pressurizzata. È composta da 4 bacini circolari del diametro ciascuno di 20,8 m e una superficie totale di 1330 m², con volume di circa 3500 m³. Ogni bacino è provvisto di 2 cucchiaini di raccolta del fango flottato superficiale e di raschie di fondo.



Figura 2.1.4: flottazione (Archivio di Acque del Chiampe S.p.A. Società Benefit, 2026)

8. Ozonizzazione: realizzata in seguito agli accordi di programma del 2005, colpisce le pareti cellulari disintegrando con conseguente distruzione diretta delle popolazioni microbiche, inoltre deodorizza e decolora. L'ozonizzazione permette infine la precipitazione e dunque rimozione del cromo, il quale è solitamente legato a tensioattivi, coloranti, tannini sintetici o ausiliari chimici che fungono da ligandi e ne impediscono la sedimentazione.
Bisogna ricordare che l'ozono, essendo una molecola estremamente instabile, necessita di essere prodotto in impianto attraverso l'utilizzo di scariche elettriche: ne consegue che un impianto del genere ha un'elevatissima richiesta di risorse.
9. Chiariflocculazione: qui l'acqua depurata industriale viene unita a quella civile e trattata con trattamento di tipo terziario mediante l'aggiunta di coagulanti e flocculanti che migliorano la qualità dell'acqua depurata allo scarico separando sostanze di tipo colloidale, e abbattendo ulteriormente il cromo e il fosforo residuo. Il trattamento finale avviene nei due bacini di chiariflocculazione del diametro di 36 m superficie di 1000 m², per un volume di circa 5000 m³ cadauno con uso di sali quali cloruro ferrico, policloruro di alluminio e flocculanti organici come polielettroliti. Qui le canalette di estrazione acqua depurata sono poste a raggiera al di sotto dello sfioro, in modo tale da non incorporare all'interno i fanghi superficiali. (Acque del Chiampe, 2026) (Team tecnico Acque del Chiampe, 2026) (Lavagnolo, 2026)

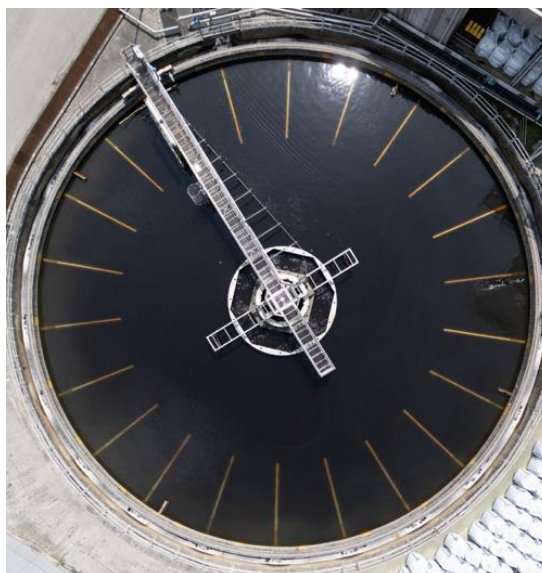


Figura 2.1.5: chiariflocculazione (Archivio di Acque del Chiampo S.p.A. Società Benefit, 2026)

2.1.3 Inquinanti critici per l'impianto

Necessario spendere qualche parola per alcuni inquinanti di particolare rilievo.

Quando si parla di concerie, non si può non parlare di cromo: dal 2013 si è osservata una progressiva diminuzione delle concentrazioni di cromo in ingresso all'impianto, segno di un miglioramento dei processi industriali a monte. La sua presenza è attentamente monitorata: il cromo esavalente in decine di migliaia di monitoraggi non è mai stato rilevato, infatti, al contrario del trivalente, esso non ha alcun potere conciante. Il limite normativo allo scarico fissato per il cromo è di 2 mg/l. Ma per decenni nella Valle del Chiampo gli scarichi concianti sono confluiti direttamente nei corsi d'acqua, causando accumuli di cromo e colorazioni anomale nei sedimenti fluviali. Essendo dunque ora i letti dei fiumi impregnati di cromo, per permetterne la naturale autodepurazione si è cercato di abbassare a 0.7 mg/l la concentrazione di cromo immesso. Ad oggi Acque del Chiampo scarica allo 0,3 mg/l.

Altro motivo di preoccupazione sono i cloruri e i solfati: questi inquinanti rimangono critici perché le tecnologie di depurazione attuali non riescono a ridurli in modo efficace. La soluzione risiede nel limitarne l'impiego a monte, modificando i processi direttamente all'interno delle concerie. Ad oggi il limite dei solfati per legge sarebbe 1000 mg/l ma deroghe alla vallata consentono di scaricare leggermente di più.

Nella Tabella 2.1.1 si riassume le concentrazioni in input e in output all'impianto di depurazione di Arzignano.

(Team tecnico Acque del Chiampo, 2026)

Tabella 2.1.1: input e in output all'impianto di depurazione di Arzignano

Parametro	Input (Entrata)	Output (Uscita)	Note / Limiti
COD	6.000 mg/l	100 mg/l	
Cloruri	1800 mg/l	1400 mg/l	
Solfati		Scarico in deroga in quanto non abbattibili al depuratore	Limite di legge a 1000 mg/l.
Cromo	70 mg/l	0,3 mg/l	
Azoto / Ammoniacca	4000 mg/l	0	
Solidi Sospesi	2000 mg/l	10 mg/l	

2.2 Criticità della Linea Fanghi

Si è osservato lo schema della linea civile e industriale: da queste unità provengono i fanghi, che andranno trattati e gestiti.

I fanghi provenienti dal ciclo di trattamento delle acque sono composti per 2/3 in termini di sostanza secca dai fanghi depositatisi sul fondo della sedimentazione primaria, che sono costituiti per lo più dalle sostanze solide già presenti nelle acque scaricate dalle concherie, e per 1/3 dai fanghi estratti dall'impianto biologico, quest'ultimi costituiti per gran parte dalla crescita cellulare avvenuta nel processo biologico.

La linea fanghi si articola in:

1. Ispessimento fanghi

Accumulo ed omogeneizzazione dei fanghi primari e biologici in due vasche da 1000 m³ cadauna dotate di agitatori e ponte raschiafango.

2. Disidratazione fanghi

Il processo avviene meccanicamente impiegando, a necessità, 4 filtropresse:

- due linee con 90 piastre da 1500 x 1500 mm, per una potenzialità nominale ciascuna di 20 ton secco/giorno
- due linee di filtropresse ciascuna con 90 piastre da 2000 x 2000 mm, per una potenzialità nominale ciascuna di 34 ton secco/giorno.

A queste si aggiungono poi 2 linee dotate di decanter centrifugo con potenzialità nominale ciascuna di 24 ton secco/giorno.

3. Silos stoccaggio fanghi

Il fango in forma palabile ottenuto dalle macchine di disidratazione viene inviato, a mezzo di coclee e redler, in due silos di stoccaggio verticali del volume di circa 100 m³ ciascuno, da cui viene prelevato per alimentare il successivo reparto di essiccamento termico dei fanghi.



Figura 2.2.1: silos fango essiccato e big-bags (Archivio di Acque del Chiampo S.p.A. Società Benefit, 2026)

4. Essiccazione fanghi

Nel reparto di essiccamento sono attualmente in funzione 4 linee:

- 2 linee a riscaldamento diretto a mezzo di una corrente di aria/fumi caldi, prodotti dalla combustione di metano mediante un bruciatore in linea. In esse il

fango disidratato viene miscelato con fango essiccato, fino a rendere il materiale in condizioni fisiche da essere trasportato mediante una corrente d'aria calda, la quale è costituita da una miscela fra i fumi di combustione e una parte dell'aria ottenuta dalla condensazione successiva e riciclata nel tamburo di essiccazione. La capacità evaporativa teorica di ciascuna linea è di 4000 l/h di acqua.

- 2 linee costituite da essiccatori di tipo a riscaldamento indiretto a film sottile, in cui il riscaldamento è dato dallo scambio termico con una parete riscaldata da olio diatermico, a sua volta riscaldato all'interno di una caldaia per linea alimentata a gas metano. La capacità evaporativa teorica di ciascuna linea è di 2575 l/h di acqua.

5. Cogenerazione

L'impianto di essiccamento dei fanghi è abbinato ad un impianto di cogenerazione, composto da quattro motori a gas della potenza di 1305 kWe cadauno, i quali, mediante combustione di gas metano di rete, producono energia elettrica, utilizzata per il funzionamento delle apparecchiature dell'impianto di depurazione, mentre il calore dell'acqua di raffreddamento e dei gas combusti, viene recuperato per preriscaldare l'aria necessaria all'essiccamento dei fanghi.

6. Discarica

I fanghi prodotti dall'impianto di depurazione vengono conferiti in discarica. I fanghi essiccati sono contenuti in big-bag in polipropilene del volume di circa 1,5 m³ per agevolare le operazioni di trasporto e contenimento delle polveri e odori. Attualmente Acque del Chiampe è proprietario di 8 discariche e ne gestisce una nona di proprietà del comune di Arzignano. Di queste solo una è ancora operativa.

Le discariche si trovano per la maggior parte lungo via dell'Industria ad Arzignano. Oggi ospitano quasi tutte piante ad alto fusto, ad eccezione della discarica adiacente all'impianto di depurazione, la quale è stata utilizzata per realizzare un impianto fotovoltaico.

(Acque del Chiampe, 2026)



Figura 2.2.2: discarica con alberi ad alto fusto (Archivio di Acque del Chiampe S.p.A. Società Benefit, 2026)



Figura 2.2.3: discarica con fotovoltaico (Archivio di Acque del Chiampo S.p.A. Società Benefit, 2026)

L'impianto produce 22.000 ton/anno di fango essiccato tal quale, storicamente gestiti tramite lo smaltimento nelle 9 diverse discariche, di cui una di proprietà del Comune e le altre di proprietà della Società Acque del Chiampo, tutte gestite dalla società.

Oggi si è però in una fase critica: ormai le discariche sono quasi al completo, e questo costringe a trasportare il 100% dei fanghi prodotti in centri esterni al Comune, con costi di gestione elevatissimi, per permettere di mantenere lo spazio residuo nella discarica nove (Comune di Arzignano) alle sole emergenze, in attesa di definire trattamenti alternativi. Le prospettive future spererebbero nel trattamento termico per produrre Syngas, operando così un recupero energetico ottimale dai rifiuti della concia, è questo però un tema molto complesso da gestire nel territorio, soprattutto per un aspetto di paura e resistenza psicologica da parte della popolazione verso questa tipologia di tecnologie.

(Team tecnico Acque del Chiampo, 2026)

3 NUOVE TECNOLOGIE PER LA GESTIONE DEI FANGHI

Come si è illustrato, Arzignano ha ora l'impellente necessità di apportare un cambiamento al sistema gestione fanghi. Questo può avvenire in due modalità:

- implementazione di nuove strutture che si occupino dello smaltimento di tali fanghi
- modifica delle caratteristiche quantitative/ qualitative del carico in entrata all'impianto, con conseguente modifica delle caratteristiche del fango.

In questo paragrafo si affronta la prima opzione.

3.1 *Il bando del 2017 per il recupero termico*

Si analizza il documento di Avviso Esplorativo finalizzato all'individuazione di un partner industriale per la co-progettazione e gestione di un impianto centralizzato di trattamento termico dei fanghi, formalizzato da Acque del Chiampo S.p.A. in data 21 settembre 2017.

Questo documento arriva a seguito del "Accordo di programma quadro per la tutela delle acque e la gestione integrata delle risorse idriche" (Regione del Veneto, 2017) per la tutela del bacino Fratta-Gorzone, dove nell'art. 6 si legge:

1. Le parti firmatarie riconoscono che la soluzione del trattamento e recupero dei fanghi, anziché del loro smaltimento a discarica, è essenziale per il perseguimento di alcuni degli obiettivi stabiliti nell'Accordo.
2. In attuazione di quanto previsto all'art. 1 dell'Atto modificativo sottoscritto in data 21 giugno 2013, le Parti, nel rispetto delle direttive comunitarie, si impegnano a sostenere in ogni modo, nell'ambito delle proprie competenze ed in ragione delle disponibilità specificamente programmate, gli investimenti e le iniziative di recupero.

All'interno dell'Avviso Esplorativo si analizza la relazione tecnica illustrativa (Stevan & Zerlottin, 2017).

È necessario evidenziare che i dati analizzati nel presente paragrafo derivano dalla relazione tecnica allegata all'avviso esplorativo del 2017. Come già detto, nell'ultimo decennio si sono registrati parziali ammodernamenti tecnologici in alcune unità di processo del polo depurativo di Acque del Chiampo, accompagnati da una progressiva revisione delle ricette chimiche all'interno delle aziende. Pur riconoscendo l'esistenza di tali dinamiche evolutive, si ritiene che l'ordine di grandezza macroscopico dei flussi e dei dati ben si prestino quale modello di riferimento per una valutazione qualitativa dei pro e contro impiantistici nella seguente analisi teorica.

Si fa di seguito una panoramica delle principali caratteristiche tecniche riguardanti i fanghi, derivanti dagli impianti di depurazione di Arzignano e Montebello Vicentino e che avrebbero dovuto essere trattati dall'impianto in progetto nel 2017, in modo tale da consentire le trattazioni posteriori.

Si osserva in particolare il contenuto di sostanza secca nel fango essiccato ad Arzignano, pari a 88%. (Tabella 3.1.1) e a Montebello, pari a 70%. (Tabella 3.1.2). (Stevan & Zerlottin, 2017)

Tabella 3.1.1: Caratteristiche funzionamento linea fanghi impianto di depurazione di Arzignano (Stevan & Zerlottin, 2017)

	Valore medio	Valore min÷max
Portata media del fango ispessito	1.350 m ³ /giorno	
Contenuto di sostanza secca nel fango ispessito	5 %	4,3÷5,6 %
Quantità media del fango disidratato	82.400 t/anno 250 t/giorno	
Contenuto di sostanza secca nel fango disidratato	27 %	25÷30 %
Contenuto di sostanza volatile a 600°C nel fango disidratato	73 %	70÷76 %
Quantità media di fango essiccato	25300 t/anno 77 t/giorno	
Contenuto di sostanza secca del fango essiccato	88%	85÷92 %
Tempo di funzionamento medio della linea fanghi	330 giorni/anno 7920 h/anno	

Tabella 3.1.2: Caratteristiche funzionamento linea fanghi impianto di depurazione di Montebello Vicentino (Stevan & Zerlottin, 2017)

	Valore medio	Valore min÷max
Portata media del fango ispessito	460 m ³ /giorno	400÷600 m ³
Contenuto di sostanza secca nel fango ispessito	4,2%	3,5÷5,0 %
Quantità media del fango disidratato	25.502 t/anno 77 t/giorno	
Contenuto di sostanza secca nel fango disidratato	25 %	23÷27 %
Contenuto di sostanza volatile a 600°C nel fango disidratato	70 %	68÷77 %
Quantità media di fango essiccato	9.108 t/anno 28 t/giorno	
Contenuto di sostanza secca del fango essiccato	70%	65÷75 %
Tempo di funzionamento medio della linea fanghi	330 giorni/anno 7920 h/anno	

Come già discusso il processo di lavorazione conciaria si compone di numerose fasi, in ciascuna delle quali, oltre a far uso di notevoli quantità di acqua (da 15 a 50 m³ per ogni tonnellata di pelle grezza lavorata), si utilizzano fino a 500 kg di varie tipologie di prodotti chimici per tonnellata di pelle grezza lavorata.

I fanghi prodotti dagli impianti di depurazione si compongono, per circa 65-75% della sostanza secca totale, da fanghi provenienti dalla sedimentazione dopo i trattamenti primari e quindi contenenti oltre alle proteine e grassi costituenti la pelle stessa, anche le varie tipologie di prodotti chimici utilizzati nel processo lavorativo e nel processo depurativo (flocculanti organici ed inorganici).

Il rimanente 25-35% circa di sostanza secca prodotta è costituita dalla crescita batterica e quindi dallo spurgo dei fanghi attivi del trattamento biologico. Importante mettere in evidenza il cromo totale (Tabella 3.1.3) nel fango di Arzignano pari a 27.000 mg/kg tal quale e a Montebello (Tabella 3.1.4) pari a 24.723 mg/kg tal quale; e il potere calorifico inferiore, pari a 15.000 kJ/kg

ad Arzignano (Tabella 3.1.3) e 9.144 kJ/kg a Montebello (Tabella 3.1.4). (Stevan & Zerlottin, 2017)

Tabella 3.1.3: caratteristiche chimico-fisiche del fango prodotto dall'impianto di depurazione di Arzignano (Stevan & Zerlottin, 2017)

Parametro	Fango essiccato	Unità di misura
Caratteristiche organolettiche	Non putrescibile	
Stato fisico	Solido polverulento	
Peso specifico	0,70 (0,65÷0,75)	kg/l
pH	7,7	
Cromo totale	27000	mg/kg tal quale
Ferro	15800	mg/kg tal quale
Zinco	1700	mg/kg tal quale
Manganese	150	mg/kg tal quale
Rame	55	mg/kg tal quale
Nichel	43	mg/kg tal quale
Piombo	18	mg/kg tal quale
Cadmio	<0,5	mg/kg tal quale
Mercurio	<0,5	mg/kg tal quale
Arsenico	0,5	mg/kg tal quale
Fosforo totale	9400	mg/kg tal quale
Azoto totale	57000	mg/kg tal quale
Contenuto in carbonio	-35	% su tal quale
Contenuto in zolfo	1,8-2,5	% su tal quale
Contenuto in idrogeno	-7	% su tal quale
Contenuto in ossigeno	-20	% su tal quale
Contenuto in cloro	-0,6	% su tal quale
Potere calorifico inferiore	15000 (13.000÷16.500)	kJ/kg

Tabella 3.1.4: caratteristiche chimico-fisiche del fango prodotto dall'impianto di depurazione di Montebello Vicentino (Stevan & Zerlottin, 2017)

Parametro	Fango essiccato	Unità di misura
Caratteristiche organolettiche	non putrescibile	
Stato fisico	Solido polverulento	
Peso specifico	0,75 (0,65÷0,75)	kg/l
pH	8,5	
Cromo totale	24.723	mg/kg tal quale
Ferro	5342	mg/kg tal quale
Zinco	344,1	mg/kg tal quale
Manganese	44,7	mg/kg tal quale
Rame	70,6	mg/kg tal quale

Nichel	13,1	mg/kg tal quale
Piombo	<0,1	mg/kg tal quale
Cadmio	<0,1	mg/kg tal quale
Mercurio	<0,1	mg/kg tal quale
Arsenico	<0,1	mg/kg tal quale
Azoto totale	31000	mg/kg tal quale
Contenuto in carbonio	23,5	% su tal quale
Contenuto in idrogeno	4,5	% su tal quale
Potere calorifico inferiore	9.144 (9.000÷14.000)	kJ/kg

Fondamentale in questa panoramica, trattandosi di rifiuti, è identificare il codice CER dei fanghi in questione, i quali, sottostando a dati limiti di legge per le sostanze identificate, sono dichiarati come non pericolosi: codice CER del rifiuto: 190814 - fanghi prodotti da altri trattamenti delle acque reflue industriali, diversi da quelli di cui alla voce 190813* (190813 * = fanghi contenenti sostanze pericolose prodotti da altri trattamenti delle acque reflue industriali.) (Stevan & Zerlottin, 2017)

3.2 *Il gassificatore*

La "Commissione tecnica per la valutazione dei processi termici di inertizzazione dei fanghi prodotti dagli impianti di depurazione di Arzignano e Montebello" nella sua "Relazione finale" del dicembre 2011 ha affermato che la tecnologia preferibile è la gassificazione, "...in ragione del fatto che questa è al momento la tecnologia più utilizzata rispetto alle altre utilizzabili allo scopo". (Stevan & Zerlottin, 2017)

Nelle prossime righe si analizza dunque la fattibilità tecnica di un gassificatore per la produzione di syngas in tale contesto.

La gassificazione consiste nella conversione di un combustibile solido o liquido in un prodotto gassoso (syngas), attraverso una combustione incompleta povera di sostanza ossidante (in carenza di ossigeno).

Il prodotto principale della gassificazione è dunque il syngas, utilizzato come combustibile per la produzione di energia termica ed elettrica. (Poli, 2026)

Per poter trattare questo argomento così complesso, si è condotta una ricerca bibliografica sulla banca dati scientifica Scopus. La ricerca è stata impostata utilizzando stringhe di selezione specifiche, combinando termini chiave quali ["sewage sludge" AND "gasification" AND "techno-economic" AND ("capacity" OR "throughput" OR "scale")].

I numerosi risultati ottenuti sono stati successivamente filtrati applicando criteri di inclusione ed esclusione, definiti in base agli obiettivi di analisi del trattamento termico dei fanghi.

3.2.1 *Gassificatore e cromo*

Tesi portante a favore del gassificatore è sicuramente l'ambiente sub-stechiometrico in cui esso opera: i tradizionali trattamenti termici, come la combustione diretta, avvengono in condizioni pienamente ossidanti (con eccesso di ossigeno); questo ambiente in camera di combustione porta inevitabilmente all'ossidazione del Cr(III) trasformandolo nel tossico e cancerogeno cromo esavalente (Cr(VI)).

La gassificazione, al contrario, si distingue perché opera in condizioni sub stechiometriche (atmosfera riducente). Questo significa che il processo utilizza una quantità di ossigeno nettamente inferiore a quella necessaria per una reazione completa, sfavorendo drasticamente le cinetiche chimiche che causano l'ossidazione del cromo.

La letteratura scientifica mostra come, nelle migliori condizioni operative adottate, è stato ottenuto un syngas con il 42% di H₂ e un potere calorifico inferiore di 12 MJ/kg, con una concentrazione limitata di tar (il quale in fase di utilizzo compromette il buon funzionamento dei macchinari) e la concentrazione di Cr(VI) nelle ceneri pesanti e volanti non è risultata superiore a 10 mg/kg, mentre la concentrazione di Cr(totale) era di 3–4 ordini di grandezza superiore.

Per fare degli esempi, attualmente, il limite italiano per il cromo totale è di 200 mg per kg di solido secco se il fango è destinato a essere utilizzato in agricoltura, e quello per il Cr(VI) è di 100) mg per kg di solido secco per il semplice smaltimento.

(Lauro, et al., 2022)

3.2.2 *Gassificatore e PFAS*

Dall'analisi della relazione tecnica del 2017, si può notare l'assenza del parametro relativo alle sostanze perfluoroalchiliche (PFAS) nelle tabelle (Tabella 3.1.3 e Tabella 3.1.4) di caratterizzazione chimico-fisica della matrice fango. Tale mancanza non è imputabile a una sottovalutazione del fenomeno da parte degli enti gestori, essendo il distretto idrico già oggetto di severi monitoraggi ambientali da parte di ARPAV sin dal 2016, bensì al quadro regolatorio dell'epoca. Al contrario, nello scenario attuale, grazie all'avanzamento della normativa europea e nazionale in materia di PFAS la quantificazione di tali composti risulterebbe imprescindibile.

A questo punto si presenta un problema: l'abbattimento dei composti perfluoroalchilici (PFAS) richiede condizioni di forte ossidazione termica per permettere la rottura dell'estremamente stabile legame carbonio-fluoro; tuttavia, la contemporanea necessità di inibire l'ossidazione del cromo trivalente a cromo esavalente impedisce l'esposizione della matrice solida a tali ambienti altamente ossidanti ad alta temperatura.

Questo limite può essere superato mediante l'implementazione di un'architettura impiantistica a doppio stadio, particolare metodologia utilizzata nell'impianto di depurazione di Loganholme in Australia. (Lgan city council, 2021)

Nel primo stadio il fango disidratato viene processato in un reattore (gassificatore) mantenuto a una temperatura di 850 °C in condizioni rigorosamente sub-stechiometriche che, come detto, ostacola l'ossidazione del cromo garantendo che il metallo pesante non volatile rimanga confinato in sicurezza nella matrice solida. Parallelamente le molecole di PFAS si volatilizzano integralmente, abbandonando il solid/char e migrando come gas nel flusso del Syngas.

Prima che il flusso proceda verso l'ossidazione, si rende necessaria un'operazione unitaria di segregazione meccanica. Il Syngas in uscita dal gassificatore, carico di ceneri volanti, attraversa sistemi di separazione particellare, come cicloni o filtri a rete, adatti a separare il particolato fine. Si garantisce in tal modo che la totalità del cromo inorganico venga fisicamente intercettata e rimossa dal sistema sotto forma di ceneri (leggere e pesanti), bloccandone permanentemente l'accesso alle unità a valle.

Infine, si ha l'ingresso del Syngas nel secondo stadio, costituito dall'ossidatore termico. Il flusso gassoso, vettore dei composti PFAS volatilizzati ma del tutto privo della matrice solida contenente il cromo, viene miscelato con aria secondaria per innescare l'ossidazione completa. In questa camera, il Syngas incontra l'ossigeno a temperature molto elevate, idealmente fino ai 1100 °C, per un tempo di residenza di alcuni secondi, regime che fornisce l'energia di attivazione necessaria alla mineralizzazione e alla spezzatura definitiva dei legami Carbonio-Fluoro. Questa configurazione raggiunge un'efficienza di distruzione dei PFAS del 94%, azzerando il loro accumulo nel biochar finale.

In conclusione, la progettazione a due stadi garantisce la totale purezza delle emissioni organiche in aria, scongiurando a priori la tossicità associata alla generazione di cromo esavalente. (Lgan city council, 2021)

Si osserva che in questa particolare configurazione d'impianto il syngas non viene immagazzinato o estratto, ma entra direttamente nell'ossidatore termico dove viene bruciato, fornendo l'energia termica necessaria a far funzionare l'intero stabilimento.

3.2.3 *Autosostentamento dell'impianto*

Tema fondamentale dal punto di vista ingegneristico è la capacità di autosostentamento dell'impianto. Questa tipologia di analisi richiederebbe un approfondito studio del fango e dello schema dell'impianto effettivo. A titolo teorico è però interessante citare gli studi sperimentali eseguiti su piattaforme pilota integrate di pirolisi e gassificazione come il sistema PYROCO™, i quali evidenziano che l'autosufficienza termica del primo stadio di conversione è vincolata al superamento di una soglia di potere calorifico inferiore pari a 11 MJ/kg e a un contenuto di solidi superiore al 30%. Sebbene il layout ipotetico di Arzignano appena descritto si distingue da tale configurazione per l'impiego di una gassificazione diretta in letto fluido seguita da un'ossidazione termica completa e distruttiva del syngas in un post-combustore secondario, i requisiti termodinamici minimi per la trasformazione della matrice solida in fase gassosa risultano comunque interessanti come materia di confronto. Il dato letterario ci fornisce così una prima convalida dell'ipotesi che il fango essiccato ad Arzignano, caratterizzato da un PCI di 9-14 MJ/kg per Montebello e 14-16 MJ/kg per Arzignano (figura 3.1.3 e 3.1.4), e un solido al 70 % per Montebello e 88% per Arzignano (figura 3.1.1 e 3.1.2), soddisfi i requisiti di autosostentamento energetico individuati in letteratura per i solidi industriali, senza richiedere l'apporto costante di combustibili fossili ausiliari in regime stazionario. (Nimesha Rathnayake et al., 2024)

4 STRATEGIE DI RIDUZIONE ALLA FONTE: SOSTITUZIONE CON BIOMATERIALI FUNGINI

4.1 Materiali sostitutivi della pelle

Come si è illustrato, Arzignano ha ora l'impellente necessità di apportare un cambiamento al sistema gestione fanghi. Questo può avvenire in due modalità:

- implementazione di nuove strutture che si occupino dello smaltimento di tali fanghi
- modifica delle caratteristiche quantitative/ qualitative del carico in entrata all'impianto, con conseguente modifica delle caratteristiche del fango

Analizzata precedentemente la prima opzione, ora si tenta di percorrere la seconda via: modifica delle caratteristiche quantitative/ qualitative del carico in entrata all'impianto, con conseguente modifica delle caratteristiche del fango, il che presuppone la modifica della produzione industriale.

L'industria globale della moda e dei beni di consumo sta attraversando una fase di profonda trasformazione, spinta da una crescente pressione per la riduzione dell'impatto ambientale e da una forte domanda di materiali alternativi, cruelty-free e "vegani". Tuttavia, dietro molte etichette "eco-friendly" si nasconde spesso un vero e proprio "specchietto per le allodole" (il cosiddetto red herring del marketing sostenibile). Gran parte delle pelli vegane attualmente più note sul mercato, come Vegea, a base di scarti d'uva, Desserto, a base di cactus, e Mylo, non sono nient'altro che tessuti spalmati con spessi strati di poliuretano (PU) o cloruro di polivinile (PVC), dove la componente plastica può costituire dal 10% al 50% della massa strutturale del prodotto finito.

Tabella 4.1.1: materiali alternativi alla pelle ad oggi conosciuti e in produzione, e la loro classificazione (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, 2022)

Company name	Product name	Product structural material	Material description	Haptic
Natural haptics				
Various	Leather	Animal hide	Animal hide	Natural
Mycoworks	Reishi™	Mycelium-fabric composite	Mycelium mat, optionally with an embedded natural fabric [27]	Natural
Mogu	Ephea™	Fabric backer	Mycelium mat adhered to a fabric backer [24]	Natural
Ecovative	Forager™	TBD	Compressed mycelium foam ("mushroom leather") [10]	Natural
Plastic haptics				
Various	Vegan Leather (aka PU or PVC Leather)	Plastic (Polyurethane or PVC)	Polyurethane or Polyvinylchloride can include a fabric backing	Plastic
Various	Bicast Leather	Animal leather plus plastic (Polyurethane)	Animal hide coated with Polyurethane	Plastic
Bolt Threads	Mylo™	Viscose fabric with thick plastic (Polyurethane)	Viscose embedded with mycelium fibers and coated with polyurethane [29]	Plastic
Desserto	Desserto™	Fabric with thick plastic (Polyurethane)	Polyurethane mixed with cactus fibers, applied as coating to a fabric [7]	Plastic
Vegea	V-Textile™	Fabric with thick plastic (Polyurethane)	Polyurethane mixed with grape fibers, applied as coating to a fabric [44]	Plastic
Modern Meadow	Bioleather1™	Fabric with thick plastic (Polyurethane)	Fermented protein mixed with plastic, applied as coating to a fabric [20]	Plastic
Natural Fiber Welding	Mirum™	Rubber (likely biodegradable)	Rubber cured with plant-based chemistry [31]	Plastic like (rubber)

Si tratta di un fenomeno ad alto rischio greenwashing: questi materiali bio-compositi, seppur nella produzione presentino un'impronta carbonica molto minore della pelle animale, comportano gravi impatti per quanto ne riguarda il fine vita: non sono infatti biodegradabili, e dipendono da fonti fossili contribuendo al problema dell'inquinamento da microplastiche. Fortunatamente la ricerca si sta muovendo verso alternative realmente sostenibili, sviluppando

materiali che offrono prestazioni simili senza alcun utilizzo di plastiche di sintesi. (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, 2022)

In questo panorama competitivo, l'industria conciaria tradizionale viene individuata come un settore altamente inquinante, a causa dell'elevato consumo idrico (stimato tra i 15 e i 50 metri cubi per tonnellata di pellame), delle emissioni di gas serra legate agli allevamenti e dell'uso di sostanze chimiche critiche come il cromo. (Black, et al., 2013)

Eppure, alla base della concia risiede uno dei più antichi modelli di economia circolare: la nobilitazione di un sottoprodotto dell'industria della carne, la pelle animale grezza, che, se non recuperato, diverrebbe rifiuto da smaltire. Questo è un concetto di grande valore, e risulta affascinante l'idea di poter continuare questa circolarità affiancando alla lavorazione animale l'uso di tecnologie bio-fabbricate sempre più all'avanguardia e meno impattanti.

Per completezza di analisi, è doveroso ricordare che anche la stessa pelle animale, specialmente nelle lavorazioni destinate alla pelletteria, alle borse e persino nel settore del lusso, fa spesso uso di uno strato di plastica. Questo avviene durante la fase finale del processo conciario, dove per conferire alla borsa le prestazioni estetiche e di durabilità richieste, la superficie del derma animale viene rivestita con resine (come poliuretani, vinil acetati o acrilici), leganti e lacche. In specifiche lavorazioni, si ricorre alla tecnica del transfer coating, che consiste nel trasferimento e nell'incollaggio diretto di una vera e propria pellicola o film plastico sulla pelle. (Black, et al., 2013)

Per un polo storico e strutturato come il distretto conciario di Arzignano, che attualmente attraversa una fase di flessione (UNIC concerie italiane, 2026), l'emergere di questi nuovi biomateriali può essere una possibilità di investimento, con l'obiettivo di ampliare il portafoglio prodotti, affiancando alla pelle animale una quota di alternative vegetali e fungine realmente sostenibili, biodegradabili e prive di plastica. In questo modo, il distretto potrebbe posizionarsi su nuovi mercati e intercettare quella fetta di consumatori sempre più esigente sul tema etico e ambientale, valorizzando al contempo il proprio inestimabile know-how ingegneristico e chimico.

Alla luce di queste premesse, il presente capitolo si concentrerà sull'analisi tecnica e ambientale dei processi produttivi delle "pelli vegetali", con focus sulla caratterizzazione degli scarichi idrici e dei reflui generati.

Verrà inoltre condotta un'analisi teorica in cui si ipotizza di destinare una quota, pari a un 20% della produzione, alla manifattura di questi biomateriali all'interno delle concerie già esistenti nel distretto con l'obiettivo di osservarne le conseguenze sul refluo da trattare al depuratore.

Questo approccio si pone anche l'obiettivo di agevolare il riutilizzo dei macchinari tradizionali, come i bottali per la fase a umido o le linee di spruzzatura per la rifinitura, per minimizzare i costi di investimento degli industriali e facilitare così la transizione.

Si tratta di una trattazione puramente teorica. Tuttavia, questo lavoro spera di porre le basi per stimolare ulteriori ricerche in un ambito che, per la sua complessità, richiederà necessariamente l'unione di più esperti. L'eventuale transizione ecologica del distretto non potrà infatti prescindere da una forte multidisciplinarietà, capace di far dialogare l'ingegneria chimica e di processo, l'ingegneria dei materiali, fino ad arrivare alle analisi economiche e all'ingegneria gestionale.

4.2 Caratterizzazione chimico-fisica dello scarico di una conceria tipo

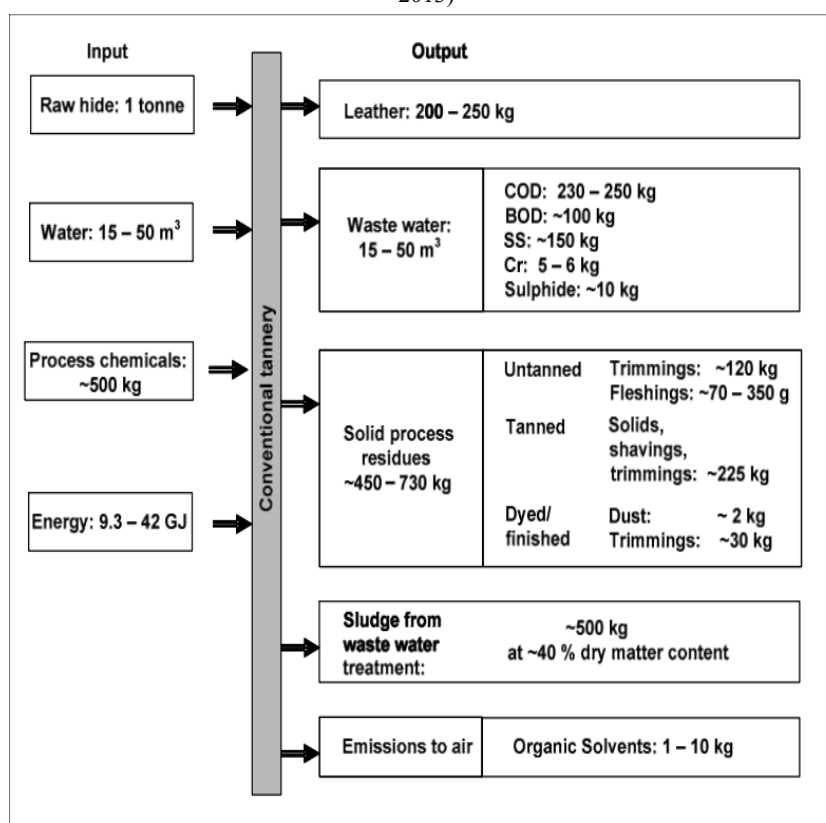
Come si è già descritto in precedenza, all'interno del distretto di Arzignano non tutte le concerie si occupano degli stessi processi, e non tutte utilizzano le stesse ricette. Di conseguenza fare un'analisi dello scarico di una conceria tipo è un concetto molto ampio e da prendere con le giuste precauzioni. Di conseguenza, l'individuazione di un effluente refluo "tipo" costituisce un'astrazione concettuale che richiede specifiche cautele metodologiche, data l'elevata variabilità dei parametri.

Al fine di superare tale frammentarietà e consentire una trattazione quantitativa rigorosa, nel presente elaborato si adotta un'approssimazione ingegneristica di riferimento, assumendo i dati standardizzati riportati nelle linee guida europee BREF 2013 (Best Available Techniques Reference Documents) quale modello di partenza (Black, et al., 2013).

Nello specifico, si introduce l'assunzione che la totalità delle unità produttive considerate esegua il ciclo di concia completo e che i relativi carichi inquinanti specifici coincidano con i valori medi tabellati nei documenti di riferimento europei riportati di seguito (Tabella 4.2.1).

Tale semplificazione si rende necessaria per standardizzare le variabili di input del sistema fognario industriale, strumento propedeutico indispensabile per impostare le successive valutazioni comparative e la modellazione degli scenari alternativi analizzati nel prosieguo del presente lavoro.

Tabella 4.2.1: Input/output di un processo convenzionale di concia al cromo di pelle bovina conservata a sale (Black, et al., 2013)



4.3 Caratterizzazione dei reflui generati dai processi di concia della biomassa fungina

Come già anticipato i metodi di produzione attuali di alternative alla pelle comportano tipicamente la miscelazione di fibre estratte con materiali plastici come PU e PVC, non solo nel caso di pelle sintetica realizzati in polivinilcloruro (PVC) o poliuretano (PU), ma anche nel caso di alternative alla pelle a base biologica. Questa limitazione deriva dall'incapacità delle fibre estratte di formare naturalmente una struttura a rete simile alle fibre di collagene presenti nelle pelli grezze: il micelio coltivato naturalmente è considerato un materiale promettente per la produzione di alternative alla pelle di alta qualità, grazie alla sua struttura reticolata. (Wang, et al., 2026)

Il micelio è infatti composto da ife generative, ife scheletriche e ife di legame, traducendosi nella formazione di una rete densamente interconnessa di fibre miceliari che ricordano le fibre di collagene presenti nelle pelli animali. L'elasticità, la rigidità e la plasticità delle ife fungine possono essere attribuite alle loro pareti cellulari, che consistono in strutture di chitina-glucano che ne garantiscono la resistenza. (Li, et al., 2024)

Al fine di identificare le tecnologie più interessanti nel panorama dei materiali sostitutivi della pelle, è stata condotta una ricerca bibliografica sulla banca dati scientifica Scopus. La ricerca è stata impostata utilizzando stringhe di selezione specifiche, combinando termini chiave quali [("bio-based leather" OR "vegan leather" OR "leather alternative*" OR "mycelium-based leather" OR "grape pomace biopolymer*" OR "apple pomace polyurethane") AND ("LCA" OR "Life Cycle Assessment" OR "environmental impact" OR "sustainability" OR "water footprint")].

I numerosi risultati ottenuti sono stati successivamente filtrati applicando criteri di inclusione ed esclusione, definiti in base agli obiettivi di analisi dei reflui, di sostenibilità e di applicabilità industriale di questo lavoro:

1. Assenza di polimeri sintetici: Sono stati esclusi i materiali compositi contenenti matrici o spalmature in plastica (come PU o PVC).
2. Compatibilità impiantistica con il distretto conciario: si è data priorità a paper in cui i trattamenti chimico-fisici del biomateriale siano potenzialmente replicabili nei bottali per la concia già esistenti nel distretto.
3. Performance tecniche e affinità strutturale: sono stati selezionati studi in cui il materiale finale mostra proprietà meccaniche, termiche e sensoriali comparabili alla pelle animale.

Sulla base di questo screening, la trattazione successiva si concentrerà sull'analisi di tre materiali che rispondono a tali requisiti.

4.3.1 *Ganoderma lucidum* con concia a genipina

In questo primo studio, la materia di partenza è il micelio grezzo del fungo *Ganoderma lucidum*, acquistato dall'azienda biotecnologica cinese Mycolla Biological Co, dove è ottenuto tramite processi di fermentazione allo stato solido. (Wang, et al., 2026)

Lo studio si concentra sul potenziale che il micelio di grandi dimensioni naturali ha nell'essere stabilizzato utilizzando metodi di concia affini a quelli della produzione tradizionale della pelle. In questo lavoro il micelio grezzo (ML), con un contenuto di umidità di circa il $90 \pm 1,5\%$, è stato conciato attraverso l'utilizzo della concia con genipina, ottenendo così il micelio conciato (ML-T). La genipina è un agente reticolante di derivazione naturale, che collega efficacemente polisaccaridi e proteine. In seguito alla concia, il processo di ingrasso viene in

questo studio condotto con glicerolo, che può migliorare efficacemente la tenacità dei materiali a base di micelio. Si ottiene così l'alternativa alla pelle a base di micelio (ML-TG). Al fine di valutare l'effetto del processo di ingrasso, è stato prodotto anche un campione di pelle di micelio trattata solo con ingrasso (ML-G). (Wang, et al., 2026)

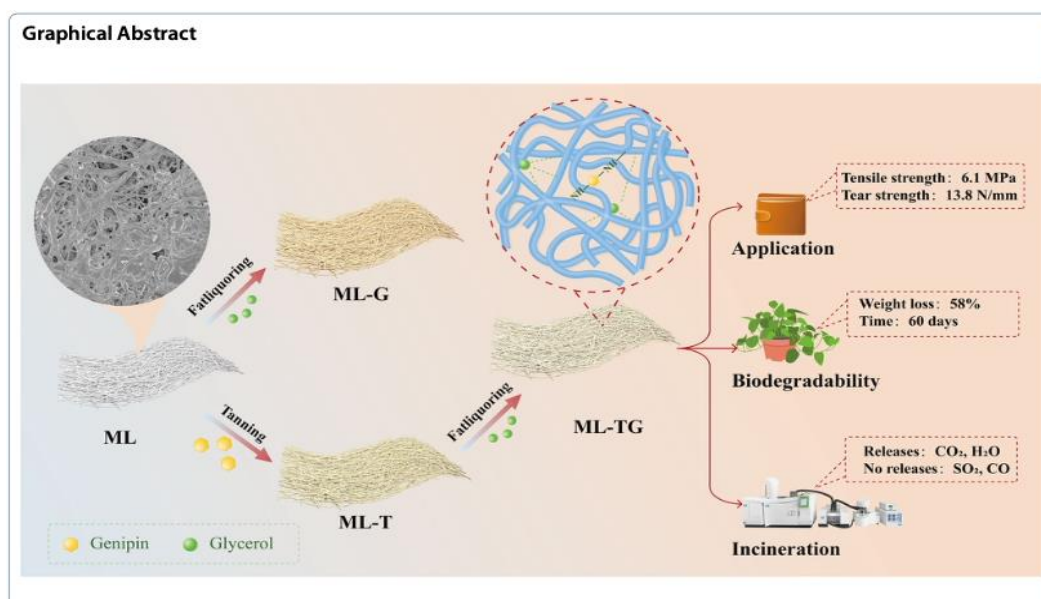


Figura 4.3.1: schema illustrativo del processo analizzato (Wang, et al., 2026)

Per quanto concerne le proprietà chimico-fisiche e sensoriali per applicazione pratica, riassunte in Tabella 4.3.1, si ha che il campione ML-TG ha mostrato una resistenza alla trazione di 6,1 MPa e un allungamento a rottura del 73,1%, dunque con un ulteriore affinamento, le sue prestazioni meccaniche potrebbero avvicinarsi a quelle della pelle nappa ovina, che ha tipicamente una resistenza alla trazione di circa 10 MPa. Tutti i campioni hanno dimostrato temperature di contrazione superiori a 99 °C, indicando la notevole stabilità termica del micelio. Questa proprietà suggerisce il suo potenziale per applicazioni in capi d'abbigliamento sottoposti a stiratura ad alta temperatura e in interni automobilistici esposti a calore e luce solare prolungati. (Wang, et al., 2026)

Tabella 4.3.1: proprietà chimico fisiche del ML-TG

PARAMETRO	resistenza a trazione	allungamento a rottura	temperatura di contrazione	resistenza a lacerazione	resistenza a flessione	permeabilità al vapore
ML-TG	6.1 MPa	73.1%	99°C	13.8 N/mm	>20.000 cicli	23.1 mg/m ² •h

Per quanto riguarda il fine vita di questo materiale dallo studio è emerso che la pelle a base di micelio si biodegrada nel suolo senza influenzare negativamente la crescita di piante di ravanello. Dopo 60 giorni, le radici delle piante erano cresciute attraverso i ritagli di sostituto della pelle a base di micelio interrati, con un tasso di biodegradazione che ha raggiunto circa il 60%, dimostrando la sua compatibilità ambientale. Mentre gli studi di incenerimento hanno dimostrato che l'alternativa alla pelle a base di micelio ha rilasciato meno tipi di gas di scarto durante la combustione rispetto alla pelle ovina. (Wang, et al., 2026)

Processo (Wang, et al., 2026):

- 1) concia in bottale di 40 cm di diametro dotato di ripiani interni, rotante a 10 giri/min (rpm) per 5 ore a 30 °C
 - a) soluzione di genipina [$C_{11}H_{14}O_5$]=2 g/l
 - b) peso fungo : volume soluzione = 1:2
 - c) pH=4 regolato utilizzando HCl 1 M
- 2) lavaggio con acqua a 30 °C per 5 minuti per rimuovere genipina non fissata
- 3) ingrasso con glicerolo a 40 °C per 3 ore
 - a) soluzione di glicerolo [$C_3H_8O_3$]=3 g/l
 - b) peso fungo : volume soluzione = 1:2
- 4) asciugatura naturale a 25 °C

Si tenta ora di fare delle considerazioni sulle caratteristiche dei reflui prodotti, partendo dai dati di processo forniti.

Noto che:

- Fase 1: Se prendiamo 1 kg (1.000 g) di micelio grezzo, sapendo che l'umidità è al 90%, significa che stiamo inserendo nel bottale 900 g di acqua e appena 100 g di biomassa solida asciutta (di densità 13 - 48 kg/m³) (Jones, Gandia, John, & Bismarck, 2021).
- Fase 2: Il fungo subisce la concia con genipina e l'ingrasso con glicerolo
- Fase 3: l'asciugatura naturale all'aria a 25 °C (air-drying). Durante questa fase, la massa d'acqua evapora fino a raggiungere una % d'acqua pari a circa il 10%. Il peso finale del foglio di pelle di micelio sarà costituito dai 100 g di biomassa solida iniziale, a cui si sommano i pochi grammi di genipina e glicerolo assorbiti chimicamente, più una fisiologica percentuale di umidità residua che il materiale trattiene naturalmente (intorno al 10 %). Il peso finale si aggirerà quindi intorno ai 110 grammi per ogni Kg iniziale.

E noto che:

- i bilanci presenti nelle BREF (Tabella 4.4.1) si tarano su 1 ton di pelle grezza, che produce 200-250 kg di pelle finita
- la pelle derivata da funghi è più leggera della pelle bovina; infatti, hanno densità rispettivamente di 240 – 800 kg m⁻³ e 570 – 1.170 kg m⁻³. (Jones, Gandia, John, & Bismarck, 2021)

facendo una media, a 225 kg di pelle animale con densità 870 kg m⁻³ corrispondono $225 \div 870 = 0,25$ m³ di pelle animale.

Si ricava dunque che 0,25 m³ di ML-TG di densità media di 520 kg m⁻³ corrispondono $0,25 \cdot 520 \cong 130$ kg di pelle di micelio.

Per facilitare i passaggi successivi di confronto con pelle animale, si eseguono dunque le considerazioni del refluo su un quantitativo di micelio grezzo ML che porti a un quantitativo di ML-TG pari a 130 kg.

Dunque, facendo una proporzione tra quello che si è trovato essere il rapporto in massa tra ML e ML-TG e uguagliando al rapporto con la massa che si vuole usare come riferimento si ha $1 \text{ kg} : 0,11 \text{ kg} = x : 130 \text{ Kg}$

Dunque, la massa di ML grezzo da prendere come base calcolo è $\cong 1.180$ kg.

I corrispettivi consumi d'acqua saranno:

$$1. \quad w_{\text{pelle}} = 1.180 \text{ kg} \Rightarrow V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot w_{\text{pelle}} = 2360 \text{ l} = 2,36 \text{ m}^3$$

2. lavaggio con acqua a 30 °C per 5 minuti per rimuovere genipina non fissata. Non si conoscono i dati di acqua poiché la letteratura di riferimento (Wang, et al., 2026) non specifica il rapporto di bagno per la fase di lavaggio della genipina in eccesso, ai fini del calcolo del carico idraulico si assume prudenzialmente un rapporto w/v pari a 1:2, in stretta coerenza con i volumi adottati per la concia e l'ingrasso. La rapidità dell'operazione, di soli 5 minuti, in un bottale sperimentale di piccolo diametro (40 cm) suggerisce un risciacquo superficiale a bagno corto.

$$w_{pelle}=1.180 \text{ kg} \Rightarrow V_{H_2O}=2.360 \text{ l}=2,36 \text{ m}^3$$

3. Poiché lo studio di (Wang, et al., 2026) non fornisce la misurazione ponderale del semilavorato ML-T post-concia e lavaggio, è necessario stimare una variazione di massa per il calcolo del bagno di ingrasso. Le analisi ICP dimostrano una netta lisciviazione di minerali (Ca, Mg, K, Na) e zolfo organico. Inoltre, le analisi morfologiche (CT e SEM) confermano che la reticolazione con genipina induce un avvicinamento delle fibre e una struttura più compatta, causando la parziale espulsione dell'acqua intracellulare. Pertanto, per il bilancio di impianto, si assume un calo di peso umido del 10% tra ML e ML-T.

$$w_{pelle}\approx 1.060 \text{ kg} \Rightarrow V_{H_2O}=2.120 \text{ l}=2,12 \text{ m}^3$$

$$\text{Wastewater TOT}=2,36 \text{ m}^3 + 2,36 \text{ m}^3 + 2,12 \text{ m}^3=6,84 \text{ m}^3$$

I corrispettivi composti immessi in fognatura saranno:

- Acido Cloridrico (HCl a 1 Molarità): usato per abbassare il pH del bagno di concia a 4. Porterà un carico di cloruri al depuratore.
- Genipina e Glicerolo: le frazioni non fissate di questi due composti organici finiranno nello scarico, innalzando il COD.
- Soluti Lisciviati: le analisi ICP rivelano che durante la concia il micelio rilascia in acqua calcio, potassio, sodio, magnesio e zolfo. (Wang, et al., 2026)

Lo scarico è dunque totalmente privo di cromo e solfuri aggiunti intenzionalmente. Tuttavia, le concerie dovranno gestire scarichi a forte carico organico, abbattibile dall'impianto biologico di Arzignano, ma che richiederà di essere monitorato.

Come già detto in precedenza i cloruri e i solfati rimangono critici perché le tecnologie di depurazione attuali, che non riescono a ridurli in modo efficace.

4.3.2 *Ganoderma lucidum con concia minerale*

In questo secondo studio, la materia di partenza è nuovamente il micelio grezzo del fungo *Ganoderma lucidum* che, in questo caso, è acquistato dall'azienda biotecnologica cinese Tianjin Meike Biotechnology Co. (Li, et al., 2024)

Considerando come la concia minerale con ioni metallici sia ampiamente utilizzata nella produzione tradizionale della pelle, questo studio affronta la reticolazione tra le fibre miceliari e gli ioni metallici nella produzione di sostituti della pelle a base di micelio per migliorare la resistenza e la stabilità nei sostituti della pelle.

Le preoccupazioni riguardanti l'inquinamento da cromo e i suoi impatti nocivi sulla salute hanno spinto i ricercatori a studiare metodi di reticolazione alternativi, con lo zinco che viene considerato come una potenziale opzione. Lo Zn^{2+} infatti può coordinarsi con i gruppi amminici e carbonilici nei polisaccaridi, formando complessi con un'elevata attività antiossidante.

In questo studio, le fibre miceliari di *Ganoderma lucidum* sono state reticolate con ioni Cr^{3+} e Zn^{2+} per preparare un sostituto della pelle a base di micelio con reticolazione al cromo (MF-Cr) e un sostituto della pelle a base di micelio con reticolazione allo zinco (MF-Zn).

Nella Tabella 4.3.1 sono riportate le proprietà chimico-fisiche e sensoriali per applicazione pratica dei due campioni analizzati. Di particolare rilevanza sono le temperature di contrazione sia di MF-Cr sia di MF-Zn hanno superato i 150 °C, il che è superiore alla temperatura di contrazione dei materiali in pelle preparati da pelli animali.

Tabella 4.3.2: proprietà chimico fisiche del MF-Cr e MF-Zn

Parametro Fisico-Meccanico	Micelio Conciato allo Zinco (MF-Zn)	Micelio Conciato al Cromo (MF-Cr)
Resistenza alla Trazione	7,0 MPa	8,4 MPa
Allungamento a Rottura	59,4 %	32,7 %
Resistenza alla Lacerazione	16,4 kN/m	Dato non specificato
Temperatura di Contrazione (Ts)	> 150 °C	> 150 °C

Processo:

- 1) Inattivazione: Bollitura del micelio (MF) in acqua a 100 °C per 1 ora.
 - 2) Acidificazione: Immersione in acqua a 40 °C per 30 minuti in un oscillatore termostatico
 - a) pH = 1,5 tramite aggiunta di Acido Solforico (H_2SO_4)
 - b) peso fungo: peso soluzione = 1:3
 - 3) Concia: agitatore termostatico a 40 °C per 12 ore:
 - a) per il MF-Cr in una miscela con 5% in peso (% wt) di solfato di cromo
 - b) per il MF-Zn in una miscela con 5% in peso (% wt) di solfato di zinco
 - 4) Reazione a 35 °C per 4 ore
 - a) pH=3,8 tramite aggiunta di Bicarbonato di Sodio (NaHCO_3)
 - 5) Asciugaggio: Ad aria a 25 °C per 24 ore.
- (Li, et al., 2024)

Si nota che nonostante in laboratorio sia stato usato un oscillatore termostatico, gli step operativi sono sovrapponibili alla classica concia al cromo del derma animale. Anche in questo caso le attuali concerie potrebbero eseguire questo ciclo direttamente nei bottali di concia tradizionali, gestendo il dosaggio chimico con le automazioni esistenti.

Come si è fatto precedentemente, per facilitare i passaggi successivi di confronto con pelle animale si eseguono ora le considerazioni del refluo su un quantitativo di micelio grezzo MF che porti a un quantitativo di MF-Zn e MF-Cr pari a 130 kg.

In questo articolo non vengono forniti dati relativi alle caratteristiche fisiche del fungo *Ganoderma lucidum* in ingresso al processo (MF). Questo non permette di calcolare la massa del fungo in entrata necessaria per ottenere 130 kg di pelle in uscita. Nonostante ciò, considerata l'assenza di reidratazione e considerato che i professionisti che hanno redatto l'articolo sono i

medesimi dell'articolo precedente, si considera lecito stimare un bilancio dei reflui basandosi sui rapporti di masse di prodotto calcolati nel caso precedente.

Dunque, la massa di MF grezzo da prendere come base calcolo è ≈ 1.180 kg.

Si osserva che in questo processo di concia si adopera un processo in bagno unico, tipico della concia minerale tradizionale.

Questo significa che l'acqua immessa all'inizio rimane nel bottale per tutta la durata delle reazioni, senza mai essere scaricata fino alla fine. Tutte le aggiunte chimiche successive vengono fatte direttamente all'interno di quella stessa acqua.

I consumi d'acqua relativi saranno:

$$w_{pelle}=1180 \text{ kg} \Rightarrow V_{H_2O}=3 \cdot w_{pelle}=3540 \text{ l}=3,54 \text{ m}^3$$

$$\text{Wastewater TOT}=3,54 \text{ m}^3$$

Composti immessi in fognatura:

- Metalli Pesanti (Zn^{2+} o Cr^{3+}): impiegando il 5% in peso di solfati metallici, la frazione in eccesso non fissata chimicamente alle fibre fungine finirà nelle acque di scarico. Questo manterrà inalterata la necessità per le Acque del Chiampo di operare trattamenti di precipitazione chimico-fisica per abbattere i metalli pesanti ed evitare tossicità acuta nella sezione biologica. L'uso dello zinco è severamente normato allo scarico.
- Acido Solforico e Bicarbonato di Sodio: produrrà un elevato carico di Solfati e Sodio
- Carico Organico (COD / BOD): la bollitura iniziale a 100°C e l'ambiente fortemente acido (pH 1,5) causeranno un carico organico disciolto (COD e BOD) facilmente biodegradabile ma quantitativamente rilevante.

4.3.3 *Reishi*TM

Dopo aver esaminato i meccanismi chimici di stabilizzazione e concia su scala di laboratorio proposti da Li (Li, et al., 2024) e Wang (Wang, et al., 2026), ci si muove ora verso la realtà commerciale e industriale. L'analisi di Williams (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, 2022), infatti, si concentra sulla Valutazione del Ciclo di Vita (LCA), seguendo lo standard ISO14040/14044, del prodotto commerciale *Reishi*TM.

*Reishi*TM è una pelle alternativa creata con *Fine Mycelium*TM, una piattaforma biotecnologica inventata da MycoWorks per ingegnerizzare il micelio.

Il prodotto *Reishi*TM può essere costituito da puro micelio, oppure può essere personalizzato con un materiale in tessuto incorporato in situ. Il materiale in tessuto viene posizionato nel vassoio, e il micelio cresce fino a riempire il tessuto e al di sopra di esso, incorporandolo così all'interno del micelio.

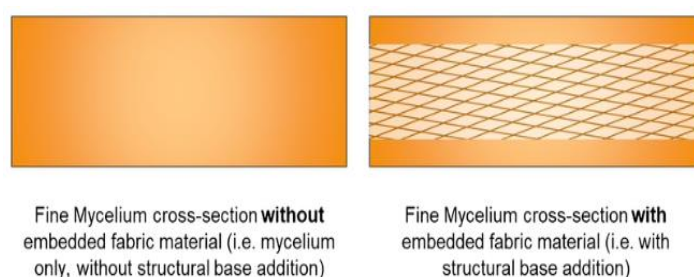


Figura 4.3.2: rappresentazione del *Fine Mycelium*TM con (sx) e senza (dx) tessuto incorporato in situ

Williams modella tre variazioni di materiale in cui l'input di materiale è l'unica variabile che cambia e tutti gli altri processi sono mantenuti costanti:

- 1) micelio con cotone (materiale al 100% in cotone incorporato nel micelio)
- 2) micelio con poliestere riciclato (poliestere al 100% riciclato incorporato nel micelio)
- 3) solo micelio (nessun materiale in tessuto incorporato all'interno del micelio come base strutturale, utilizzando esclusivamente micelio)

Per quanto concerne le proprietà chimico-fisiche e sensoriali si può osservare le differenze con la pelle animale nella seguente Tabella 4.3.3, dove:

- Reishi™ Brown Natural è il solo micelio
- Reishi™ Brown Natural - High Strength è il micelio con poliestere riciclato
- Reishi™ Black Embossed è micelio puro tinto e goffrato

Tabella 4.3.3: proprietà chimico-fisiche e sensoriali (Material innovation initiative, 2020)

Test	Reishi™ Brown Natural	Reishi™ Brown Natural High Strength	Reishi™ Black Emboss	Cowhide Leather
Tensile strength (MPa)	5.6 - 7.4	8.8 - 12.5	9.2 - 10.2	> 8.0
Elongation (%)	16 - 36 %	55 - 80 %	51 - 52 %	10 - 80 %
Tongue tear strength (N)	6.7	52.6	9.9	> 20
Stoll abrasion (cycles, 1lb)	> 1,300	> 1,300		> 1,300
Bally Flex (cycles)	> 20,000	> 100,000		> 10,000
Colorfastness to distilled water (1-5 rating, 5 is high)	4.5		4	4.5 - 5
Colorfastness to sea/salt water (1-5 rating, 5 is high)	4.5		4	4.5 - 5
Colorfastness to perspiration (1-5 rating, 5 is high)	4.5		4.5	4.5 - 5
Colorfastness to water spotting (1-5 rating, 5 is high)	5 after drying		5 after drying	4.5 - 5
Colorfastness to solvent wicking (1-5 rating, 5 is high)	5		3.5 - 5	4.5 - 5
Colorfastness to crocking (dry and wet) (1-5 rating, 5 is high)	5 dry, 4 wet		4 dry	4.5 - 5
Colorfastness to machine washing (1-5 rating, 5 is high)	One wash: slight change		Not recommended	Not recommended
Colorfastness to UV exposure (1-5 rating, 5 is high)	1.5		4.5	5

Per quanto riguarda il fine vita del prodotto Reishi™, nel caso del solo micelio e del micelio con cotone, essi sono biodegradabili in natura, mentre l'alternativa micelio con poliestere riciclato, ovviamente, non è biodegradabile.

Per conoscenza è interessante osservare rapidamente, in quanto non oggetto principale di questa tesi, i risultati d'impronta carbonica riportati nell'articolo (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, 2022).

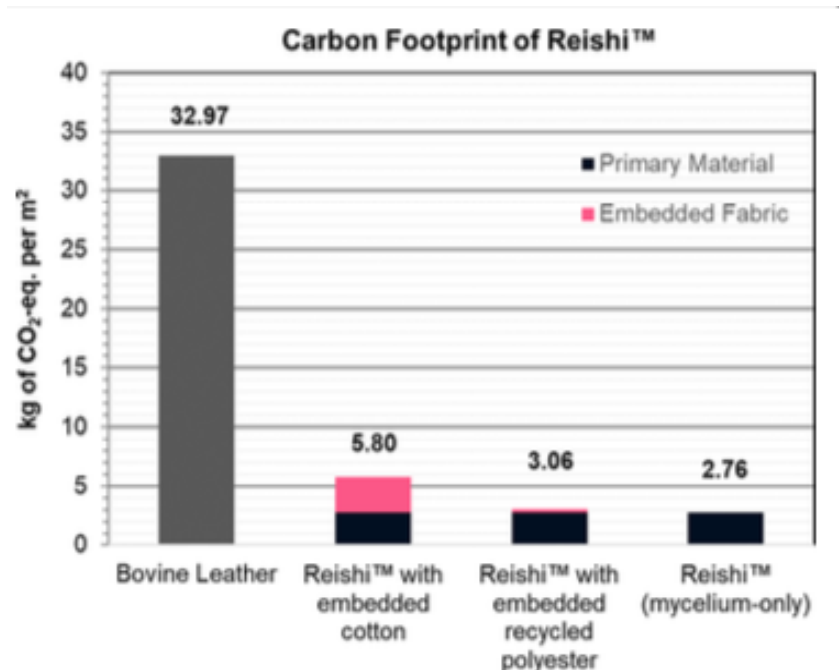


Figura 4.3.3: confronto impronta di carbonio tra 1 m² di pelle animale e 1 m² di Reishi™ scenario 4 (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, 2022)

Necessario notare che nello studio LCA in questione (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, 2022) i confini del sistema sono "cradle-to-gate" (dalla culla al cancello). Questo significa che il calcolo degli impatti ambientali si ferma nel momento esatto in cui il rotolo di Reishi™ finito e imballato esce dal cancello della conceria: tutta la fase di utilizzo da parte del consumatore e, soprattutto, lo smaltimento a fine vita sono stati esclusi dai calcoli. Inoltre, il modello attribuisce al poliestere un impatto ambientale bassissimo poiché si usa poliestere riciclato. In questo modo la variante con poliestere (figura 4.3.3) risulta avere un'impronta di carbonio di produzione (3,06 kg CO₂-eq/m²) inferiore rispetto a quella con il cotone 100% naturale e biodegradabile (5,80 kg CO₂-eq/m²).

Interessante, agli scopi del presente elaborato, notare l'importante differenza tra pelle di micelio puro e pelle bovina.

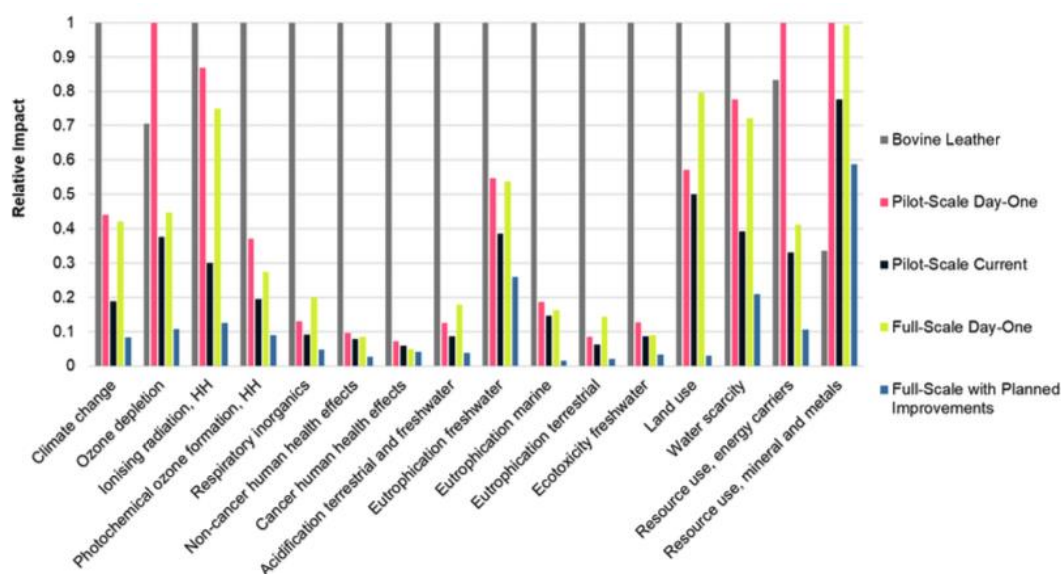


Figura 4.3.4: LCA di 1 m² di Reishi nei quattro scenari confrontati con 1 m² di pelle bovina di riferimento, dove il punteggio più alto è scalato al 100%. (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, Supporting Information 1: Life Cycle Assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather , 2022)

Nella figura 4.3.4 si ha che:

- Scenario 1: Pilot-scale day one rappresenta la produzione di Reishi™ utilizzando le operazioni dell'impianto in California alla prima produzione, i fogli di Reishi™ sono prodotti in loco in California e sono poi spediti in Spagna per la post-lavorazione.
- Scenario 2: Pilot-scale current rappresenta la produzione su scala pilota utilizzando le operazioni del 2022 in California, che include i miglioramenti che sono stati implementati dopo l'apertura dell'impianto e sostituzione della chimica di concia con ingrassi lubrificanti a minore impatto.
- Scenario 3: Full-scale day one rappresenta la produzione del primo giorno prevista presso l'impianto su piena scala in South Carolina, previsto essere operativo nel 2023. (eliminando la necessità di spedire alle concerie),
- Scenario 4: Full-scale with planned improvements rappresenta le operazioni previste su piena scala con i miglioramenti pianificati implementati

È importante sottolineare (Figura 4.3.4) che l'unica categoria di impatto in cui Reishi™ ha un impatto maggiore nello scenario 4 è "*uso delle risorse (minerali e metalli)*". Non è raro nella LCA riscontrare dei compromessi quando si confrontano i materiali, ed è importante notare che il livello di qualità dei dati e le fonti tra questi due confronti differiscono; pertanto, i risultati dovrebbero essere trattati con cautela. (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, Supporting Information 1: Life Cycle Assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather , 2022)

Come si è svolto per i casi precedenti, si analizza di seguito il processo e i reflui prodotti: in questo caso i processi sono differenti in base allo scenario.

Come fatto in precedenza, si analizza di seguito solo i processi che portano dal fungo alla pelle di micelio finita, e non la fase di crescita del Micelio:

Scenario 1: Pilot-scale day one

1) Plasticizing

- a) Ingrassio con 5% di alcoli grassi rispetto al peso del Reishi™ finito
- b) Viene applicato immediatamente sul foglio di micelio appena raccolto. Questo serve come pretrattamento idratante e plasticizzante per evitare che il micelio si irrigidisca o diventi fragile durante l'asciugatura preliminare.

2) Imballaggio e trasporto alla conceria in Spagna

3) Disimballaggio e condizionamento idrico

- a) uso di acqua di rete 0,8 kg di acqua ogni 0,70 kg di Reishi finito, equivalente alla wastewater
- b) agenti chimici

4) Concia

- a) uso di 2 kg di acqua per 0,70 kg di Reishi finito, equivalente alla wastewater
- b) ammorbidente con uso di alcoli grassi
- c) colorante con uso di materiali azotati

5) Risciacquo finale

- a) 0,096 kg di acqua ogni 0,70 kg di Reishi finito, equivalente alla wastewater

6) Asciugatura e Rifinitura Superficiale

- a) 0,005 kg di acqua ogni 0,70 kg di Reishi finito ma 0 kg wastewater
- b) uso di etilene glicol monoetil etere

Scenario 2:

1) Plasticizing

- a) Ingrasso con 2.5% di alcoli grassi rispetto al peso del Reishi™ finito
- b) viene applicato immediatamente sul foglio fresco appena raccolto. Questo serve come pretrattamento idratante e plasticizzante per evitare che il micelio si irrigidisca o diventi fragile durante l'asciugatura preliminare.

2) Imballaggio e Trasporto alla conceria in Spagna

3) Risciacquo finale

- a) 0,096 kg di acqua ogni 0,70 kg di Reishi finito, equivalente alla wastewater

4) Asciugatura e Rifinitura Superficiale

- a) 0,005 kg di acqua ogni 0,70 kg di Reishi finito ma 0 wastewater
- b) uso etilene glicol monoetil etere

Scenario 3 e 4 combaciano con il 2 con l'unica differenza che tutte le operazioni avvengono in loco (non avviene il trasporto in spagna). (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, Supporting Information 1: Life Cycle Assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather , 2022) (Williams, Cenian, Golsteijn, Morris, & Scullin, Supporting Information 2: Life Cycle Assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather, 2022)

Come si è fatto precedentemente, per facilitare i passaggi successivi di confronto con pelle animale si eseguono ora le considerazioni del reflu su un quantitativo di pelle di micelio finita pari a 130 kg.

1. Per il Pilot-scale day one:

$$\text{Wastewater tot} = \frac{0,8 \cdot 130}{0,7} + \frac{2 \cdot 130}{0,7} + \frac{0,096 \cdot 130}{0,7} = 537 \text{ kg} = 0,5 \text{ m}^3$$

Composti immessi in fognatura:

- Alcoli grassi: usati come ingrasso/ammorbidente. La frazione non fissata nel bottale (considerando un input del 2,5% sul peso) finirà nelle acque di scarico, costituirà dunque un carico organico di BOD e COD.
- Eteri Glicolici: utilizzati come solvente organico nelle fasi di coating/post-processing. Si tratta di Composti Organici Volatili (COV) che, se finiti in acqua, richiedono trattamenti specifici e innalzano la tossicità potenziale del reflu.
- Materiali azotati: utilizzati per la classe dei coloranti. Gli scarti di tintura immetteranno nel depuratore un carico di Azoto.

Dunque, l'inserimento del post-processing di Reishi™ nei bottali di Arzignano azzererebbe l'immissione di Cromo e Solfuri nel depuratore consortile, ma introdurrebbe un reflu ricco di tensioattivi/alcoli grassi, solventi eteri e coloranti azotati, spostando la sfida depurativa dalla rimozione dei metalli pesanti all'abbattimento di carichi organici complessi.

2. Per lo scenario 2, 3, 4:

$$\text{Wastewater tot} = \frac{0,096 \cdot 130}{0,7} = 17,82 \text{ kg} = 0,017 \text{ m}^3$$

Si osserva che in tali scenari, la lavorazione di questa specifica pelle vegetale, nelle concerie è essenzialmente diventata un processo a scarico zero. L'impatto sul depuratore si limiterebbe esclusivamente alle acque di lavaggio periodico delle linee di spruzzatura e dei rulli, abbattendo radicalmente sia il carico idraulico che quello tossicologico/organico del distretto.

4.4 Scenario di conversione parziale (20%)

Alla luce dei dati ottenuti, si discute di seguito l'impatto al depuratore nel caso in cui il distretto conciario convertisse il 20% della propria produzione, dalla concia di pelle animale, alla concia di pelle di micelio.

Come già illustrato, il depuratore ha una portata media giornaliera di 40.000 m³/giorno e carico in entrata costituito per il 90% da reflui industriali, provenienti dalle concerie, e per il 10% da reflui civili.

Il 90% di 40.000 m³/giorno è 36.000 m³/giorno. Di questi sottraiamo il 20%•36.000 = 7200 m³/giorno, dunque 36.000 – 7200 = 28.800 m³/giorno: questo è il carico di refluo industriale che rimarrebbe connesso alla produzione di pelle animale. Ad esso è necessario sommare il refluo proveniente dalla pelle di micelio.

Tutti i bilanci fatti sulla pelle di micelio sono già stati eseguiti per poterli confrontare con la produzione di 225 kg di pelle animale finita, ossia per 0,25 m³ di pelle animale finita, che dalle BREF (Black, et al., 2013) in Tabella 4.2.1 usa in media 32,5 m³ di acqua.

Si analizza la conversione del 20% della produzione, per ognuna delle alternative precedentemente illustrate:

1) *Ganoderma lucidum* con concia a genipina

Wastewater TOT= 6,84 m³ per la realizzazione di 130 kg di pelle di micelio, ossia per 0,25 m³ di pelle di micelio.

Definita la portata specifica del refluo da sostituire, la portata idraulica generata dalla quota di biomassa fungina viene determinata per via proporzionale come segue:

$$7200 : 32,5 = x : 6,84 \Rightarrow x \simeq 1515 \text{ m}^3/\text{giorno}$$

2) *Ganoderma lucidum* con concia minerale

Wastewater TOT=3,54 m³ per la realizzazione di 130 kg di pelle di micelio, ossia per 0,25 m³ di pelle di micelio.

Dunque, in proporzione:

$$7200 : 32,5 = x : 3,54 \Rightarrow x \simeq 784 \text{ m}^3/\text{giorno}$$

3) *Reishi*TM

a) Pilot-scale day one

Wastewater tot =0,5 m³ per la realizzazione di 130 kg di pelle di micelio, ossia per 0,25 m³ di pelle di micelio.

Dunque, in proporzione:

$$7200 : 32,5 = x : 0,5 \Rightarrow x \simeq 110 \text{ m}^3/\text{giorno}$$

b) Per lo scenario 2, 3, 4:

Wastewater tot = 0,017 m³ per la realizzazione di 130 kg di pelle di micelio, ossia per 0,25 m³ di pelle di micelio.

Dunque, in proporzione:

$$7200 : 32,5 = x : 0,017 \Rightarrow x \simeq 4 \text{ m}^3/\text{giorno}$$

	portata industriale da pelle animale [m3/giorno]	portata industriale da pelle vegetale [m3/giorno]	portata industriale TOT [m3/giorno]	portata civile [m3/giorno]	portata TOT [m3/giorno]	Riduzione Idraulica Complessiva (%)	Riduzione Idraulica industriale (%)
100% pelle animale	36.000	0	36.000	4.000	40.000	0%	0%
20% Gan. luc. a genipina	28.800	1515	30.315	4.000	34.315	-15%	-16%
20% Gan. luc. minerale	28.800	784	29.584	4.000	33.584	-16%	-18%
20% Reishi™ Pilot-scale	28.800	110	28.910	4.000	32.910	-18%	-20%
20% Reishi™ scenario 2, 3, 4	28.800	4	28.804	4.000	32.804	-18%	-20%

Tabella 4.4.1: portate industriali e totali al depuratore nei vari scenari di conversione industriale

Dall'analisi dei dati sintetizzati in Tabella 4.4.1 si fanno le seguenti considerazioni.

Nello scenario base, ossia 100% lavorazione animale tradizionale, la linea industriale comporta una portata media di 36.000 m3/giorno. Ipotizzando una conversione parziale del 20% della capacità produttiva verso il trattamento di pelli di micelio, si osserva un decremento della portata idraulica industriale che varia dal -16%, nel caso del *Ganoderma lucidum* con concia a genipina, fino al -20% nei due scenari relativi al materiale Reishi™.

Sebbene la riduzione volumetrica sia un fattore positivo, bisogna ricordare che bagni corti comportano maggiori concentrazioni di inquinanti: nonostante l'assenza di dati relativi ai bilanci di massa esatti per le singole concentrazioni di composti chimici dei reflui fungini, è comunque possibile istituire un confronto ingegneristico basato sulla variazione qualitativa degli step e inquinanti utilizzati.

Il primo elemento è l'eliminazione alla fonte delle operazioni di riviera e calcinaio per la quota del 20% di produzione convertita: questo passaggio comporta l'azzeramento dei solfuri immessi in fognatura da quella frazione industriale, riducendo la formazione di acido solfidrico nelle vasche di omogeneizzazione, responsabili delle criticità odorigene del distretto. Inoltre, ad eccezione del caso studio a concia minerale, la transizione verso la stabilizzazione organica con genipina o l'adozione di piattaforme a scarico quasi zero come il Reishi™ configurano un refluo a forte matrice organica azzerando l'uso di metalli pesanti.

5 Conclusioni

Il presente elaborato ha analizzato le dinamiche depurative del distretto conciario di Arzignano, evidenziando come la salvaguardia ambientale del territorio richieda un duplice approccio: l'innovazione tecnologica nel trattamento dei rifiuti (end-of-pipe) e la revisione sostenibile dei processi produttivi alla fonte.

Per quanto riguarda la gestione dei fanghi di supero, attualmente limitata al conferimento in discarica, l'analisi ha dimostrato che la gassificazione rappresenta un'alternativa ingegneristica matura e sicura. L'operatività in ambiente sub-stechiometrico di questa tecnologia risolve il rischio critico dell'ossidazione del cromo trivalente in cromo esavalente. Inoltre, l'implementazione di un'architettura a doppio stadio con post-combustore permette la totale distruzione dei composti perfluoroalchilici (PFAS), garantendo al contempo l'autosostentamento termico dell'impianto e un recupero energetico sotto forma di syngas.

Parallelamente, lo studio ha esplorato il potenziale della transizione verso biomateriali fungini. Ipotizzando una conversione del 20% della produzione distrettuale dalla pelle animale alla pelle di micelio, i bilanci idraulici stimano una riduzione della portata industriale influente al depuratore compresa tra il 16% e il 20%. Dal punto di vista qualitativo, fatta eccezione del caso studio a concia minerale, la transizione verso la stabilizzazione organica con genipina o l'adozione di piattaforme a scarico quasi zero come il Reishi™ configurerebbero un reflujo a forte matrice organica azzerando l'uso di metalli pesanti. Inoltre, la conversione a pelle di micelio eliminerebbe la gran parte delle fonti di solfuri, abbattendo le criticità odorigene legate all'idrogeno solforato.

Tuttavia, l'analisi dei processi di concia e rifinitura del micelio (come l'uso di genipina, alcoli grassi e solventi) rivela che il problema depurativo non verrebbe eliminato del tutto, ma parzialmente traslato, verso una maggiore attenzione al trattamento del carico organico (COD/BOD) e dei tensioattivi, a causa dell'utilizzo di bagni di lavorazione estremamente corti. In conclusione, il distretto conciario di Arzignano possiede tutte le competenze necessarie per affrontare le sfide che il futuro pone davanti a sé: un patrimonio di know-how impiantistico, tecnici altamente qualificati e una consolidata esperienza nella gestione di un sistema produttivo tra i più complessi a livello europeo.

La vera sfida, tuttavia, consiste nel non arroccarsi sui successi del passato né considerare immutabile un modello che, proprio grazie alla sua capacità di evolversi, ha reso prospera la Valle del Chiampo. Al contrario, sarà necessario mantenere uno sguardo aperto, continuare a investire nella ricerca scientifica, nell'innovazione tecnologica e nella collaborazione tra discipline diverse. Dall'ingegneria ambientale a quella dei materiali, dall'ingegneria meccanica e idraulica a quella gestionale, fino all'economia e alle scienze sociali, sarà il contributo integrato di competenze differenti a permettere di affrontare problemi sempre più complessi.

Se saprà percorrere questa strada, il distretto potrà non solo conservare il proprio ruolo di eccellenza e di motore dell'economia nazionale, ma diventare un modello di riferimento per dimostrare come tradizione e innovazione, esperienza e avanguardia, sviluppo economico e tutela ambientale possano convivere in modo virtuoso.

La sostenibilità, infatti, non può essere ridotta alla sola dimensione ambientale. Essa significa garantire un'economia capace di creare lavoro e benessere per le famiglie, tutelare la salute delle persone attraverso un'aria e un'acqua di qualità, preservare gli ecosistemi e utilizzare con responsabilità le risorse naturali. Solo trovando un equilibrio tra queste dimensioni sarà

possibile costruire un futuro realmente sostenibile, non soltanto per il distretto di Arzignano, ma per tutti quei territori che, come la Valle del Chiampo, desiderano continuare a crescere senza dimenticare il valore della terra che, seppur per un breve tratto del tempo, ci è affidata.

6 Dichiarazione utilizzo Intelligenza Artificiale

Nel presente elaborato sono stati impiegati strumenti di intelligenza artificiale esclusivamente come supporto alle attività di ricerca, organizzazione delle informazioni e stesura preliminare di alcuni contenuti, con l'obiettivo di ottimizzare i tempi di lavoro senza compromettere il rigore scientifico della trattazione.

In particolare, durante la ricerca bibliografica sulla banca dati Scopus, l'intelligenza artificiale è stata utilizzata per tradurre in lingua italiana gli abstract degli articoli scientifici individuati attraverso le stringhe di ricerca. Tale procedura ha consentito una più rapida fase di screening preliminare delle centinaia di articoli risultati, facilitando la selezione degli articoli effettivamente pertinenti. La valutazione finale dell'idoneità delle fonti e la loro successiva lettura integrale sono state svolte direttamente dall'autrice.

Lo strumento NotebookLM, basato sul modello Gemini, è stato impiegato per agevolare la consultazione di documentazione tecnica particolarmente estesa, come i documenti BREF e altri testi specialistici di diverse centinaia di pagine. Il suo utilizzo è stato limitato all'individuazione delle sezioni e delle pagine contenenti le informazioni ricercate. Ogni informazione restituita dallo strumento è stata successivamente verificata consultando direttamente la fonte originale, leggendo integralmente i capitoli di riferimento e formulando autonomamente le valutazioni riportate nell'elaborato. L'intelligenza artificiale ha quindi svolto unicamente la funzione di supporto nell'individuazione della locazione delle informazioni, senza sostituire il processo di analisi critica delle fonti.

Gli strumenti di intelligenza artificiale sono stati inoltre utilizzati nella fase finale di generazione dell'abstract.

Tutti i contenuti prodotti con il supporto dell'intelligenza artificiale sono stati successivamente verificati, revisionati, rielaborati e, ove necessario, modificati dall'autrice, che si assume la piena responsabilità della correttezza, dell'accuratezza scientifica e della versione finale dell'intero elaborato.

L'autrice ritiene, inoltre, che l'utilizzo consapevole, critico e trasparente degli strumenti di intelligenza artificiale rappresenti una competenza destinata ad assumere un ruolo sempre più rilevante nella pratica professionale e nella ricerca scientifica, e che tali strumenti non debbano essere né temuti né utilizzati in modo acritico. Al contrario, il loro valore risiede nella capacità dell'utilizzatore di comprenderne potenzialità e limiti, impiegandoli come strumenti al servizio delle proprie competenze, del proprio metodo e del proprio spirito critico, senza mai delegare ad essi il processo decisionale o la responsabilità scientifica del lavoro svolto.

7 Indice delle figure

FIGURA 1.2.1: STEP DI PROCESSO CONCIA AL CROMO (BLACK, ET AL., 2013)	10
FIGURA 1.3.1: CARTA DEI CORPI IDRICI E BACINI IDROGRAFICI DEL VENETO (REGIONE VENETO, 2006)	11
FIGURA 1.3.2: ZOOM SU CONTESTO CHIAMPO – TOGNA – FRATTA - GORZONE	12
FIGURA 1.3.3: CANALIZZAZIONE COLLETTORE ARICA (A.RI.C.A., 2026)	13
FIGURA 2.1.1: VISTA DALL'ALTO DEPURATORE DI ARZIGNANO CON LINEA CIVILE IN ROSSO (ACQUE DEL CHIAMPO, 2026). 15	
FIGURA 2.1.2: VISTA DALL'ALTO DEPURATORE DI ARZIGNANO CON NUMERI IN BLU PER LA LINEA INDUSTRIALE (ACQUE DEL CHIAMPO, 2026).....	16
FIGURA 2.1.3: COCLEE (ARCHIVIO DI ACQUE DEL CHIAMPO S.P.A. SOCIETÀ BENEFIT, 2026)	16
FIGURA 2.1.4: FLOTTAZIONE (ARCHIVIO DI ACQUE DEL CHIAMPO S.P.A. SOCIETÀ BENEFIT, 2026)	18
FIGURA 2.1.5: CHIARIFLOCCULAZIONE (ARCHIVIO DI ACQUE DEL CHIAMPO S.P.A. SOCIETÀ BENEFIT, 2026)	19
TABELLA 2.1.1: INPUT E IN OUTPUT ALL'IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI ARZIGNANO	20
FIGURA 2.2.1: SILOS FANGO ESSICCATO E BIG-BAGS (ARCHIVIO DI ACQUE DEL CHIAMPO S.P.A. SOCIETÀ BENEFIT, 2026) .	21
FIGURA 2.2.2: DISCARICA CON ALBERI AD ALTO FUSTO (ARCHIVIO DI ACQUE DEL CHIAMPO S.P.A. SOCIETÀ BENEFIT, 2026)	22
FIGURA 2.2.3: DISCARICA CON FOTOVOLTAICO (ARCHIVIO DI ACQUE DEL CHIAMPO S.P.A. SOCIETÀ BENEFIT, 2026).....	23
TABELLA 3.1.1: CARATTERISTICHE FUNZIONAMENTO LINEA FANGHI IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI ARZIGNANO (STEVAN & ZERLOTTIN, 2017)	25
TABELLA 3.1.2: CARATTERISTICHE FUNZIONAMENTO LINEA FANGHI IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI MONTEBELLO VICENTINO (STEVAN & ZERLOTTIN, 2017).....	25
TABELLA 3.1.3: CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DEL FANGO PRODOTTO DALL'IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI ARZIGNANO (STEVAN & ZERLOTTIN, 2017)	26
TABELLA 3.1.4: CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DEL FANGO PRODOTTO DALL'IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI MONTEBELLO VICENTINO (STEVAN & ZERLOTTIN, 2017)	26
TABELLA 4.1.1: MATERIALI ALTERNATIVI ALLA PELLE AD OGGI CONOSCIUTI E IN PRODUZIONE, E LA LORO CLASSIFICAZIONE (WILLIAMS, CENIAN, GOLSTEIJN, MORRIS, & SCULLIN, 2022)	31
TABELLA 4.2.1: INPUT/OUTPUT DI UN PROCESSO CONVENZIONALE DI CONCIA AL CROMO DI PELLE BOVINA CONSERVATA A SALE (BLACK, ET AL., 2013).....	33
FIGURA 4.3.1: SCHEMA ILLUSTRATIVO DEL PROCESSO ANALIZZATO (WANG, ET AL., 2026)	35
TABELLA 4.3.1: PROPRIETÀ CHIMICO FISICHE DEL ML-TG	35
TABELLA 4.3.2: PROPRIETÀ CHIMICO FISICHE DEL MF-CR E MF-ZN	38
FIGURA 4.3.2: RAPPRESENTAZIONE DEL FINE MYCELIUM™ CON (SX) E SENZA (DX) TESSUTO INCORPORATO IN SITU	39
TABELLA 4.3.3: PROPRIETÀ CHIMICO-FISICHE E SENSORIALI (MATERIAL INNOVATION INITIATIVE, 2020)	40
FIGURA 4.3.3: CONFRONTO IMPRONTA DI CARBONIO TRA 1 M ² DI PELLE ANIMALE E 1 M ² DI REISHI™ SCENARIO 4 (WILLIAMS, CENIAN, GOLSTEIJN, MORRIS, & SCULLIN, 2022)	41
FIGURA 4.3.4: LCA DI 1 M ² DI REISHI NEI QUATTRO SCENARI CONFRONTATI CON 1 M ² DI PELLE BOVINA DI RIFERIMENTO, DOVE IL PUNTEGGIO PIÙ ALTO È SCALATO AL 100%. (WILLIAMS, CENIAN, GOLSTEIJN, MORRIS, & SCULLIN, SUPPORTING INFORMATION 1: LIFE CYCLE ASSESSMENT OF MYCOWORKS' REISHI™: THE FIRST LOW-CARBON AND BIODEGRADABLE ALTERNATIVE LEATHER , 2022).....	41
TABELLA 4.4.1: PORTATE INDUSTRIALI E TOTALI AL DEPURATORE NEI VARI SCENARI DI CONVERSIONE INDUSTRIALE	45

8 Bibliografia

(s.d.).

A.Ri.C.A. (2026, giugno). Tratto da <https://www.consortzioarica.it/>

Acque del Chiampo. (2026, giugno). Tratto da <https://www.acquedelchiampospa.it/>

Archivio di Acque del Chiampo S.p.A. Società Benefit. (2026).

Balsemin, M. (2025). *Antichi per sempre*.

Black, M., Canova, M., Rydin, S., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Tanning of Hides and Skins*. Commissione Europea.

Fracasso, S. (2010). *Quando l'acqua del Chiampo cambiava colore*.

Jones, M., Gandia, A., John, S., & Bismarck, A. (2021). Leather-like material biofabrication using fungi. *Nature SustainAbility*.

Lauro, F. D., Migliaccio, R., Ruoppolo, G., Balsamo, M., Montagnaro, F., Imperiale, E., . . . Urciuolo, M. (2022). Tannery Sludge Gasification in a Fluidized Bed for Its Energetic Valorization. *I&ECresearch*.

Lavagnolo, M. C. (2026). Ingegneria sanitaria ambientale.

Lgan city council. (2021). *Technical Report Loganholme Wastewater Treatment Plant: Biosolids Gasification Demonstration Plant (PBE-075)*.

Li, S., Cao, S., Wang, X., Zhang, Y., Zhang, X., Lu, W., & Zhu, D. (2024). Investigating the mechanism of Zn cross-linking of chitin in a mycelium-based leather substitute and its performance evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*.

Material innovation initiative. (2020). *TECHNOLOGY ASSESSMENT: MYCELIUM LEATHER*.

Poli, V. (2026). OPERAZIONI UNITARIE PER I RIFIUTI SOLIDI URBANI: LA TERMOVALORIZZAZIONE.

Regione del Veneto. (2017). *ACCORDO DI PROGRAMMA QUADRO TUTELA DELLE ACQUE E GESTIONE INTEGRATA DELLE RISORSE IDRICHE*.

Regione Veneto. (2006). Tratto da https://repository.regione.veneto.it/tutela-ambiente/Fig_3_1_Corpi_Idrici.pdf

Stevan, G., & Zerlottin, M. (2017). *Impianto di trattamento dei fanghi provenienti dagli impianti di depurazione di Arzignano e Montebello Vicentino RELAZIONE TECNICA - ILLUSTRATIVA*.

Team tecnico Acque del Chiampo. (2026, maggio 22). (S. Maggi, Intervistatore)

UNIC concerie italiane. (2026). *Relazione del presidente*.

Wang, X., Cao, S., Li, S., Sun, Y., Lu, W., & Wang, Y. (2026). Investigation of the tanning mechanism of mycelial leather alternative with genipin and its environmental impact evaluation. *Collagen and Leather*.

Williams, E., Cenian, K., Golsteijn, L., Morris, B., & Scullin, M. L. (2022). Life cycle assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather. *Environmental Sciences Europe*.

Williams, E., Cenian, K., Golsteijn, L., Morris, B., & Scullin, M. L. (2022). Supporting Information 1: Life Cycle Assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather .

Williams, E., Cenian, K., Golsteijn, L., Morris, B., & Scullin, M. L. (2022). Supporting Information 2: Life Cycle Assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather.