



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

**Deepening the uncertainty dimension of environmental Life Cycle Assessment: addressing choice, future and interpretation uncertainties.**  
Mendoza Beltran, M.A.

**Citation**

Mendoza Beltran, M. A. (2018, October 9). *Deepening the uncertainty dimension of environmental Life Cycle Assessment: addressing choice, future and interpretation uncertainties*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/66115>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/66115>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/66115> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Mendoza Beltran M.A.

**Title:** Deepening the uncertainty dimension of environmental Life Cycle Assessment: addressing choice, future and interpretation uncertainties.

**Issue Date:** 2018-10-09

## Samenvatting

### Introductie

LCA is een belangrijke methode geworden om de effecten van menselijke activiteiten op het milieu te bestuderen. Echter zijn er nog verschillende methodologische zaken in LCA die de betrouwbaarheid van de resultaten negatief kunnen beïnvloeden. Drie van deze zaken zijn gerelateerd aan a) allocatie, b) de representatie van tijd en dimensie en c) de interpretatie van resultaten in LCA. Bij al deze zaken spelen onzekerheden een fundamentele onderliggende rol. De keuze voor een bepaalde allocatiemethode kan grote invloed hebben op de uitkomst van een LCA. Daarom is het belangrijk om de gevoeligheden gerelateerd aan de keuzes te toetsen. Met betrekking tot tijd, sommige LCA's hebben als doel om relevant te zijn voor toekomstige keuzes, wat betekent dat de relevante parameters voor de LCA zouden kunnen veranderen op een manier die tot zo ver onbekend voor ons is. Het aanpakken van epistemologische onzekerheden wordt cruciaal. Ten slotte beïnvloedt de selectie van een methode voor het interpreteren van LCA-resultaten met onzekerheidsinschattingen de interpretatie van de resultaten, omdat verschillende methoden tot verschillende conclusies kunnen leiden. Het aanpakken van onzekerheid die is geïntroduceerd als gevolg van de keuze van de interpretatiemethode, is dus ook belangrijk.

Men is het er algemeen over eens dat een juiste aanpak van deze verschillende bronnen van onzekerheid een essentiële stap is naar het vergroten van de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van LCA-resultaten. Praktische manieren om met onzekerheid om te gaan zijn nodig. De meest recente inspanningen zijn gericht op het erkennen en vergroten van het begrip van de gemeenschap van de verschillende bronnen van onzekerheid, alsmede van hun implicaties voor verschillende LCA-toepassingen. Het doel van dit proefschrift is om de onzekerheidsdimensie van de huidige LCA te verdiepen. Door het meenemen van nog niet eerder aangepakte bronnen van onzekerheid met nieuwe methoden, wordt een duidelijker inzicht in de gevolgen van verschillende bronnen van onzekerheid in LCA verkregen. Hoewel dit proefschrift start vanuit de brede domeinen van onzekerheid, waaronder risico, conventioneel beschreven onzekerheid, onwetendheid en onbepaaldheid, zijn de geselecteerde bronnen van onzekerheid daarna beperkt tot de domeinen risico en conventionele onzekerheid, zoals onzekerheid door onvolledige wetenschappelijke kennis die alleen tot op zekere hoogte kwantificeerbaar zijn. We benadrukken dat dit niet betekent dat alles gekend of gekwantificeerd kan worden en we maken zichtbaar dat onwetendheid en onbepaaldheid bestaan.

De problemen die in dit proefschrift worden behandeld en de bijbehorende bronnen van onzekerheid in LCA zijn:

- 1) de keuze van allocatiemethode (in combinatie met parameter onzekerheid),

- 2) meenemen van toekomstige socio-technische veranderingen in toekomstgerichte LCA (epistemologische onzekerheid), en
- 3) keuze van de methode voor de interpretatie van onzekerheidsanalyseresultaten.

Elk van deze onderwerpen introduceert onzekerheid in de LCA-resultaten en om ze te behandelen maakt dit proefschrift gebruik van verschillende benaderingen, die al bestaan in de literatuur: de statistische, de wetenschappelijke en de juridische benaderingen. Binnen elke benadering worden nieuwe methoden voorgesteld en ontwikkeld, zodat deze bronnen van onzekerheid in LCA kunnen worden meegenomen en expliciet erkend in de LCA-resultaten. Dit proefschrift bestaat uit een inleidend hoofdstuk (hoofdstuk 1), vier inhoudelijke hoofdstukken (hoofdstuk 2 tot 5) die elk een van de bronnen van onzekerheid behandelen voor een specifieke LCA-toepassing, en een algemeen discussiehoofdstuk (hoofdstuk 6).

## Onderzoeksvragen

Op basis van de geïdentificeerde bronnen van onzekerheid en de kennislacunes die voor elk van deze zijn geïdentificeerd, zijn de volgende onderzoeksvragen in dit proefschrift behandeld:

**OV1: Hoe kunnen parameteronzekerheid en onzekerheid als gevolg van methodologische keuzes in een LCA met één alternatief worden gekwantificeerd en doorgerekend naar resultaten? (Hoofdstuk 2)**

**OV2: Wat zijn de implicaties voor onzekerheidsanalyse in een vergelijkende LCA-context van het kwantificeren en doorrekenen van parameteronzekerheid en onzekerheid als gevolg van methodologische keuzes? (Hoofdstuk 3)**

**OV3: Hoe kan epistemologische onzekerheid voor toekomstgerichte LCA systematisch en consequent worden aangepakt? (Hoofdstuk 4)**

**OV4: Welke statistische methode(s) moeten gebruikers van LCA gebruiken om de resultaten van een vergelijkende LCA te interpreteren, in het licht van het doel en de reikwijdte, bij het beschouwen van onzekerheid? (Hoofdstuk 5)**

## Antwoorden op de onderzoeksvragen

**Hoe kunnen parameteronzekerheid en onzekerheid als gevolg van methodologische keuzes worden geadresseerd? (OV1, Hoofdstuk 2)**

Een manier om parameteronzekerheid en onzekerheid als gevolg van de keuze van allocatiemethoden te behandelen is door middel van de pseudo-statistische methode die wordt voorgesteld in hoofdstuk 2. Deze methode is gebaseerd op de Monte Carlo steekproefmethode als basis voor het doorrekenen van gekwantificeerde parameteronzekerheden en van methodologische voorkeuren van allocatiemethoden voor multifunctionele processen. Met deze methode kan er tegelijkertijd rekening worden gehouden met de gevoeligheden van de keuze voor allocatiemethode en parameteronzekerheid en de vele mogelijke combinaties van deze twee, en kunnen deze combinaties expliciet meegenomen worden in de resultaten. De toepassing van deze methode in een casus van een LCA met één alternatief toonde aan dat het stochastisch gelijktijdig meenemen van parameteronzekerheid en de keuze van allocatiemethoden leidt tot een grotere spreiding van de resultaten. Deze resultaten omvatten beter het volledige bereik van de onzekerheid, maar vergroten verder alleen de absolute onzekerheden in LCA-resultaten van één alternatief. De voorbeeldcasus toonde aan dat voor scenario's die een-voor-een de allocatiemethode variëren, de effecten van de klimaatverandering variëren van 1.5 tot 2.3, van 1 tot 1.5, van 1.2 tot 1.9 en van 2 tot 3 kg CO<sub>2</sub>eq per kg koolzaadolie, respectievelijk per scenario. De resultaten voor de pseudo-statistische methode die in dit hoofdstuk wordt voorgesteld, variëren van 1 tot 3 kg CO<sub>2</sub>eq per kg koolzaadolie met frequentie pieken van uitkomsten rond de medianen van de een-voor-een allocatiescenario's. Het bereik van de resultaten van de een-voor-een scenario's wordt volledig omvat door de voorgestelde methode, maar zoals eerder gesteld, verhoogt dit alleen de absolute onzekerheden wat op zichzelf niet veel zegt. Deze benadering lijkt krachtiger te zijn in een vergelijkende LCA-context waarin relatieve onzekerheden een rol spelen. Door deze uit te breiden met een globale sensitiviteitanalyse kan vervolgens ook de bijdrage van onzekerheid als gevolg van de keuze van de allocatiemethode en van parameteronzekerheid aan de totale onzekerheid van de uitkomsten bepaald worden.

**Wat zijn de implicaties van het adresseren van parameteronzekerheid en onzekerheid als gevolg van methodologische keuzes in een vergelijkende LCA-context? (OV2, Hoofdstuk 3)**

Het toepassen van de pseudo-statistische methode om parameteronzekerheid en onzekerheid als gevolg van de keuze van allocatiemethoden door te rekenen naar LCA-resultaten in een vergelijkende LCA-context heeft voornamelijk gevolgen voor de steekproefprocedure. Omdat het essentieel is om rekening te houden met relatieve onzekerheden tussen de paren van productsystemen die worden vergeleken, is het toepassen van gepaarde steekproeftrekking van alle beschouwde parameters de meest geschikte experimentele opstelling voor onzekerheidsanalyse in vergelijkende LCA. Het niet gebruiken van een dergelijke opstelling zal geen zinnige vergelijking mogelijk maken die de vergelijkende of relatieve onzekerheid weergeeft. Als een dergelijke opstelling

wordt gebruikt, kan de statistische significantie van het verschil in milieueffecten op zinnige wijze worden bepaald. De vergelijking van twee aquacultuurtechnologieën om vis te produceren toonde aan dat deterministische LCA-resultaten één alternatief laten zien als “beter presterend” voor alle beschouwde milieueffecten, terwijl als we rekening houden met relatieve parameter- en keuzeonzekerheden met een pseudo-statistische benadering, er geen significant verschil tussen de twee technologieën blijkt te zijn. Deterministische resultaten geven geen informatie over de waarschijnlijkheid van de uitkomst dat de geïntegreerde productie van vis beter is. De resultaten van de pseudo-statistische methode toonden aan dat de monocultuurproductie van vis tot zeer vergelijkbare milieueffecten leidt als de geïntegreerde multi-trofische productie van dezelfde vis, maar de laatstgenoemde methode omvat extra productie van oesters die de economische basis van de viskwekerij zouden kunnen uitbreiden. Een marginaal grotere opbrengst kan dus bereikt worden met bijna gelijke milieueffecten. Met dergelijke informatie kon een meer realistische beoordeling gemaakt worden van de milieueffecten van de verandering in productietechnologie in deze specifieke viskwekerij.

### **Hoe kan epistemologische onzekerheid voor toekomstgerichte LCA systematisch en consequent worden aangepakt? (OV3, hoofdstuk 4)**

Scenario-ontwikkeling in LCA is de meest gebruikte tool om epistemologische onzekerheid in toekomstgerichte LCA aan te pakken. Bij het implementeren scenario's in LCA is het echter heel lastig om alle invoergegevens die naar aanleiding van de scenario's zouden moeten wijzigen op een consistente manier te vervangen door de gehele LCA-studie heen. Dit is met name het geval, omdat een consistente werkwijze niet alleen vervanging van de voorgrondaannames vereist (dat wil zeggen parameters die direct verband houden met de activiteit waarnaar wordt gekeken), maar ook van alle achtergrondaannames (dat wil zeggen parameters die verband houden met toeleveringsketens van de bestudeerde activiteit). In de casestudy die we in hoofdstuk 4 hebben besproken, bespreken we bijvoorbeeld de keuze tussen voertuigen met verbrandingsmotoren en elektrische motoren. Hier moeten niet alleen consistente veronderstellingen worden gemaakt over de toekomstige prestaties van deze voertuigen, maar ook hoe veranderingen in de toekomstige elektriciteitsmix (bijvoorbeeld meer hernieuwbare energie) alle invoerparameters in de LCA zouden veranderen. Daarom stellen we voor om coherente scenario's van geïntegreerde beoordelingsmodellen (een reeks gevarieerde plausibele toekomst) te verbinden met achtergrondinventarisatiegegevens (i.e. LCI-gegevens) om de scenario-ontwikkeling in LCA meer systematisch en consistent te maken. Omdat het toekomst onbekend is, wordt men ook geconfronteerd met epistemologische onzekerheid. Om recht te doen aan epistemologische onzekerheid, hebben we verschillende scenario's uit “integrated assessment” modellen gebruikt, die verschillende verhaallijnen beschrijven over hoe de toekomst zich zou kunnen onvouwen. Een dergelijke aanpak leidt tot robuustere resultaten die rekening houden

met verschillende sociaal-technische toekomstige ontwikkelingspaden en die dienen om de milieueffecten van producten in de toekomst onderzoeken. We hebben laten zien hoe de milieueffecten van auto's met verbrandings- en elektrische motoren afhangen van het scenario en het jaar. Voor sommige effecten lijkt er een duidelijker verschil te zijn in de toekomstige prestaties van de twee voertuigen; voor humane toxiciteit maakt het scenario bijvoorbeeld geen verschil, want de EV presteert altijd slechter. Voor andere milieueffecten is het moeilijker om te onderscheiden welke technologie beter zal presteren en zijn de effecten zeer afhankelijk van scenario's, bijvoorbeeld fijnstofvorming en klimaatverandering.

**Welke statistische methode(s) moeten gebruikers van LCA gebruiken om de resultaten van een vergelijkende LCA te interpreteren, in het licht van het doel en de reikwijdte, bij het beschouwen van onzekerheid? (OV4, Hoofdstuk 5)**

Na het kwantificeren van onzekerheden en doorrekening naar de LCA-resultaten, is de laatste fase de interpretatie van de onzekerheidsanalyseresultaten. Methoden voor het interpreteren van LCA-onzekerheidsanalyseresultaten kunnen 1) helpen bij het identificeren van verschillen in en afwentelingen tussen milieueffecten tussen alternatieven en verwijzen naar plaatsen waar dataverfijning de beoordeling ten goede zou kunnen komen (verkennde methoden) en 2) statistische significantie van het verschil vaststellen (bevestigingsmethoden). Afhankelijk van het doel en de reikwijdte van de LCA, moeten verkennde of bevestigende methoden worden gebruikt. De twee belangrijkste kenmerken van interpretatiemethoden zijn: 1) rekening houden met veelvoorkomende onzekerheden en 2) rekening houden met de omvang van het verschil per impact. In hoofdstuk 5 hebben we vijf interpretatiemethoden besproken en hebben we voor een casus over auto's met verbrandings-, hybride, of elektrische motoren laten zien dat het negeren van relatieve onzekerheden leidt tot onjuiste aanbevelingen. Daarom beschouwden we deze functie als een cruciale om rekening mee te houden bij interpretatiemethoden. We hebben ook richtlijnen gegeven over welke methode te kiezen op basis van het doel en de reikwijdte van de LCA. Het werd duidelijk dat voor verkennde doeleinden geen enkele methode nog voldoende ontwikkeld is omdat ze de beide hoofdkenmerken niet omvatten. Voor bevestigingsdoeleinden was één methode superieur en helpt deze de statistische significantie vast te stellen van het verschil in de prestaties van twee vergeleken alternatieven.

**Belangrijkste conclusies**

Dit proefschrift heeft een bijdrage geleverd aan het verdiepen van het begrip van onzekerheidsanalyse in het kader van LCA. Drie benaderingen voor de aanpak van bronnen van onzekerheid zijn toegepast: de statistische, de wetenschappelijke en de juridische. Elk van deze drie leidt tot de ontwikkeling van richtlijnen of van een methode voor de aanpak van verschillende bronnen van onzekerheid voor verschillende

toepassingen van LCA. Eén van de belangrijkste algemene conclusies van dit proefschrift is dat het expliciet erkennen van verschillende bronnen van onzekerheid in LCA belangrijke toegevoegde informatie kan opleveren. Door het expliciet behandelen van onzekerheden verkrijgt men bijvoorbeeld een beeld van de waarschijnlijkheid van de resultaten, iets wat in deterministische LCA onbekend is en gewoonlijk gekoppeld is aan een gemiddelde. Zulke informatie is belangrijk voor een beter begrip van de robuustheid van de resultaten en kan zo waardevol zijn voor besluit- en beleidsvorming. Bovendien zijn zulke informatie en bekwaamheid om met verschillende bronnen van onzekerheden in LCA om te gaan, in een snel veranderende wereld met meer onbekendheden dan bekendheden en waarin een transitie naar duurzame technologieën, producten en systemen nog nooit zo urgent is geweest, van buitengewoon belang om betrouwbare beoordelingen te kunnen maken.

### **Vooruitblik**

Ondanks dat er nog heel veel te doen overblijft, is in dit proefschrift weer een stap gezet in de richting van het vergroten van de kennis voor de LCA-gemeenschap over hoe om te gaan met onzekerheden. In sectie 6.4 is op basis van dit proefschrift een agenda voor toekomstig onderzoek geschetst. In het algemeen kunnen alle inspanningen om een beter inzicht te krijgen hoe met verschillende bronnen van onzekerheid om te gaan en de gevolgen daarvan voor verschillende typen LCA en toepassingen, bijdragen aan het vergroten van de kennis en de beschikbare gereedschapskist voor LCA-beoefenaars. Een belangrijk hiaat in kennis dat overbrugd zou moeten worden is vermogen van de LCA-gemeenschap om onzekerheidsresultaten op een transparante en toegankelijke wijze over te brengen naar de samenleving en belangrijke stakeholders. Helaas wordt het nut van onzekerheidsanalyses in LCA nog niet zo onderkend omdat het vaak neergezet wordt als een complexe analyse die niet zulke waardevolle informatie zou genereren. Zoals dit proefschrift laat zien vereist het beantwoorden van vragen betreffende de milieuduurzaamheid van productsystemen nu en in de toekomst, meer dan ooit tevoren het zo veel mogelijk omvatten en erkennen van dat wat onbekend is.