



SOSTENIBILITÀ DEI SISTEMI PRODUTTIVI

La sostenibilità energetica a Singapore: sfide ed implementazioni



Nicola Divan

Indice:

- Introduzione
- Metodologia di ricerca
- Analisi e risultati
- Conclusioni



Introduzione



Trasformare il modo di produrre energia

In molti Paesi, la produzione di elettricità è per lo più legata ai **carburanti fossili**. L'emissione di gas serra dovuta allo sfruttamento di tali risorse rende inevitabile e doveroso il passaggio al **rinnovabile**. Questa presentazione considera diversi aspetti di questa transizione limitandosi al piccolo contesto, seppur sviluppato, di Singapore.

Singapore:

- Con una popolazione di 5.6 mln di abitanti...
- Ed una superficie di 710 km² di terreno...
- Ha una densità di popolazione tra le più alte al mondo (National Environment Agency, 2016)



Introduzione



Trasformare il modo di produrre energia

Come molti Paesi ad alto reddito, l'economia di Singapore presuppone un elevato flusso di merci in ingresso ed in uscita. Senza risorse naturali, né rilevanti spazi verdi, è necessario mitigare gli impatti dell'urbanizzazione attraverso politiche volte alla sostenibilità ambientale/sociale.

Coordinamento tra politica, tecnologia e società

L'elettricità in contesto urbano:

- La produzione di elettricità è responsabile del 26.5% dell'utilizzo di energia.
- Più del 95% dell'energia di Singapore è generata utilizzando gas naturale.
- Il rimanente è ricavato da combustibili fossili, termovalorizzazione di rifiuti ed energia solare.



Introduzione

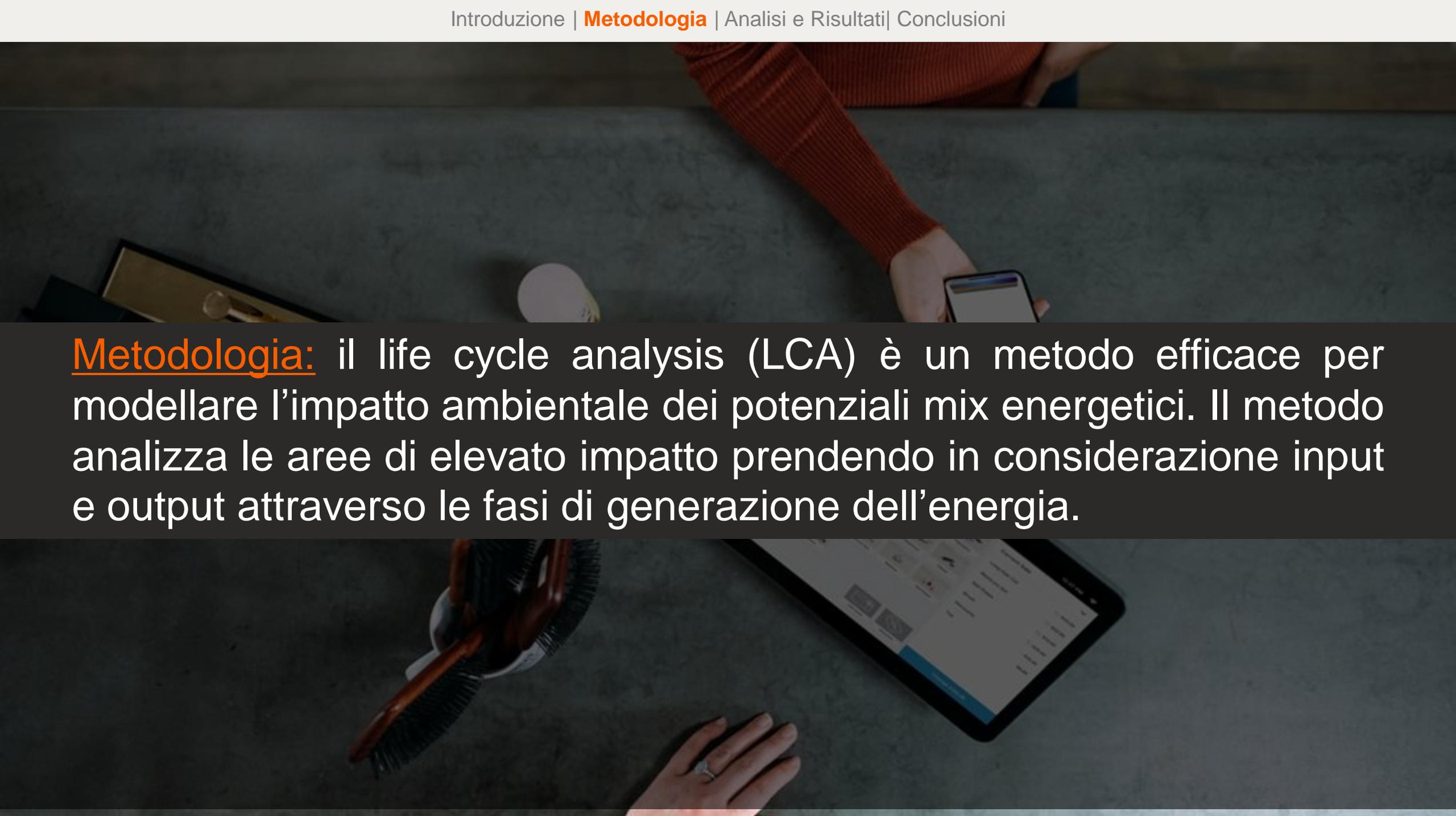
Soddisfare il fabbisogno energetico

L'elettricità generata dal gas naturale è cresciuta dal 19% nel 2000 al 75% nel 2005 (uno dei più alti livelli al mondo). L'energia solare è responsabile per l'1% del fabbisogno energetico di Singapore, mentre l'incenerimento di rifiuti per circa il 3%. Il restante 1% è generato da petrolio e carbone.

La ricerca di fonti rinnovabili:

- Mancanza delle condizioni per lo sfruttamento di energia idroelettrica, geotermica, eolica e dal moto ondoso.
- L'energia nucleare è stata ritenuta troppo rischiosa per via della densità di popolazione.
- Rimangono il **fotovoltaico** e i **biogas**.

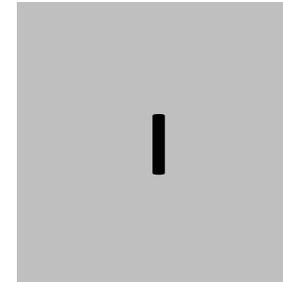
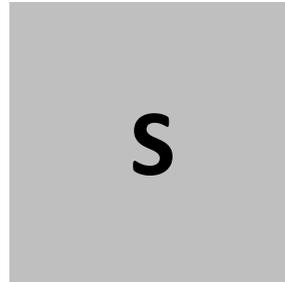


A top-down view of a person's hands using a smartphone and a tablet on a desk. The person is wearing a red sweater. The desk is dark grey. There is a white container with brushes and a small white object on the desk. The text is overlaid on a dark grey background.

Metodologia: il life cycle analysis (LCA) è un metodo efficace per modellare l'impatto ambientale dei potenziali mix energetici. Il metodo analizza le aree di elevato impatto prendendo in considerazione input e output attraverso le fasi di generazione dell'energia.

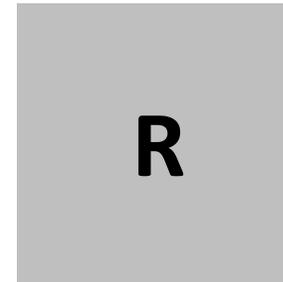
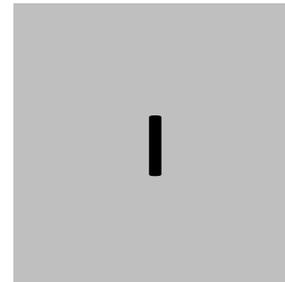
Life Cycle Analysis (LCA)

Scope: l'obiettivo di questa analisi è identificare e quantificare il potenziale impatto ambientale della produzione di energia dalle diverse fonti disponibili



Inventory analysis: la fase di calcolo dei dati di inventario include la collezione di dati e quantificazione di input e output

Impacts: vengono valutate le possibili aree di impatto ambientale. Per evitare di incorrere in soggettività, è stato selezionato il «**CML 2001 Impact Assessment Method**»



Results: seguono analisi di sensitività e valutazione correlata

Perché un'analisi quantitativa?

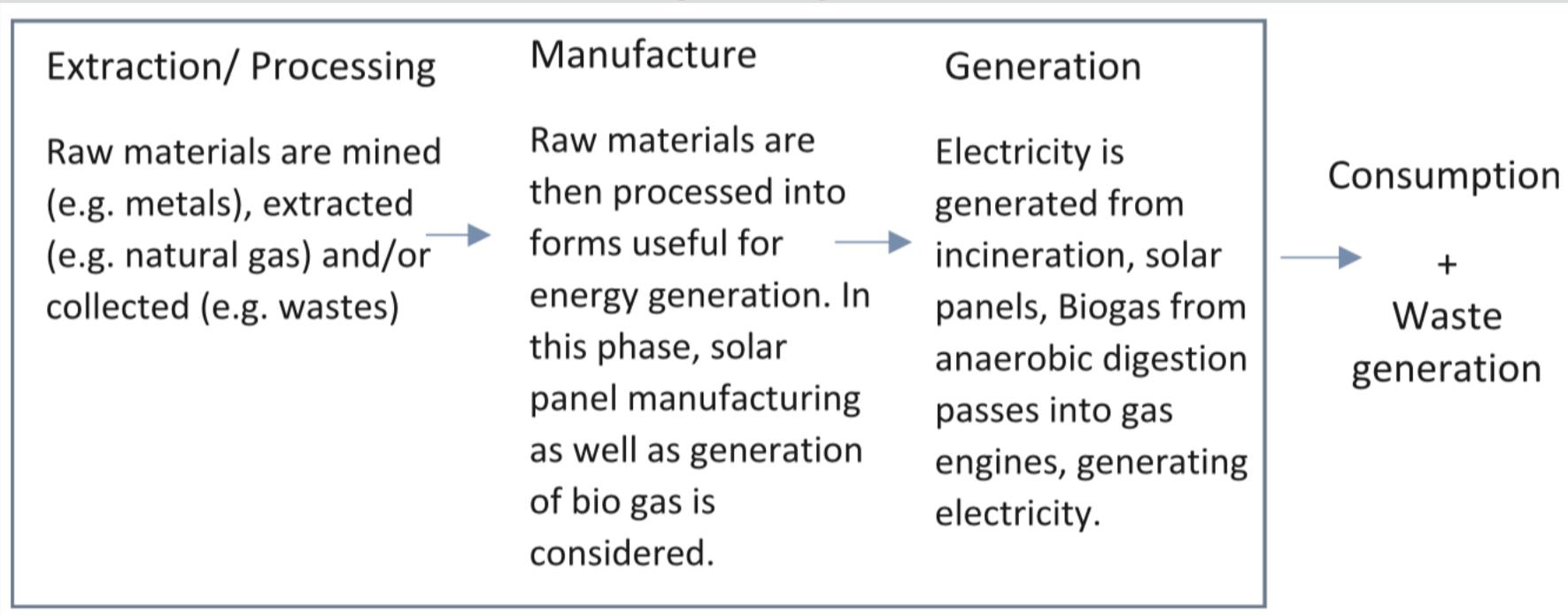
Opportunities are mostly technological in nature – the need for innovation to exploit to own advantage



Life Cycle Analysis (LCA)

Goal and scope: unità funzionale.

L'impatto della costruzione dell'impianto è ritenuto trascurabile se paragonato al ciclo di vita dell'impianto stesso. Pertanto non è preso in considerazione. Vengono, invece, esaminati i **costi e impatti operativi**.



Life Cycle Analysis (LCA)

Inventory analysis

Input

Gli input data utilizzati per questo studio sono una combinazione di dati primari e secondari da pre esistenti database (retrieved from: Wernet et al., 2016; PE International, 2018).

Energy losses

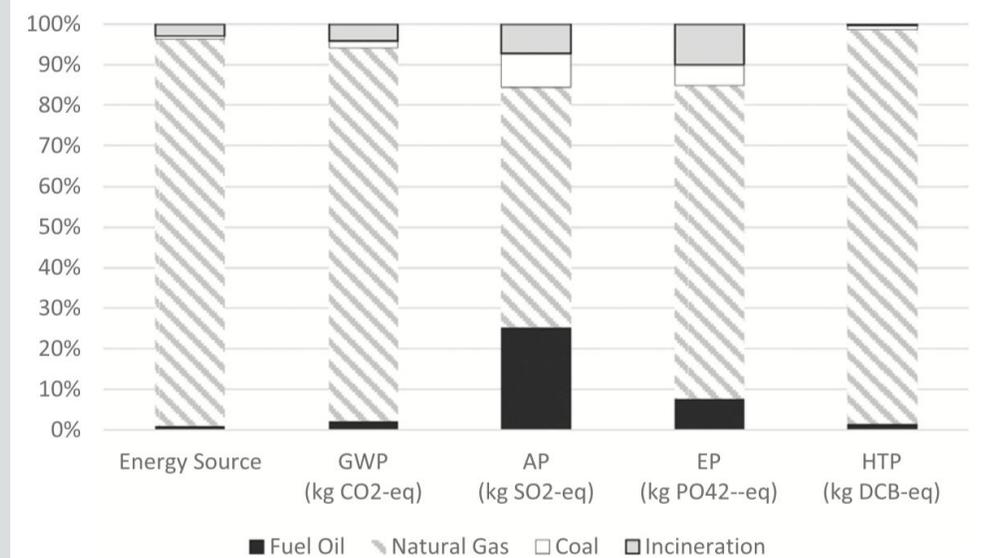
Sono calcolate sull'attuale livello di energia utilizzato.

Potential environmental impacts per kilowatt-hour (kWh) generated.

	GWP (kg CO ₂ -eq)	AP (kg SO ₂ -eq)	EP (kg PO ₄ ²⁻ -eq)	HTP (kg 1,4-DCB-eq)
Natural Gas	0.459	1.95E-04	3.71E-05	0.0020
Hard Coal	1.030	0.00328	2.93E-04	0.0525
Fuel Oil	0.963	0.00793	3.50E-04	0.0960
Incineration	0.671	7.72E-04	1.53E-04	0.0169
Biogas	0.197	0.01499	2.78E-04	0.0288
Solar	0.0514	1.82E-04	1.48E-05	0.0472
Current case	0.475	3.15E-04	4.58E-05	0.0038

Impacts

- Global warming potential (GWP)
- Acidification potential (AP)
- Eutrophication potential (EP)
- Human toxicity potential (HTP)



Risultati:

1. Presentazione dei risultati
2. Analisi di sensitività
3. Implementazione di fotovoltaico e biogas
4. Sfide nel ridurre l'impatto ambientale

1. Presentazione dei risultati

Assunzioni:

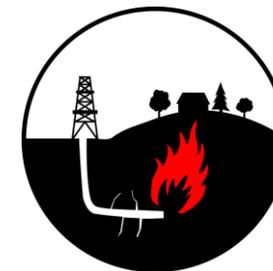
Risulta evidente dalle tabelle precedenti che che il gas naturale è la causa degli impatti più significativi sull'ambiente. Per via delle alte percentuali di utilizzo, i suoi indicatori surclassano quelli di ogni altra fonte energetica. Tuttavia, il contributo sugli effetti **non è direttamente proporzionale** alla produzione di energia.

Le tabelle precedenti dimostrano come carbone e petrolio contribuiscano in modo sproporzionato all'inquinamento ambientale.



Natural gas:

- Contribuzione su GWP, HTP = 92%, 97%.
- Tuttavia, influisce per il 59,1% e 77,2% su AP ed EP rispettivamente.



Fuel oil & coal:

- Fuel: contribuisce per il 25% su AP.
- Coal: contribuisce per l'8,3% su AP e 5,1% su EP.

Multiple of each impact category compared to current electricity source.

	GWP (kg CO ₂ -eq)	AP (kg SO ₂ -eq)	EP (kg PO ₄ ²⁻ -eq)	HTP (kg 1,4 DCB-eq)
Fuel Oil	2.03	25.20	7.64	25.35
Hard Coal	2.17	10.41	6.39	13.88
Natural Gas	0.97	0.62	0.81	0.53
Incineration	1.41	2.45	3.34	4.45
→ Solar	0.11	0.58	0.32	12.46
→ Biogas	0.42	47.64	6.08	7.59
Current case	1.00	1.00	1.00	1.00

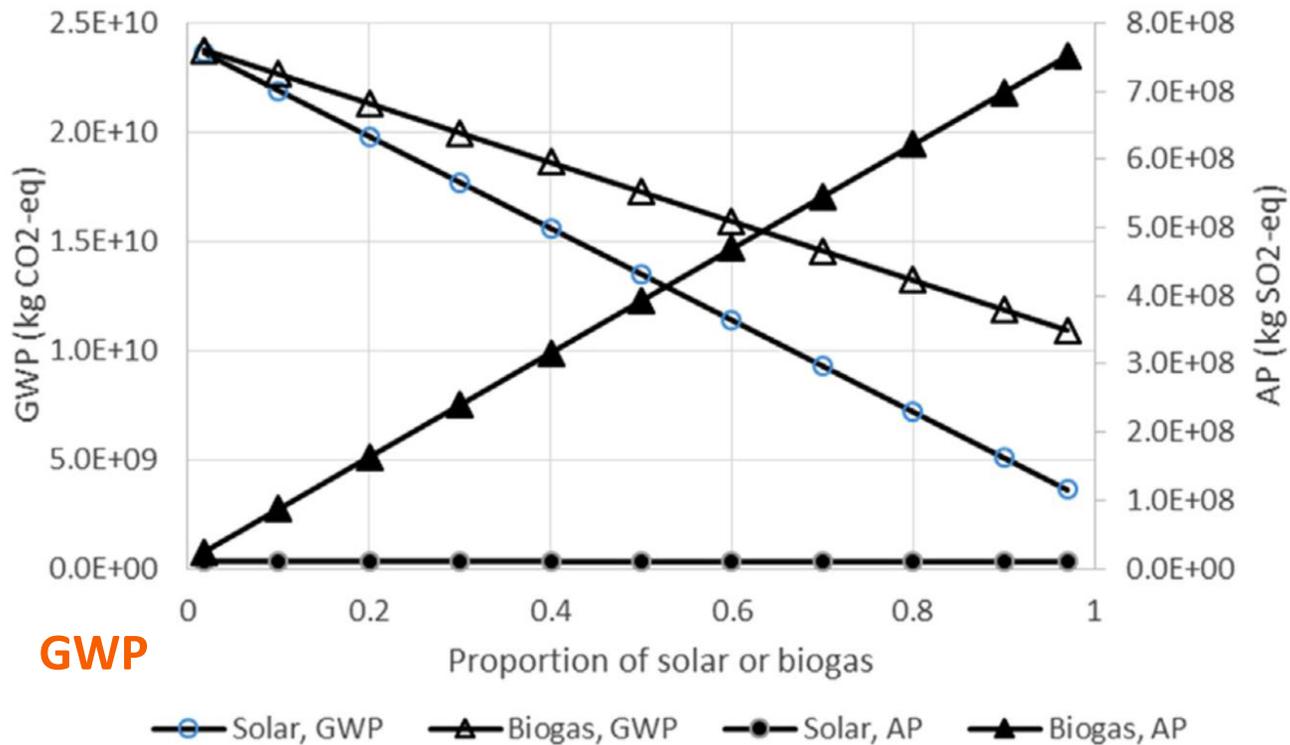
Questa tabella dimostra come le fonti di energia rinnovabile, biogas e fotovoltaico, soffrano dello stesso problema delle «fonti fossili». In particolare, contribuiscono in modo sproporzionato (non lineare) all' aumento di AP, EP, HTP.

I **risultati normalizzati** mostrano la variazione dell'impatto ambientale qualora la fonte in esame sostituisse l'attuale mix

La normalizzazione dei risultati è effettuata sull'attuale "energy mix"



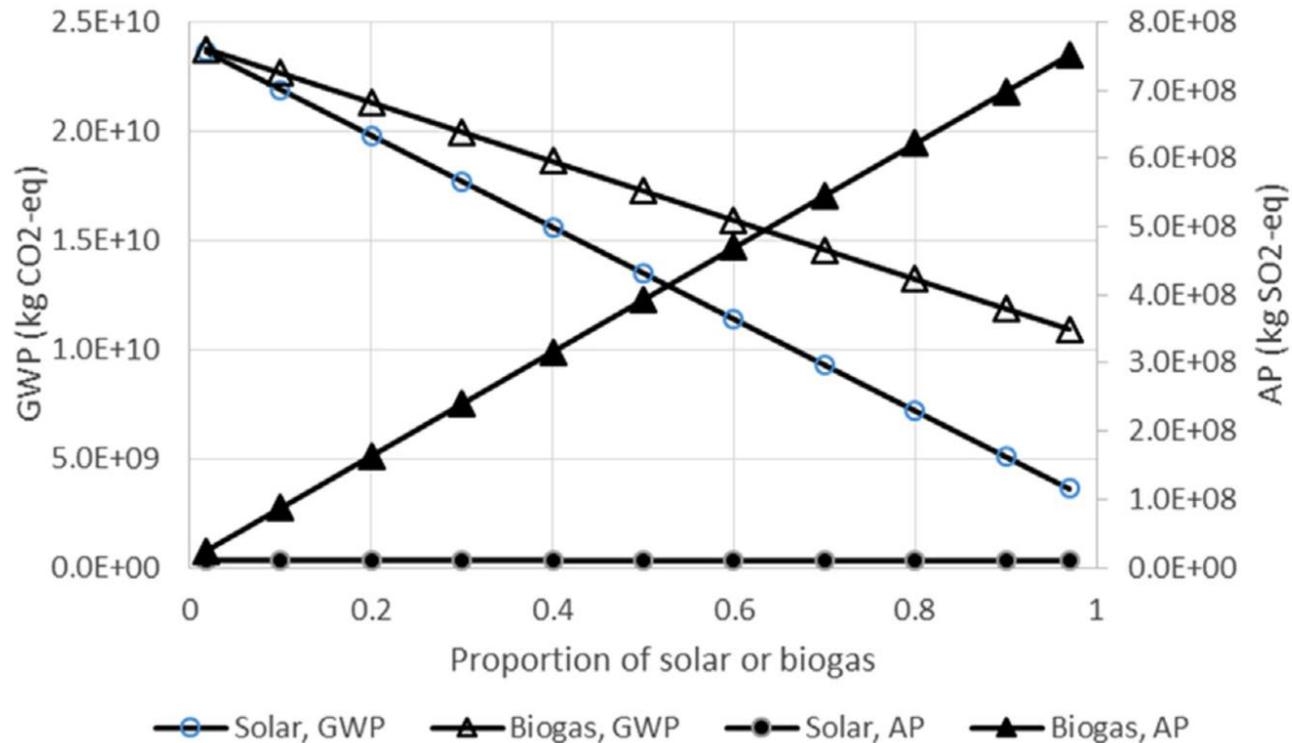
2. Analisi di sensitività



- La riduzione di GWP è più sensibile quando 1 kWh di elettricità dall'incenerimento è rimpiazzato dal fotovoltaico. Tuttavia in un contesto particolare come Singapore, la termovalorizzazione non può essere rimpiazzata (PV red. 062 Kg CO2-eq).
- Il cambiamento più ragionevole sarebbe quindi rimpiazzare il gas naturale con l'energia solare (PV red. 0.41 kg CO2-eq). L'analisi seguente però bocchia questa teoria.
- Gas naturale e energia solare hanno valori di AP comparabili, perciò sarebbe illogico sostituirli. Tuttavia, il biogas potrebbe sostituire il solare con un incremento di 0.0148 kg SO2-eq, anche se sarebbe più realistico sostituirlo al gas naturale ottenendo gli stessi benefici (uguale sensitività).

Sostituire il gas naturale con il biogas sarebbe lo scenario più realistico

2. Analisi di sensitività



- Per quanto riguarda l'EP, sostituire il biogas con gas naturale o solare da $2,41$ e $2,63 \times 10^{-4}$ kg PO₄²⁻-eq
- Il gas naturale è un ordine di grandezza inferiore in HTP per kWh rispetto a solare o biogas. Sostituirlo in favore del solare significherebbe incorrere in un aumento di 0.0452 kg 1,4-DCB-eq per kWh.

Perché non l'energia solare?

- Questo valore è ben 22 volte il valore base del gas naturale quindi giustifica il diffuso utilizzo del gas. Qualora venisse utilizzato il solare, tutti i benefici introdotti sarebbero surclassati di un ordine di grandezza dall'aumento di HTP.

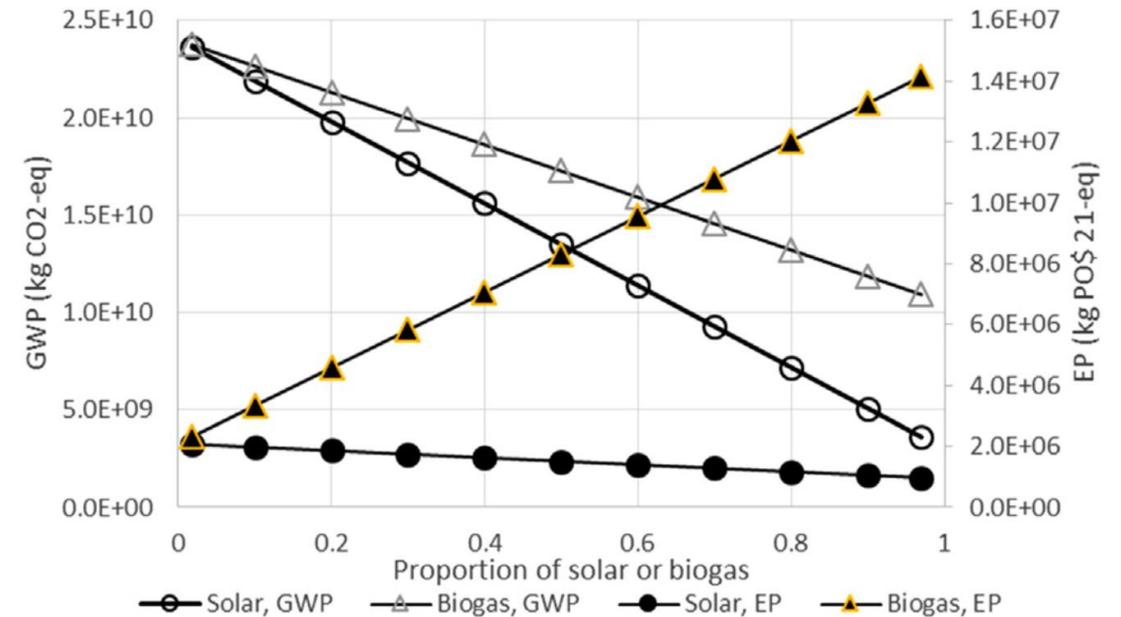
Mentre GWP tende ad avere un impatto su scala globale, EP e HTP tendono ad essere fenomeni locali (amplificati in caso di elevata densità di popolazione)



2. Analisi di sensitività



- L' Energy Market Authority di Singapore (EMA) ha dichiarato che nel Paese vengono generati 51,59 TWh di energia per il consumo locale.
- Stando ai dati, l'attuale utilizzo di carburanti fossili è il principale responsabile degli alti livelli di GWP, se comparato con il contributo di solare e biogas.

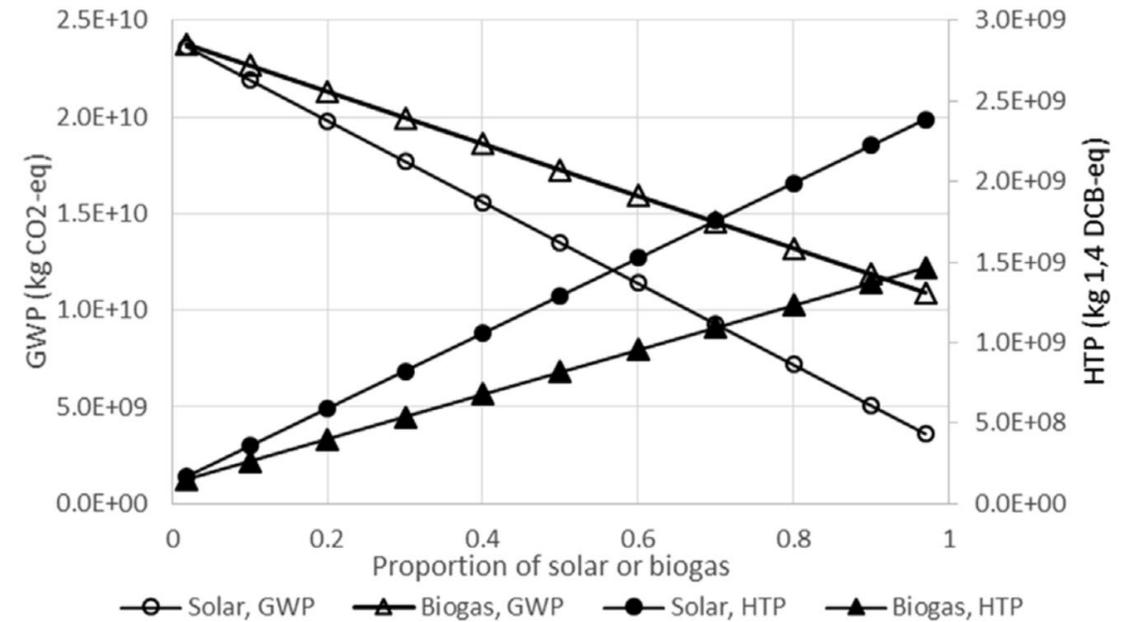


- Gli attuali livelli di GWP verrebbero ridotti del 83,4% per un ipotetico utilizzo del 97% di energia solare e di un 53,5% per un utilizzo del 97% di biogas.

2. Analisi di sensitività



- Nonostante il GWP di energia solare e fotovoltaica sia rispettivamente l'11,1% e 42,9% di quello del gas naturale, il risultato finale in termini di riduzioni potrebbe essere inferiore alle aspettative. La **termovalorizzazione** produce i più alti livelli di GWP per kWh.



- AP: è di due ordini di grandezza superiore quando i biogas sostituiscono al 97% i carburanti fossili.
- EP: diminuisce con l'aumentare dell'utilizzo di energia solare, ma aumenta con l'uso di biogas.
- HTP: aumenta del 1222% se si fa ricorso per il 97% al solare, mentre aumenta del 750% con lo sfruttamento al 97% di biogas.

Possibili soluzioni



Singapore can:

- Il GWP dell'incenerimento può essere ridotto con la **separazione di rifiuti solidi**, specialmente per l'organico (biologico e cibo). Questa separazione ridurrebbe l'ammontare di energia necessaria per la combustione e, comunque, produrrebbe più elettricità per unità di massa.
- Il rifiuto umido potrebbe essere utilizzato per la **produzione di biogas**, derivanti dalla degradazione biologica.

Aumentare gli sforzi in R&D per la produzione di pannelli solari senza Pb, Cr, Cd, Ni, e Sn (metalli pesanti). Tali elementi impattano particolarmente sulla HTP e sono estremamente difficili (e costosi) da smaltire. Inoltre, per via dell'umidità e del sale, la vita operativa dei pannelli è sensibilmente ridotta, il che genera più rifiuti tossici.



3. Implementazione di energia solare e biogas

Energia solare

Irradiazione solare: 1580 kWh/m²/year
158 Km² per il 97% del fabbisogno



Solo 7,779,890 m² su tetti pubblici disponibili
Panel efficiency = 20% -> 4.8% demand met

- Calcolando anche il suolo privato, la produzione di energia solare potrà soddisfare al massimo il 9,6% della domanda.

Energy Market Authority, 2017

Biogas



Non è possibile generare sufficienti rifiuti per produrre energia.



I biogas da rifiuti biodegradabili coprono l'1,15% del fabbisogno energetico di Singapore -> è necessario importare.



Raccogliendo il 10% dei bio-rifiuti della regione, non esisterebbero impianti sufficientemente grandi da gestire il throughput (30,685t/day).



3. Implementazione di energia solare e biogas

Joint implementation

- **9,6%** max derivante da energia solare.
- **2,1%** max derivante da sfruttamento di biogas, la cui produzione è stata resa più efficiente del 22%.

Totale di **11,7%** del fabbisogno energetico sostituibile con fonti rinnovabili

Estimation of solar and biogas electricity generation.

Solar and biogas estimation parameters

Solar PV estimation parameters

Annual mean solar irradiance	1,580 kWh/m ² /year	1,580 kWh/m ² /year
Panel efficiency (Wong et al., 2016, Gerbinet et al., 2014)	10-20%	20%
Total annual electricity generation	25-50 TWh	2.46 TWh
Total panel area	158 km ²	7.78 km ²

Biogas estimation parameters

Annual quantity of bio waste processed	750,000 tonnes ^a	1,050,000 tonnes ^b
Land area occupied by plant	0.33 km ²	0.13 km ²
Total annual electricity generation	0.29 TWh	0.397 TWh ^c

^a Timetric (2018).

^b State of Green (2017).

^c Total electricity generated estimated based on reported data.

4. Sfide nel ridurre l'impatto ambientale

1. Mix energetico ottimale

Basandosi sulle stime effettuate, un'alternativa plausibile sarebbe 10% solare, 2,1% biogas, 3% incenerimento, 84,9% gas naturale

2. Stima di impatto potenziale

Mentre si assisterebbe alla riduzione di GWP (-11,8%) e EP(-5,2%), aumenterebbero AP (65,9%) e HTP (98,6%).

3. Strategie di implementazione

Non è possibile selezionare un energy mix che possa ridurre l'impatto ambientale in ogni categoria.

Tendenzialmente vengono attuate politiche volte a mitigare gli effetti tangibili sul territorio (local scale).

La selezione del mix energetico deve essere **basata sul valore attribuito alle direttrici d'impatto ambientale** identificate attraverso l'Impact Assessment Method. Il decisore definisce i trade-off (ex. local/global care).

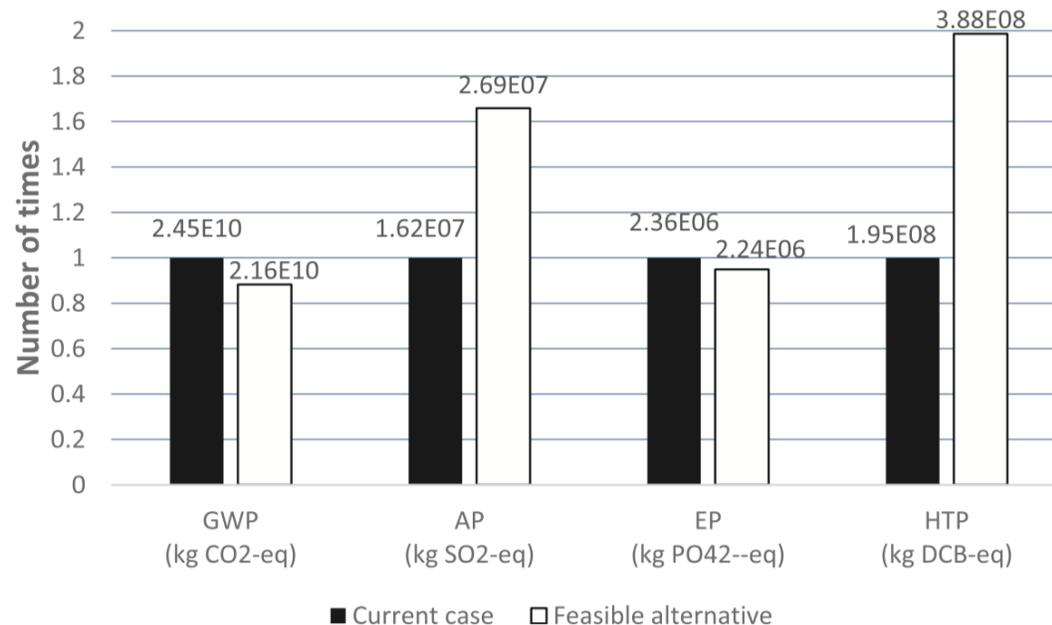


4. Sfide nel ridurre l'impatto ambientale



Spatio-geographical considerations of environmental impacts.

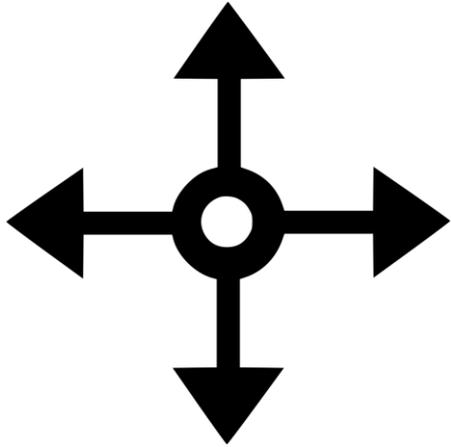
	Global	Regional	Local
Within Borders	GWP (all)	AP (biogas)	EP (biogas) HTP (biogas) HTP (solar)
Outside border	GWP (all)	AP (biogas)	HTP (solar)



Risulta evidente come la diminuzione di GWP su scala globale venga **pagata a caro prezzo localmente**. Questo fenomeno è in larga parte dovuto all'installazione di pannelli solari che incidono sull'HTP per via dei metalli pesanti.



Conclusioni



Multidirezionalità

- La sostenibilità ambientale spesso **non è unidirezionale** e non esiste un unico approccio per ridurre il proprio impatto. È fondamentale conoscere l'ambiente circostante per capire i **nessi di causa-effetto** prima di modificare gli equilibri dell'ecosistema.



Gestione dei trade-off

- Ogni tecnologia, seppur innovativa, danneggia l'ambiente in modo differente. **Diversificare l'impatto** aiuta a ridurre il rischio di insostenibilità. Generalmente l'ecosistema si adatta ai cambiamenti, purché sussista un equilibrio.
- Le decisioni devono essere basate sull'**efficienza economico operativa** della tecnologia a disposizione, ne è un esempio l'utilizzo di energia solare a Singapore.



Grazie! Domande?

Bibliografia

- Agamuthu, P., 2015. Circular Economic Utilization of Agriculture and Biomass Waste – A Potential Opportunity for Asia and the Pacific, Sixth Regional 3R Forum in Asia and the Pacific, Male, Maldives. United Nations Centre for Regional Development, pp. 2015.
- Ahamed, A., Yin, K., Ng, B.J.H., Ren, F., Chang, V.W.-C., Wang, J.-Y., 2016. Life cycle assessment of the present and proposed food waste management technologies from environmental and economic impact perspectives. *J. Clean. Prod.* 131, 607–614.
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., D’Alessandro, F., Scrucca, F., 2015. Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: review and results harmonization. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42, 1113–1122.
- Doshi, T.K., D’Souza, N.S., Nguyen, P.L., Teo, H.G., 2011. The Economics of Solar PV in Singapore. Energy Economics Division, Energy Studies Institute, National University of Singapore (August 2011, Discussion Paper EE/11-01).
- Energy Market Authority (EMA), 2017. Solar Photovoltaic System, Last updated March 2017 (Accessed 2nd Jan 2018).
- Guinée, J.B., Udode, H.H., Huppes, G., 1993. Quantitative life cycle assessment of products. 1: Goal definition and Inventory. *J. Clean. Prod.* 1 (1), 3–13.
- Hijazi, S.M., Zerhusen, B., Effenberger, M., 2016. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1291–1300.
- ISO, 2006a. ISO14040: 2006 Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and framework.
- ISO, 2006b. ISO14044: 2006 Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and guidelines.
- Graphs and tables retrieved from: Quek A., Ee A., Ng A., Wah T. Y. (National University of Singapore) 2018. Challenges in Environmental Sustainability of renewable energy options in Singapore. Retrieved from: www.elsevier.com/locate/enpol. Elsevier Publisher.



Bibliografia

- Kiatkittipong, W., Wongsuchoto, P., Pavasants, P., 2009. Life cycle assessment of bagasse waste management options. *Waste Manag.* 29, 1628–1633.
- Masanet, E., Chang, Y., Gopal, A.R., Larsen, P., Morrow, W.R., Sathre, R., Shehabi, A., Zhai, P., 2013. Life-cycle assessment of electric power systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 38 (1), 107–136.
- National Environment Agency (NEA), 2018. Semakau Landfill. (Accessed 2 Apr 2018). <<http://www.nea.gov.sg/energy-waste/waste-management/semakau-landfill>> .
- National Environment Agency (NEA), 2016. Singapore's Second Biennial Update Report 2016 – Under the United Nations Framework Convention on Climate Change. NEA, Singapore ISBN: 9971-88-779-7.
- PE International, 2018. GaBi Database website. Energy extension. <<http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2018-lci-documentation/extension-database-ii-energy/>> , (Accessed 30 January 2018).
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P., 2012a. Environmental impacts of biogas deployment – Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *J. Clean. Prod.* 24, 168–183.
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P., 2012b. Environmental impacts of biogas deployment e Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *J. Clean. Prod.* 24, 184–201.
- Rehl, T., Lansche, J., Müller, J., 2012. Life cycle assessment of energy generation from biogas—attributorial vs. consequential approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (6), 3766–3775.
- State of Green, 2017. The World’s largest biogas facility is being built in a gravel pit in Denmark, Nov. (Accessed 28th March 2018) <<https://stateofgreen.com/en/profiles/state-of-green/news/the-world-s-largest-biogas-facility-is-being-built-in-a-gravel-pit-in-denmark>> .



Bibliografia

- Tamaro, M., Antonio, S., Juri, R., Simona, S., Sonia, M., 2016. Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *J. Hazard. Mater.* 306, 395–405.
- Tan, Reginald B.H., Wijaya, David, Khoo, Hsien H., 2010. LCI (life cycle inventory) analysis of fuels and electricity generation in Singapore. *Energy* 35, 4910–4916.
- Timetric, 2018. C2e – C2e Renewables NC Biogas Plant – North Carolina, Construction Project Profile, Feb 2018, Report Code: CIC210920PP.
- Tong, Y.W., Tong, H., Shen, Y., Zhang, J., Wang, C., Ge, T.S., 2018a. A comparative life cycle assessment on four waste-to-energy scenarios for food waste generated in eateries. *Appl. Energy* 225, 1143–1157.
- Tong, H., Yao, Z., Lim, J.W., Mao, L., Zhang, J., Ge, T.S., Peng, Y.H., Wang, C.-H., Tong, Y.W., 2018b. Harvest green energy through energy recovery from waste: a technology review and an assessment of Singapore. *Renew. Sustain. Energy Rev* (in preparation).
- U.S. EPA, 2008. Region 9, Anaerobic Digestion of Food Waste, Funding opportunity no. Epa-r9-wst-06-004, Final report, March 2008.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (Part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21 (9), 1218–1230. [〈http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8〉](http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8) .
- Whiting, A., Azapagic, A., 2014. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. *Energy* 70, 181–193.
- Wong, J.H., Royapoor, M., Chan, C.W., 2016. Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 608–618.



Bibliografia

- World Bank Open Data, 2017. (Accessed 4th April 2018) <<https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2>> .
- World Energy Council, 2016. World Energy Resources Solar. Zhang, D., Tan, S.K., Gersberg, R.M., 2010. A comparison of municipal solid waste management in Berlin and Singapore. *Waste Manag.* 30 (5), 921–933.
- Zhang, J., Loh, K.-C., Lee, J., Wang, C.-H., Dai, Y., Tong, Y.W., 2017a. Three-stage anaerobic co-digestion of food waste and horse manure. *Sci. Rep.* 7 (Article number: 1269).
- Zhang, J., Li, W., Lee, J., Loh, K.-C., Dai, Y., Tong, Y.W., 2017b. Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge by biological co-pretreatment. *Energy* 137, 479–486.
- Zhang, J., Loh, K.-C., Li, W., Lim, J.W., Dai, Y., Tong, Y.W., 2017c. Three-stage anaerobic digester for food waste. *Appl. Energy* 194, 287–295.

