



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI BARI
ALDO MORO



DIPARTIMENTO JONICO IN SISTEMI
GIURIDICI ED ECONOMICI DEL MEDITERRANEO
SOCIETÀ, AMBIENTE, CULTURE
IONIAN DEPARTMENT OF LAW, ECONOMICS
AND ENVIRONMENT

16
2020

QUADERNI DEL DIPARTIMENTO JONICO

ESTRATTO da

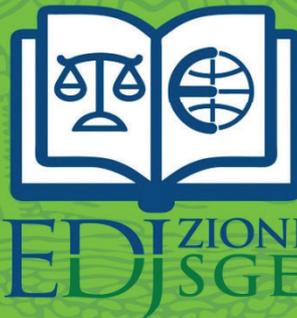
I SIMPOSIO DEI DOTTORANDI SUL TEMA
DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE

a cura di

Domenico Garofalo, Paolo Pardolesi, Anna Rinaldi

DOMENICO GAROFALO, PAOLO PARDOLESI, ANNA RINALDI

Il DJSGE e la sfida dello sviluppo sostenibile



ISBN: 978-88-945030-2-9

DIRETTORE DEL DIPARTIMENTO

Riccardo Pagano

DIRETTORI DEI QUADERNI

Caludia Capozza – Adriana Schiedi – Stefano Vinci

COMITATO SCIENTIFICO

Cesare Amatulli, Massimo Bilancia, Annamaria Bonomo, Maria Teresa Paola Caputi Jambrenghi, Carnimeo Nicolò, Daniela Caterino, Nicola Fortunato, Pamela Martino, Maria Concetta Nanna, Fabrizio Panza, Pietro Alexander Renzulli, Umberto Salinas, Paolo Stefani, Laura Tafaro, Giuseppe Tassielli.

COMITATO DIRETTIVO

Aurelio Arnese, Danila Certosino, Luigi Iacobellis, Ivan Ingravallo, Ignazio Lagrotta, Francesco Moliterni, Paolo Pardolesi, Angela Riccardi, Claudio Sciancalepore, Nicola Triggiani, Antonio Felice Uricchio (in aspettativa per incarico assunto presso l'ANVUR), Umberto Violante

COMITATO DI REDAZIONE

Patrizia Montefusco (Responsabile di redazione)
Federica Monteleone, Danila Certosino,
Dottorandi di ricerca (Francesca Altamura, Michele Calabria, Marco Del Vecchio, Francesca Nardelli, Francesco Scialpi, Andrea Sestino, Pierluca Turnone)

Contatti:

Dipartimento Jonico in Sistemi Giuridici ed Economici del Mediterraneo: Società, Ambiente, Culture

Convento San Francesco – Via Duomo, 259 – 74123 Taranto, Italy

e-mail: quaderni.dipartimentojonico@uniba.it

telefono: + 39 099 372382 • fax: + 39 099 7340595

<https://www.uniba.it/ricerca/dipartimenti/sistemi-giuridici-ed-economici/edizioni-digitali>

16
2020 QUADERNI
DEL DIPARTIMENTO JONICO

I SIMPOSIO DEI DOTTORANDI SUL TEMA
DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE

A cura di
DOMENICO GAROFALO, PAOLO PARDOLESI, ANNA RINALDI

Redazione a cura di Patrizia Montefusco



Il presente volume è stato chiuso per la pubblicazione in data 31 ottobre 2020 dall'editore "Dipartimento Jonico in Sistemi giuridici ed economici del Mediterraneo: società, ambiente, culture" dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro e messo in linea sul sito <http://edizionidjsge.uniba.it/i-quaderni> ed è composto di 464 pagine.

isbn 978-88-9450-302-9

REGOLAMENTO DELLE PUBBLICAZIONI DEL DIPARTIMENTO JONICO
IN SISTEMI GIURIDICI ED ECONOMICI DEL MEDITERRANEO:
SOCIETÀ, AMBIENTE, CULTURE – EDJSGE

Art. 1. Collane di pubblicazioni del Dipartimento Jonico

Il Dipartimento Jonico in Sistemi Giuridici ed Economici del Mediterraneo: società, ambiente, culture dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ha tre distinte collane:

- **Collana del Dipartimento Jonico** (d'ora in poi Collana Cartacea), cartacea, affidata alla pubblicazione di una Casa Editrice individuata con Bando del Dipartimento, ospita lavori monografici, atti congressuali, volumi collettanei.
- **Annali del Dipartimento Jonico**, collana di volumi pubblicata on line dal 2013 sul sito <https://www.uniba.it/ricerca/dipartimenti/sistemi-giuridici-ed-economici>, ospita saggi, ricerche, brevi interventi e recensioni collegati alle attività scientifiche del Dipartimento Jonico. Gli Annali del Dipartimento Jonico hanno cadenza annuale.
- **Quaderni del Dipartimento Jonico**, collana di volumi pubblicata on line sul sito <https://www.uniba.it/ricerca/dipartimenti/sistemi-giuridici-ed-economici>, ospita lavori monografici, atti congressuali, volumi collettanei monotematici.

Art. 2. Coordinamento delle Collane del Dipartimento Jonico

È istituito un Coordinamento delle Collane del Dipartimento Jonico formato dai Direttori delle tre collane che dura in carica per un triennio.

Il Coordinamento è diretto dal Direttore del Dipartimento in qualità di Direttore della Collana cartacea, ed è convocato, secondo le necessità, anche su richiesta dei Direttori delle Collane.

La riunione del Coordinamento a discrezione del Coordinatore può essere allargata anche ai componenti dei Comitati Direttivi delle tre collane dipartimentali.

Il Coordinamento approva o rigetta le proposte di pubblicazione dei volumi delle Collane, dopo l'espletamento delle procedure di referaggio da parte dei Direttori e dei Comitati Direttivi. In caso di referaggi con esito contrastante, il Coordinamento decide sulla pubblicazione del contributo, sentito il parere del Comitato Direttivo della collana interessata. Il Coordinamento provvede alla formazione dei Comitati scientifici e dei Comitati Direttivi secondo le modalità stabilite dagli articoli successivi.

Art. 3. Direttori delle Collane

La Collana Cartacea è diretta d'ufficio dal Direttore del Dipartimento Jonico che può nominare uno o più condirettori scelti tra i membri del Consiglio di Dipartimento che siano in possesso degli stessi requisiti di seguito elencati per i Direttori degli Annali e i dei Quaderni.

Il/i Direttore/i degli Annali del Dipartimento Jonico è/sono eletto/i dal Consiglio di Dipartimento.

Il/i Direttore/i dei Quaderni del Dipartimento Jonico è/sono eletto/i dal Consiglio di Dipartimento.

L'accesso alle cariche di Direttore degli Annali e dei Quaderni è riservato ai docenti in servizio presso il Dipartimento Jonico ed in possesso dei seguenti requisiti:

- professori ordinari in possesso delle mediane ASN richieste per la partecipazione alle commissioni per le abilitazioni nazionali;
- professori associati in possesso delle mediane ASN per il ruolo di professore ordinario;

- RTI in possesso dell'abilitazione per la II o la I fascia, o in possesso delle mediane ASN per partecipare alle abilitazioni per la II fascia;
- RTB in possesso di abilitazione alla II o alla I fascia.

I Direttori ricevono le istanze di pubblicazione secondo le modalità prescritte dagli articoli seguenti, valutano preliminarmente la scientificità della proposta tenendo conto del *curriculum* del proponente e dei contenuti del lavoro e procedono, nel caso di valutazione positiva, ad avviare le procedure di referaggio.

I Direttori presiedono i lavori dei Comitati Scientifici e Direttivi e relazionano periodicamente al Coordinamento.

I Direttori curano che si mantenga l'anonimato dei revisori, conservano tutti gli atti delle procedure di referaggio, informano sull'esito delle stesse gli autori invitandoli, ove richiesto, ad apportare modifiche/integrazioni, decidono, d'intesa con il Coordinamento, la pubblicazione o meno in caso di pareri contrastanti dei *referees*.

Art. 4. Comitati scientifici

Ogni collana ha un proprio comitato scientifico composto dai professori ordinari e associati del Dipartimento Jonico.

Il Consiglio di Dipartimento può deliberare l'inserimento nel Comitato Scientifico di studiosi italiani o esteri non appartenenti al Dipartimento Jonico.

Art. 5. Comitati Direttivi

Ciascuna delle tre Collane ha un Comitato Direttivo formato da professori e ricercatori, afferenti al Dipartimento Jonico, in possesso, per il rispettivo settore disciplinare, delle mediane richieste dall'ASN per il ruolo successivo a quello ricoperto o, se ordinari, per la carica di commissario alle abilitazioni nazionali.

A seguito di invito del Coordinatore delle Collane del Dipartimento Jonico gli interessati presenteranno istanza scritta al Coordinamento che, in base alle indicazioni del Consiglio di Dipartimento, provvederà alla scelta dei componenti e alla loro distribuzione nei tre Comitati Direttivi.

I Comitati Direttivi collaborano con il Direttore in tutte le funzioni indicate nell'art. 3 ed esprimono al Coordinamento il parere sulla pubblicazione nella loro Collana di contributi che hanno avuto referaggi con esiti contrastanti.

Art. 6. Comitato di Redazione

Le tre Collane sono dotate di un Comitato di Redazione unico, composto da ricercatori, dottori di ricerca e dottorandi, afferenti al Dipartimento Jonico e individuati dai Comitati Direttivi, che, sotto la direzione di un Responsabile di Redazione (professore ordinario, associato o ricercatore), nominato dal Coordinamento delle Collane del Dipartimento Jonico, cura la fase di controllo *editing*, preliminare all'espletamento della procedura di referaggio.

Art. 7. Procedura di referaggio

Tutte le Collane del Dipartimento Jonico adottano il sistema di revisione tra pari (*peer review*) con le valutazioni affidate a due esperti della disciplina cui attiene la pubblicazione individuati all'interno dei Comitati Scientifici o Direttivi, oppure, ove ritenuto necessario, all'esterno dei predetti Comitati.

La procedura di referaggio è curata dal Direttore della Collana con l'ausilio dei rispettivi Comitati Direttivi.

Art. 8. Proposta di pubblicazione

La proposta di pubblicazione deve essere indirizzata al Direttore della Collana su modulo scaricabile dal sito <https://www.uniba.it/ricerca/dipartimenti/sistemi-giuridici-ed-economici>, nel quale il proponente dovrà indicare le proprie generalità e sottoscrivere le liberatorie per il trattamento dei dati personali e per l'eventuale circolazione e pubblicazione on-line o cartacea del lavoro.

Se il proponente è uno studioso "non strutturato" presso una università o centro di ricerca italiano o estero, la proposta di pubblicazione dovrà essere accompagnata da una lettera di presentazione del lavoro da parte di un professore ordinario della disciplina cui attiene la pubblicazione proposta.

Alla proposta di pubblicazione il proponente deve allegare il proprio *curriculum vitae et studiorum* (ovvero rinviare a quello già consegnato in occasione di una precedente pubblicazione) e il file del lavoro in due formati, word e pdf.

Per la pubblicazione sulla Collana Cartacea il proponente dovrà indicare i fondi cui attingere per le spese editoriali.

Le proposte di pubblicazione dovranno attenersi scrupolosamente ai criteri editoriali pubblicati sul sito <https://www.uniba.it/ricerca/dipartimenti/sistemi-giuridici-ed-economici/edizioni-digitali/come-pubblicare/criteri-redazionali-1>

Nel caso di non corrispondenza, o di corrispondenza parziale, il Responsabile di Redazione, coadiuvato dal Comitato di Redazione, invierà agli autori le indicazioni cui attenersi per la fase di *editing*.

Nel caso siano previste scadenze, pubblicate sul sito, la proposta dovrà tassativamente entro la data indicata, pena la non ammissibilità della stessa.

INDICE

DOMENICO GAROFALO, PAOLO PARDOLESI, ANNA RINALDI
Il DJSGE e la sfida dello sviluppo sostenibile. pag.9

SEZIONE I

GOAL N. 3 – SALUTE E BENESSERE

DANIELA LAFRATTA
*Tutela della salute e processi organizzativi nella sanità pubblica.
Un approccio al modello just in time nella prospettiva Kaizen.* pag.27

SEZIONE II

GOAL N. 4 – QUALITÀ DELL'ISTRUZIONE

PIERLUCA TURNONE
*L'idea di uomo nell'Agenda ONU 2030: una riflessione
antropologico-educativa* « 43

VALENTINA SAMPIETRO
Cultura, stile di vita sostenibile « 55

ROSATILDE MARGIOTTA
*La parola, strumento per lo sviluppo della democrazia:
traiettorie pedagogiche* « 71

SEZIONE III

GOAL N. 8 – LAVORO DIGNITOSO E CRESCITA ECONOMICA

MICHELE CALABRIA
Covid 19 e paralisi del mercato del lavoro tra sospensione

della condizionalità e blocco dei licenziamenti « 85

MICHELE DELEONARDIS

Lavoro autonomo e lavoro dignitoso nella prospettiva comunitari « 97

FRANCESCA NARDELLI

La questione salariale: il dibattito italiano ed europeo « 109

GIUSEPPE COLELLA

*Promozione del turismo sostenibile in un contesto urbano:
uno studio esplorativo sul caso Taranto capitale di mare* « 121

SEZIONE IV

GOAL N. 9 – IMPRESA, INNOVAZIONE E INFRASTRUTTURE

ANNALISA TURI

Come il fisco può agevolare lo sviluppo sostenibile « 141

RAFFAELE MUTO

Bias e Monopoli « 151

SEZIONE V

GOAL N. 10 – RIDURRE LE DISEGUAGLIANZE

FEDERICA STAMERRA

Reddito di cittadinanza e riduzione delle disuguaglianze sociali « 165

STEFANO ROSSI

La disciplina lavoristica nel terzo settore « 175

ALESSIO CARACCILO

*L'accesso degli stranieri extra-UE alle prestazioni di assistenza
sociale* « 191

SONIA MEGGIATO

*Gender mainstreaming: dalle strategie comunitarie alle politiche
locali* « 205

VALERIA CASTELLI
*Quote rosa e nuovo codice di autodisciplina per le società
quotate: l'annosa problematica sociale della disuguaglianza
di genere* « 221

MARCO DEL VECCHIO
*Non tradirai la promessa. Il ruolo dei riti juju nelle esperienze
di tratta delle donne nigeriane* « 227

SEZIONE VI

GOAL N. 11 – CITTÀ E COMUNITÀ SOSTENIBILI

ANGELO RUGGERI
*L'innovazione strategica sostenibile nelle organizzazioni museali:
il caso del MarTa di Taranto* « 241

MAURIZIO MARAGLINO MISCIAGNA
*La co-creazione di valore nel settore pubblico:
spunti di riflessione* « 255

SEZIONE VII

GOAL N. 12 – CONSUMO E PRODUZIONE RESPONSABILI

ANDREA SESTINO
*Gli effetti del benessere sociale percepito sull'intenzione di
acquisto dei prodotti green* « 269

MASSIMO COCOLA
*La non financial disclosure nel processo di transizione
dei modelli organizzativi verso una prospettiva social orientated* « 287

FRANCESCO SCIALPI
*La plastic tax e la sugar tax nella legge di bilancio 2020:
limiti e prospettive* « 299

ROSA DI CAPUA, PETER A. RENZULLI
*Modellizzazione delle emissioni di biogas dalle discariche
di rifiuti solidi urbani: una review della letteratura* « 311

- ROSA DI CAPUA, PETER A. RENZULLI
Life cycle assessment di impianti di produzione di biodiesel da fanghi di depurazione: una review bibliografica « 325
- ROSA DI CAPUA, BRUNO NOTARNICOLA
Life cycle assessment di reattori fotovoltaici UV-C/TiO₂ per il trattamento di acque reflue: una review bibliografica « 337
- ROSA DI CAPUA,
Novità normative in materia di economia circolare e simbiosi industriale « 349

SEZIONE VIII

GOAL N. 13 – LOTTA CONTRO IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

- CLAUDIA ILARIA SOFIA LOVASCIO
Polluter pays principle: un dovere verso le nuove generazioni « 363
- ERVINA RRUGA
Lo standard europeo dei green bonds per lo sviluppo della finanza sostenibile: quale opportunità per l'ambiente? « 373
- FRANCESCA ALTAMURA
Gli strumenti di mercato nella lotta al cambiamento climatico: riflessioni in chiave di analisi economica del diritto « 389
- NICOLÒ TREGLIA
Lo stato dell'arte e i profili evolutivi della fiscalità dei prodotti energetici: dai combustibili fossili alle fonti rinnovabili nell'ottica di una transizione ecologica « 403

SEZIONE IX

GOAL N. 16 – PACE, GIUSTIZIA E ISTITUZIONI SOLIDE

- COSIMA ILARIA BUONOCORE
Il possibile contributo dell'arbitrato allo sviluppo sostenibile « 419

MARIO SANTORO

La tutela linguistica della persona offesa dal reato nel processo penale italiano

« 435

DORELLA QUARTO

La progressiva espansione del patrocinio a spese dello Stato in ambito penale: dall'estensione "in deroga" per le vittime vulnerabili alla preclusione per gli enti

« 449

LIFE CYCLE ASSESSMENT DI REATTORI FOTOCATALITICI UV-C/TiO₂ PER IL TRATTAMENTO DI ACQUE REFLUE: UNA REVIEW BIBLIOGRAFICA

ABSTRACT

Il problema del trattamento delle acque reflue è un tema fortemente discusso dagli studiosi di tutto il mondo. Al fine di promuovere l'uso efficiente delle risorse idriche nell'ambito del Goal 12 dell'Agenda 2030, oggi si sono sviluppate diverse tecnologie per la degradazione degli inquinanti in matrice acquosa, a tal proposito la fotocatalisi è una tecnologia nascente sviluppata su scala di laboratorio e che presenta applicazioni su scala prototipo. Il presente lavoro illustra una review bibliografica degli studi di Life Cycle Assessment applicata agli impianti di trattamento fotocatalitici che utilizzano la radiazione UV e nanoparticelle di biossido di titanio come catalizzatori.

The problem of wastewater treatment is a topic strongly discussed by scholars all over the world. In order to promote the efficient use of water resources as part of Goal 12 of the 2030 Agenda, today several technologies have developed for the degradation of pollutants in an aqueous matrix, in this regard photocatalysis is a nascent technology developed on a laboratory scale and which presents applications on a prototype scale. This work illustrates a bibliographic review of the Life Cycle Assessment studies applied to photocatalytic treatment plants that use UV radiation and titanium dioxide nanoparticles as catalysts.

PAROLE CHIAVE

Trattamento acque reflue – Fotocatalisi – Life Cycle Assessment

Wastewater treatment - Photocatalysis - Life Cycle Assessment

SOMMARIO: 1. Introduzione. – 2. Materiali e metodi – 3. Aspetti metodologici negli studi di LCA di sistemi di fotocatalisi UV-C/TiO₂. - 3.1 Sistema oggetto di studio e definizione dei confini – 3.2 Scelta dell'unità funzionale e problematiche di allocazione - 3.3 Raccolta dei dati di inventario - 3.4 Risultati della valutazione degli impatti ambientali - 4. Conclusioni. – 5. Bibliografia

1. Il problema della scarsità di acqua continua a crescere in molte regioni del mondo per cui diventa sempre più sentito il bisogno di riutilizzare le acque reflue. Per questa ragione, i sistemi di trattamento delle acque rappresentano un argomento vitale, specialmente nei paesi in via di sviluppo (Alfano et al., 2000).

Nel tempo si sono sviluppate differenti tecnologie di trattamento, alcune sviluppate su larga scala e altre in via di sperimentazione. In particolare, l'ossidazione fotochimica si è dimostrata una valida opzione per la rimozione di sostanze inquinanti dalle acque di scarico su scala di laboratorio. Questo processo ha mostrato un grande potenziale e

si è dimostrato un trattamento a basso costo, rispettoso dell'ambiente e sostenibile nel settore delle acque (Chong et al., 2010). Le tecnologie di trattamento delle acque attualmente commercializzate, come l'adsorbimento o la coagulazione concentrano semplicemente le sostanze inquinanti presenti trasferendole in altre fasi del ciclo di vita (Padmanabhan et al., 2006). Altri metodi convenzionali di trattamento dell'acqua come quello biologico non sono in grado di rimuovere efficacemente sostanze chimiche dannose in essa presenti. Molteplici, invece, sono i vantaggi della fotocatalisi che, grazie alla formazione di radicali idrossilici, consente di degradare in maniera significativa gli inquinanti recalcitranti presenti nelle acque e di mineralizzarli a CO₂ e H₂O senza trasferirli in altre fasi del ciclo di vita. Particolarmente interessante è la capacità di queste tecnologie di rimuovere gli inquinanti emergenti da un effluente. Gli inquinanti emergenti sono sostanze con un elevato potenziale di degradazione delle acque marine e responsabili di causare gravi danni agli organismi e ai processi biologici. Si parla infatti di distruttori endocrini, sostanze che interferiscono con la sintesi, secrezione, trasporto, legame o eliminazione di un ormone fisiologicamente prodotto in un essere vivente (Colacci, 2016). Tra i principali inquinanti emergenti troviamo prodotti farmaceutici, pesticidi di nuova registrazione, additivi plastici industriali, prodotti per la cura personale e nuovi ritardanti di fiamma.

Nell'ambito della fotocatalisi, esistono numerose applicazioni come la fotolisi solare naturale e simulata, il processo photo-Fenton solare con o senza aggiunta di perossido di idrogeno (solare/Fe/H₂O₂ - solare/Fe), fotolisi sotto irradiazione UV-A (UV-A), fotocatalisi sotto irradiazione UV-A con aggiunta di biossido di titanio (UV-A/TiO₂), fotolisi sotto irradiazione UV-C (UV-C) e trattamento UV-C con aggiunta di perossido di idrogeno (UV-C/H₂O₂) (Foteinis et al., 2018).

Lo strumento di Life Cycle Assessment (LCA) applicato a queste tecnologie consente di valutare la sostenibilità di ciascun impianto. In letteratura esistono diversi studi di LCA applicata a questi processi che dimostrano come gli impianti di trattamento fotocatalitici che impiegano catalizzatori siano a ridotto impatto ambientale. In particolare, l'obiettivo del presente lavoro è quello di analizzare gli studi di LCA applicata a sistemi di fotocatalisi sotto irradiazione UV con aggiunta di biossido di titanio e comprendere gli approcci metodologici degli autori nel condurre tali studi. L'analisi della letteratura sarà successivamente impiegata come base di partenza per l'attuale studio di LCA di un fotoreattore che sfrutta questa tecnologia nell'ambito del progetto PON Energie per l'Ambiente - TARANTO "Tecnologie e processi per l'Abbattimento di inquinanti e la bonifica di siti contaminati con Recupero di materie prime e produzione di energia Totally green".

2. La *review* bibliografica degli studi di LCA applicata a reattori fotocatalitici UV-C/TiO₂ ha portato alla comprensione di come vari autori hanno affrontato le diverse problematiche di studio e le assunzioni prese per una corretta valutazione degli impatti ambientali.

In particolare, la rassegna bibliografica ha l'obiettivo di affrontare nel dettaglio i seguenti aspetti:

- Comprensione del sistema oggetto di studio e definizione dei confini;
- Scelta dell'unità funzionale e problematiche di allocazione;
- Raccolta dei dati di inventario;
- Risultati della valutazione degli impatti ambientali.

L'analisi bibliografica è stata condotta consultando fonti bibliografiche internazionali utilizzando Scopus come motore di ricerca e selezionando gli articoli scientifici attraverso l'impiego di diverse combinazioni di parole chiave quali "Life Cycle Assessment", "photocatalysis", "UV-C/TiO₂", "wastewater".

3. Il presente paragrafo riporta i diversi aspetti metodologici affrontati in letteratura nel condurre uno studio di LCA di fotoreattori equipaggiati con lampada UV che utilizzano nano particelle di biossido di titanio come catalizzatore. Nei sotto paragrafi seguenti si descrivono le scelte metodologiche relativamente alla definizione dei confini del sistema, la scelta dell'unità funzionale e le eventuali problematiche di allocazione, i dati di inventario utilizzati per la fase successiva di valutazione degli impatti e i risultati più rilevanti di questi studi.

3.1 Un reattore fotocatalitico UV-C/TiO₂ ha una configurazione anulare e un funzionamento di tipo batch che permette il ricircolo completo delle acque reflue per mezzo di una pompa peristaltica che ne determina la portata. Il reattore è costituito da due tubi cilindrici coassiali in vetro con diametro diverso. All'interno del cilindro con diametro minore viene alloggiata la lampada UV per illuminare il reattore durante le prove (figura 3-1).

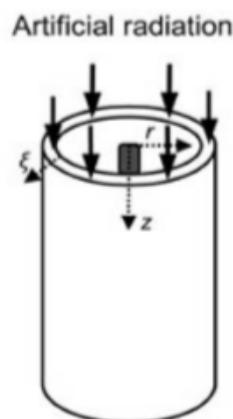


Figura 3-1: Esempio di reattore fotocatalitico

UV-C/TiO₂ - (Fonte: Li Puma, 2005)

I catalizzatori nanostrutturati a base di TiO_2 possono essere depositati sia su matrici solide o utilizzati in forma di polvere da utilizzare come sospensione acquosa (come illustrato in figura 3-2). In quest'ultimo caso, la soluzione acquosa, dopo il mescolamento con polvere di TiO_2 nella sezione d'ingresso del reattore, viene inviata nella parte bassa del reattore, fluisce lungo la sezione anulare tra i tubi per poi uscire dalla parte alta del reattore (Cardillo, 2015).

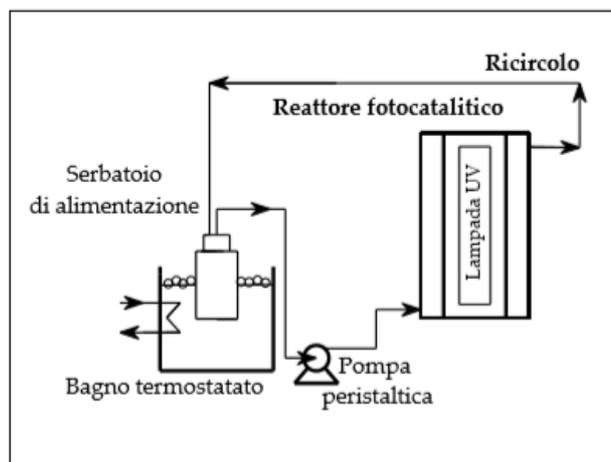
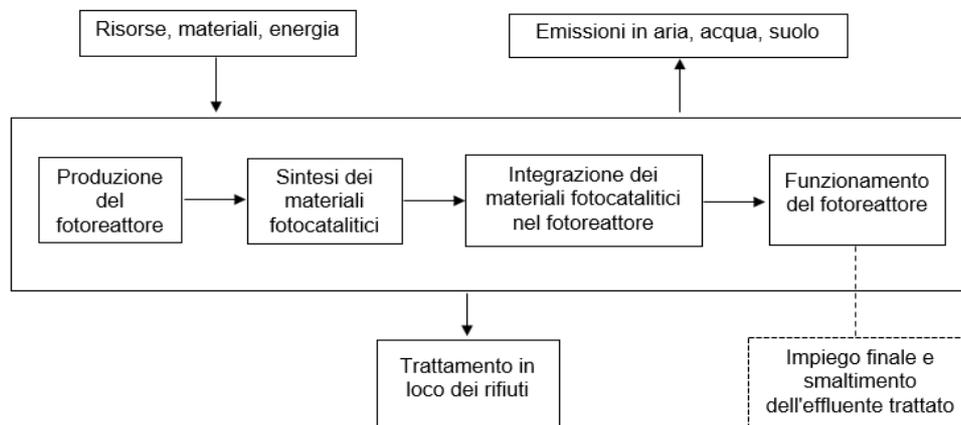


Figura 3-2: Esempio di schema fotoreattore con polvere di TiO_2 in soluzione acquosa

(Fonte: Cardillo, 2015)

Negli studi di LCA applicata a questa tipologia di fotoreattori, gli input di materiali e di energia, le emissioni in aria, acqua e suolo, lo smaltimento o il riciclaggio dei materiali, se non effettuati da terzi, sono inclusi nei confini del sistema. L'approccio seguito dagli autori è del tipo cradle-to-gate, in quanto l'impiego finale e lo smaltimento dell'effluente trattato è esterno ai confini del sistema. (Foteinis et al., 2018; Lutterbeck et al., 2017). In figura 3-3 si riporta lo schema dei confini del sistema oggetto di studio secondo quanto suggerito dalla letteratura.



Legenda:

_____ processi inclusi nei confini del sistema

..... processi esclusi dai confini del sistema

Figura 3-3: Schema dei confini del sistema di un reattore fotocatalitico UV-A/TiO₂

(Fonte: elaborazione propria)

Nei confini del sistema sono da includere inoltre la fase di produzione e di uso del fotoreattore, la sintesi e il processing dei materiali fotocatalitici, costituiti da materiali nanostrutturati a base di TiO₂, da integrare nel fotoreattore. A tal proposito, esistono molteplici processi di sintesi chimica, fisica e biologica di questi materiali, per i quali gli studi di LCA presenti in letteratura hanno permesso di comprendere quale sia il più ecosostenibile.

3.2. Un'altra problematica da affrontare in uno studio di LCA di sistemi di fotocatalisi UV-C/TiO₂ riguarda la scelta dell'unità funzionale a cui riferire i dati di inventario da raccogliere. Dall'analisi della letteratura è emerso come la funzione del sistema sia stata impostata da diversi autori come la rimozione degli inquinanti emergenti in un effluente. Diversa invece la scelta dell'unità funzionale a seconda dell'inquinante scelto:

- Fotoreattore UV-A/TiO₂ per la rimozione di inquinanti emergenti: l'unità funzionale scelta è la rimozione efficace di 1 µg di 17α-etinilestradiolo, un estrogeno sintetico rappresentativo molto stabile in ambiente acquoso, per litro di acque reflue trattate (Marinho et al., 2013; Foteinis et al., 2018);

- Fotoreattore UV-A/TiO₂ per la rimozione di inquinanti organici da acque industriali: l'unità funzionale è stata definita come la rimozione del 15% di DOC (Carbonio Organico Disciolto Totale) da 1 m³ di acque reflue (Muñoz et al., 2005);

- Fotoreattore UV per la rimozione di inquinanti da acque reflue agricole: trattamento di 1.000 m³ di acque reflue per fini irrigui, per abbattimento di 1 log di Escherichia coli (Notarnicola et al., 2009).

Per quanto riguarda la sintesi delle nanoparticelle di biossido di titanio, in letteratura si è scelta come unità funzionale la produzione di 1 kg di nanoparticelle di TiO₂ (Wu et al., 2019). Per questi sistemi non è emersa la necessità di affrontare la problematica dell'allocazione in quanto non ci sono coproduzioni.

3.3 I dati di inventario utilizzati negli studi di LCA di fotoreattori UV-C/TiO₂ comprendono dati relativi al consumo di risorse, materiali ed energia e alle emissioni in aria, acqua e suolo in uscita dal sistema. La maggior parte degli studi analizzati utilizza dati ottenuti da esperimenti di laboratorio tratti dalla letteratura. In mancanza di questi dati si fa riferimento a dati di database. Partendo dalla fase di produzione del fotoreattore, lo studio scientifico di Lutterbeck et al. (2017) riporta l'inventario dei dati di input dei materiali necessari per la produzione del fotoreattore su scala di laboratorio equipaggiato con lampada UV a 254 nm della potenza di 15 W e peso di 12 kg (tabella 3-1).

Tabella 3-1: Input materiali ed energetici della fase di costruzione del fotoreattore UV-C/TiO₂ (Lutterbeck et al., 2017)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|------------------------------------|----------|
| Materia in ingresso | Pompa 70 W | 3 |
| | Cavi elettrici | 5 |
| | Lampade a vapori di mercurio 9 W | 0,15 |
| | Multi Si wafer (4 m ²) | 4 |

Per quanto riguarda la sintesi delle nanoparticelle di biossido di titanio, lo studio più interessante dove è possibile ritrovare dati di inventario dei processi chimici, fisici e biologici di sintesi è quello condotto da Wu et al. (2019). In questo studio gli autori hanno condotto studi di LCA di questi processi al fine di individuare la soluzione più ecosostenibile. A tal proposito la sintesi chimica delle nanoparticelle di TiO₂ risulta essere quella di minore impatto ambientale. Si riportano nelle tabelle 3-3, 3-4, 3-5 gli inventari dei principali processi di sintesi chimica di questi catalizzatori nanostrutturati: metodo sol-gel, processo idrotermico e solvotermico. Il metodo sol-gel si basa in genere sull'idrolisi dei precursori dell'alcossido di titanio per formare una sospensione colloidale con alcoli come sottoprodotto, il processo idrotermico prevede tre fasi di idrolisi che avvengono in autoclave a determinate condizioni di pressione e temperatura (Maury-Ramirez et al., 2012), il metodo solvotermico è molto simile a quello idrotermico ad eccezione dell'uso di solventi organici invece dell'impiego di acqua. Per ciascuna reazione chimica, l'applicazione della LCA richiede un inventario dell'energia, dei reagenti e dei materiali ausiliari consumati, nonché delle emissioni e

dei rifiuti generati, offrendo così una visione olistica delle implicazioni ambientali della reazione. L'unità funzionale scelta per la raccolta dei dati è il kg di nanoparticelle di TiO₂. Ciascuna di queste reazioni è preceduta dalla fase di preparazione del precursore di titanio (isopropossido di titanio) utilizzato come materia prima nelle successive fasi (tabella 3-2).

Tabella 3-2: Input materiali ed energetici necessari per la produzione di 1 kg di precursore di titanio (isopropossido di titanio) (Wu et al., 2019)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|--------------------------------|----------|
| Materia in ingresso | Tetracloruro di titanio (kg) | 0,83 |
| | Isopropanolo (kg) | 1,05 |
| | Ammoniaca (kg) | 0,3 |
| | Benzene (kg) | 1,6 |
| | Gas naturale (m ³) | 0,0375 |
| Elettricità/calore | Energia (MJ) | 0,03 |

Tabella 3-3: Input materiali ed energetici necessari per la produzione di 1 kg di nanoparticelle di TiO₂ mediante metodo sol-gel (Wu et al., 2019)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|---|----------|
| Materia in ingresso | Isopropossido di titanio (kg) | 3,56 |
| | Isopropanolo (kg) | 0,75 |
| | Acqua (kg) | 12,65 |
| Elettricità/calore | Energia (processo di sonicazione) (MJ) | 0,61 |
| | Energia (processo di calcinazione) (MJ) | 14,8 |
| | Energia (processo di essiccazione) (MJ) | 2,92 |

Tabella 3-4: Input materiali ed energetici necessari per la produzione di 1 kg di nanoparticelle di TiO₂ mediante invecchiamento idrotermico (Wu et al., 2019)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|--|----------|
| Materia in ingresso | Isopropossido di titanio (kg) | 3,56 |
| | H ₂ O (kg) | 12,52 |
| | Acido acetico (4 mol/L) | 3 |
| Elettricità/calore | Energia (autoclave 180 °C per 12 ore) (MJ) | 8,06 |
| | Energia (essiccazione a 100 °C) (MJ) | 30,43 |
| | Energia (aumento fino a 100 °C) (MJ) | 3,94 |

Tabella 3-5: Input materiali ed energetici necessari per la produzione di 1 kg di nanoparticelle di TiO₂ mediante processo solvotermico (Wu et al., 2019)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|---|----------|
| Materia in ingresso | Isopropossido di titanio (kg) | 3,56 |
| | HCl (30%) (kg) | 0,37 |
| | Acqua | 0,04 |
| | Butanolo (kg) | 21,15 |
| Elettricità/calore | Energia (autoclave) (MJ) | 9,29 |
| | Energia (processo di essiccazione) (MJ) | 19,45 |

Dopo la fase di sintesi, segue la fase di integrazione dei materiali fotocatalitici nel reattore. Per quanto riguarda tale fase, esistono studi di LCA applicata all'incorporazione di questi nanomateriali in membrane polimeriche poi adattate nel fotoreattore (Chong et al., 2018; Bae & Tak, 2005; Zhang et al., 2015). Di particolare interesse, per le loro caratteristiche merceologiche, sono le membrane in polivinilidenefluoruro (PVDF) largamente impiegate per incorporare nanoparticelle di biossido di titanio. Il polimero PVDF ha un'alta stabilità termica e resistenza chimica grazie all'elevata energia di dissociazione del fluoruro di carbonio.

Un altro interessante metodo di integrazione delle nanoparticelle di TiO₂ nel fotoreattore riportato in letteratura consiste nella immobilizzazione di TiO₂ su rete metallica attraverso un processo di deposizione delle polveri di questo nanomateriale (Villacres et al., 2003). Si riporta di seguito l'inventario dei dati di input e di output del processo (tabella 3-6).

Tabella 3-6: Input materiali ed energetici necessari per l'immobilizzazione di TiO₂ per cm² di rete metallica (Villacres et al., 2003)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|---|----------|
| Materia in ingresso | Isopropanolo (cm ³) | 0,284 |
| | Titanio tetra-2-propossido (g) | 0,0024 |
| | TiO ₂ powder (mg) | 10 |
| | Rete metallica (cm ²) | 1 |
| OUTPUT | | |
| Prodotto | Rete metallica di supporto (cm ²) | 1 |

A tal proposito, lo studio di Foteinis et al. (2018), riporta l'inventario della fase di utilizzo dell'impianto (tabella 3-7). Tutti gli esperimenti sono stati condotti alle stesse condizioni di temperatura e acqua, mentre l'irradiazione UV-A è stata fornita da una lampada da 9 W. Il tempo di trattamento dell'acqua in questo reattore è di 10 minuti. I dati di inventario riportati si riferiscono alla rimozione di 95 µg di 17α-etinilestradiolo per litro di acque reflue trattate (Frontistis et al., 2012).

Tabella 3-7: Input materiali ed energetici necessari per il funzionamento di un fotoreattore da laboratorio UV-A/TiO₂ riferiti alla rimozione di 95 µg/L di 17α-etinilestradiolo (Foteinis et al., 2018)

| INPUT | | Quantità |
|----------------------------|---|----------|
| Materia in ingresso | TiO ₂ (mg/L) | 750 |
| Elettricità/calore | Elettricità (miscelazione dell'acqua) (kWh) | 0,005 |
| | Elettricità (kWh) | 0,0015 |

3.4. La valutazione degli impatti del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment) mette in relazione l'inventario dei dati con impatti e danni ambientali potenziali. L'obiettivo degli studi analizzati è quello di comprendere le criticità ambientali delle diverse fasi del ciclo di vita dei fotoreattori UV-C/TiO₂.

Per quanto riguarda la valutazione degli impatti ambientali dei processi di sintesi delle nanoparticelle di TiO₂, i processi chimici sono più ecosostenibili dei processi di sintesi fisica e biologica in quanto richiedono meno energia e generano un minore impatto ambientale (Figura 3-4). I processi fisici, invece, richiedono una notevole quantità di elettricità e gas di supporto, con impatti elevati sull'effetto serra, mentre i processi di sintesi biologica, hanno un elevato impatto ambientale a causa dei terreni di coltura batterica richiesti. Tra i processi chimici, il metodo sol-gel risulta essere il meno impattante grazie ai più bassi consumi di energia.

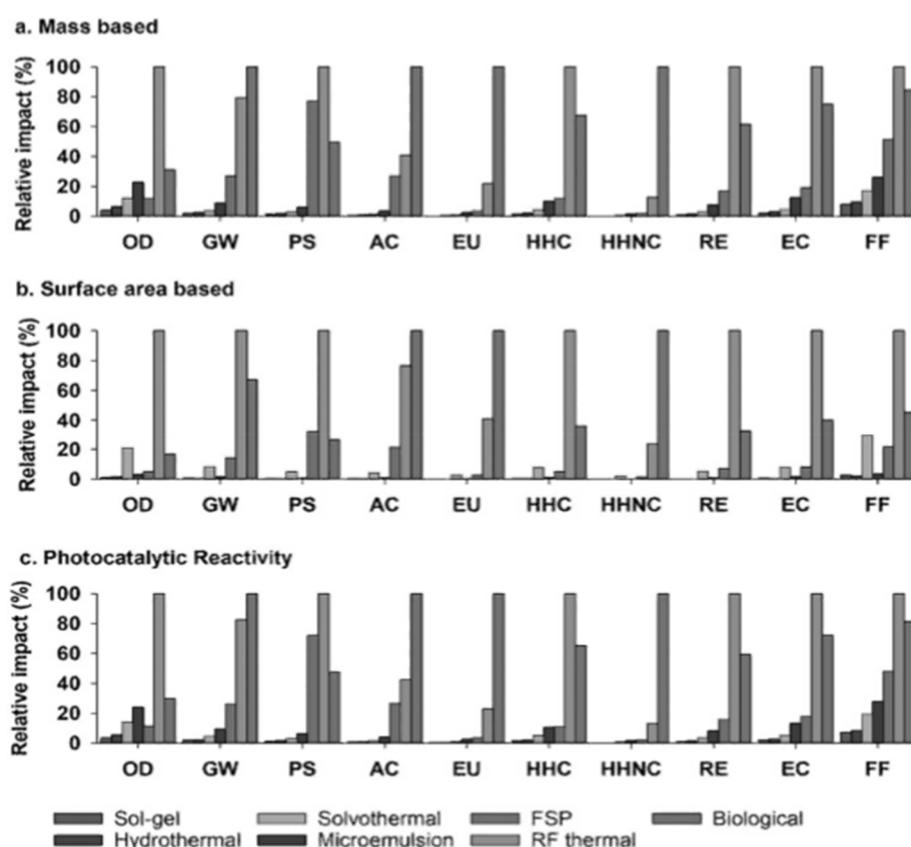


Figura 3-4: Impatto ambientale di tutti i metodi di sintesi delle nanoparticelle di TiO₂ Normalizzazione basata sulla superficie e reattività fotocatalitica (Wu et al., 2019)

Per quanto riguarda gli impatti ambientali dei fotoreattori, lo studio condotto da Lutterbeck et al. (2017) ha mostrato che il 67,3% degli impatti ambientali sia legato alla fase di costruzione dei reattori, mentre il 32,7% è associato al funzionamento del sistema. In particolare, il 99% degli impatti legati alla fase di costruzione dei fotoreattori, tossicità ed eutrofizzazione, è dovuto all'impiego dei materiali utilizzati per la produzione del Multi-Si wafer. Per quanto riguarda invece la fase di funzionamento dell'impianto, è il consumo di energia elettrica il principale punto critico del sistema. Per quanto riguarda la valutazione degli impatti ambientali delle diverse tecnologie utilizzate per l'ossidazione fotochimica delle acque reflue, gli studi mostrano come la fotolisi UV ha mostrato un basso impatto ambientale, con la fotolisi sotto irradiazione UV-C trovata circa 3 volte più ecologica della fotolisi sotto irradiazione UV-A. L'aggiunta di TiO_2 al processo di fotolisi sotto irradiazione UV-A e H_2O_2 al processo di fotolisi sotto irradiazione UV-C è in grado di ridurre il loro impatto ambientale totale di circa il 97% e l'88% rispettivamente, il che implica che il processo UV-A/ TiO_2 risulti migliore del processo UV-C/ H_2O_2 per i minori consumi di energia (Foteinis et al., 2018).

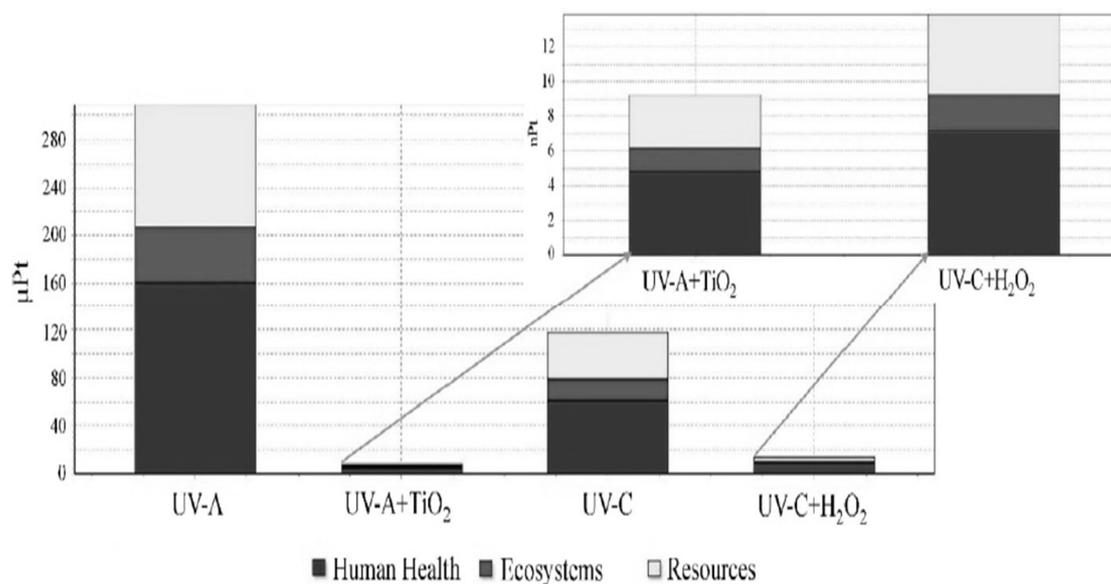


Figura 3-5: Impatto ambientale dei fotoreattori UV-A/ TiO_2 e UV-C/ H_2O_2

(Fonte: Foteinis et al., 2018)

4. Il presente lavoro ha analizzato studi di LCA applicati a sistemi di fotocatalisi UV-C/ TiO_2 al fine di comprendere come gli autori hanno affrontato le problematiche metodologiche e avere un riferimento per i successivi studi. L'analisi della letteratura è stata utile per comprendere gli approcci metodologici dei vari autori nel condurre tali studi al fine di supportare in concreto l'analisi del ciclo di vita di questi impianti ancora

in fase di implementazione e fare la scelta più eco-sostenibile tra diverse alternative tecnologiche.

In particolare, per queste tecnologie in via di sperimentazione si sono evidenziate le scelte fatte nelle diverse fasi di studio: definizione dei confini del sistema, scelta dell'unità funzionale e raccolta dei dati di inventario. Inoltre, si sono analizzati i risultati degli studi, al fine di comprendere i punti critici dei sistemi dal punto di vista del loro impatto ambientale e le soluzioni più ecosostenibili. Dall'analisi emerge come i fotoreattori UV-C/TiO₂ rappresentino una delle tecnologie a minore impatto ambientale per il trattamento delle acque reflue grazie all'utilizzo dei fotocatalizzatori nanostrutturati. Tra i processi di sintesi di questi nanomateriali, i processi chimici risultano essere più ecosostenibili dei processi di sintesi fisica e biologica.

Bibliografia:

Alfano, O. M., Bahnemann, D., Cassano, A. E., Dillert, R., & Goslich, R. (2000). Photocatalysis in water environments using artificial and solar light. *Catalysis today*, 58(2-3), 199-230.

Bae, T.H., Tak, T.M., (2005). Effect of TiO₂ nanoparticles on fouling mitigation of ultrafiltration membranes for activated sludge filtration. *J. Membr. Sci.* 249, 1-8.

Cardillo, A. G. (2015). Processi integrati per l'intensificazione di processo: reazione di fotocatalisi accoppiata alla pervaporazione, la dialisi e all'ozonizzazione (Doctoral dissertation, alma).

Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology:

Chong, W. C., Chung, Y. T., Teow, Y. H., Zain, M. M., Mahmoudi, E., & Mohammad, A. W. (2018). Environmental impact of nanomaterials in composite membranes: Life cycle assessment of algal membrane photoreactor using polyvinylidene fluoride-composite membrane. *Journal of Cleaner Production*, 202, 591-600.

Colacci A. (2016). Contaminanti emergenti, gli studi in Europa, *ECOSCIENZA* Numero 6 - Anno 2016, pp. 50-51

Foteinis, S., Borthwick, A. G., Frontistis, Z., Mantzavinos, D., & Chatzisyneon, E. (2018). Environmental sustainability of light-driven processes for wastewater treatment applications. *Journal of Cleaner Production*, 182, 8-15.

Li Puma, G. (2005). Dimensionless analysis of photocatalytic reactors using suspended solid photocatalysts. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(7), 820-826.

Lutterbeck, C. A., Kist, L. T., Lopez, D. R., Zerwes, F. V., & Machado, Ê. L. (2017). Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, 148, 527-536.

Marinho, B. A., de Liz, M. V., Tiburtius, E. R. L., Nagata, N., & Peralta-Zamora, P. (2013). TiO₂ and ZnO mediated photocatalytic degradation of E2 and EE2 estrogens. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 12(4), 678-683.

Maury-Ramirez, A., Demeestere, K., & De Belie, N. (2012). Photocatalytic activity of titanium dioxide nanoparticle coatings applied on autoclaved aerated concrete: effect of weathering on coating physical characteristics and gaseous toluene removal. *Journal of hazardous materials*, 211, 218-225.

Muñoz, I., Rieradevall, J., Torrades, F., Peral, J., & Domènech, X. (2005). Environmental assessment of different solar driven advanced oxidation processes. *Solar Energy*, 79(4), 369-375.

Notarnicola B., (2009). XII Relazione Trimestrale sullo stato di avanzamento del progetto SIRPAR - Unità di Ricerca UNIBA – DGM “Valutazione del ciclo di vita di impianti e sistemi per l’affinamento di acque reflue municipali”.

Padmanabhan, P.V.A., Sreekumar, K.P., Thiyagarajan, T.K., Satpute, R.U., Bhanumurthy, K., Sengupta, P., Dey, G.K., Warriar, K.G.K., 2006. Nano-crystalline titanium dioxide formed by reactive plasma synthesis. *Vacuum* 80, 11-12.

Villacres, R., Ikeda, S., Torimoto, T., & Ohtani, B. (2003). Development of a novel photocatalytic reaction system for oxidative decomposition of volatile organic compounds in water with enhanced aeration. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 160(1-2), 121-126.

Wu, F., Zhou, Z., & Hicks, A. L. (2019). Life cycle impact of titanium dioxide nanoparticle synthesis through physical, chemical, and biological routes. *Environmental science & technology*, 53(8), 4078-4087.

Zhang, J., Wang, Z., Zhang, X., Zheng, X., Wu, Z. (2015). Enhanced antifouling behaviours of polyvinylidene fluoride membrane modified through blending with nano-TiO₂/polyethylene glycol mixture. *Appl. Surf. Sci.* 345, 418-427.