

ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD EN PROYECTOS DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS

Miguel Ángel Vigil Berrocal

Francisco Manuel Marey Pérez

Gemma Marta Martínez Huerta

Fernando Rodríguez Pérez

Universidad de Santiago de Compostela

Abstract

Phytoremediation, particularly the use of the hyperaccumulation capabilities of some plants to recover sites contaminated by heavy metals, is becoming a relevant technique. However, before choosing that type of technology a careful analysis of the environmental impacts produced should be done, in order to ensure that the negative burdens associated would not overcome the generated benefits. Among all available methodologies to quantify and identify such effects, the Life Cycle assessment (LCA) is one of the most suitable ones as it considers the impacts caused by a product or service at every stage, from raw material acquisition to final disposal.

In order to support the selection of the most suitable technique for remediating contaminated soil by heavy metals, a deep review of the existing literature in the field and of the different methodologies of Environmental Impact Assessment (Eco-indicator 99, ReCipe,...) has been carried out, in order to establish the most influential factors in phytoremediation projects from a sustainability perspective.

Keywords: *Phytoremediation; LCA; LCIA; heavy metals*

Resumen

La fitorremediación, más concretamente la utilización de la capacidad acumuladora de ciertas plantas para recuperar suelos contaminados por metales pesados, está ganando gran relevancia. Sin embargo, antes de elegir la utilización de este tipo de tecnología, es importante realizar un análisis cuidadoso de todos los impactos ambientales que se deriven de su implantación para cerciorarse de que dichos impactos no superen los beneficios generados. De entre todas las metodologías disponibles para cuantificar e identificar dichos impactos, destaca el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que considera los impactos causados por un producto o servicio en cada una de sus fases, desde la obtención de los recursos hasta su disposición final.

Con el fin de apoyar la elección de la técnica más adecuada para la recuperación de un suelo contaminado por metales pesados, se ha analizado exhaustivamente la literatura existente en este campo y las diferentes metodologías de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (Eco-indicator 99, ReCipe,...), con objeto de establecer cuales son las categorías de

impacto más determinantes desde el punto de vista de la sostenibilidad en los proyectos de fitorremediación.

Palabras clave: Fitorremediación; ACV; EICV; metales pesados

1. Introducción

La fitorremediación es una técnica que va ganando creciente interés como método para la recuperación de suelos degradados dadas las ventajas económicas que proporciona en comparación con procedimientos convencionales, la amplia aceptación por parte de los stakeholders y las potenciales mejorías medioambientales que proporciona. Sin embargo, esta tecnología tiene asociados sus propios impactos económicos, sociales y ambientales que deben ser debidamente evaluados con objeto de asegurar que dichos impactos no superen los beneficios derivados de la descontaminación.

De entre todas las técnicas de análisis de impacto ambiental destaca el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) dado que trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (ISO 14014:2006).

La norma ISO 14040:2006 define que todo estudio de ACV se compone de las fases:

- Definición del objetivo y el alcance
- Análisis del inventario
- Evaluación del impacto ambiental
- Interpretación

De entre éstas, se destaca la fase de evaluación de impacto ambiental por estar dirigida a conocer y evaluar la magnitud y significancia de los impactos potenciales de un sistema del producto a lo largo de todo el ciclo de vida (ISO 14044:2006).

Durante la redacción de un ACV, se evalúan los impactos producidos a lo largo de todo el ciclo vida de un producto a partir de las emisiones y recursos consumidos que han sido previamente recogidos en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV). Dichos impactos generalmente consideran tres áreas de protección: Salud humana, Medio ambiente y Uso de recursos naturales.

Los impactos a su vez se agrupan en Categorías de impacto, que son clases que representan asuntos ambientales de interés. Las categorías que habitualmente se encuentran en estos estudios son Cambio Climático, Reducción de la capa de Ozono, Eutrofización, Acidificación, Toxicidad humana, Partículas inorgánicas respirables, Radiación ionizante, Ecotoxicidad, Formación fotoquímica de ozono, Uso del suelo y Agotamiento de recursos naturales.

De ese modo, los datos recogidos durante la fase de Inventario son asignados a cada una de las categorías de impacto correspondientes, y procesados utilizando diferentes modelos de caracterización con objeto de obtener una representación cuantitativa denominada Indicador.

Con objeto de clarificar los conceptos relativos a la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) se presenta la tabla 1:

Tabla1: Ejemplos de términos utilizados en la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (ISO 14044:2006)

Término	Ejemplo
Categoría de impacto	Cambio Climático
Resultados del ICV	Cantidad de gases de efecto invernadero por unidad funcional
Modelo de caracterización	Modelo de línea de base de 100 años del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
Indicador de categoría	Radiación infrarroja (W/m ²)
Factor de caracterización	Potencial de calentamiento global (GWP100) para cada gas de efecto invernadero (kg CO ₂ -equivalentes/kg gas)
Resultado de indicador de categoría	Kg CO ₂ -equivalentes por unidad funcional
Categorías finales	Arrecifes de coral, bosques, cultivos

A la hora de clasificar y caracterizar los indicadores se distinguen dos enfoques:

- Los orientados al problema (Midpoints)
- Los orientados al daño final (Endpoints)

Un indicador midpoint está directamente relacionado con el mecanismo ambiental al que está asociado y al parámetro recogido en el Inventario, mientras que los endpoints se refieren al resultado final consecuencia de dicho mecanismo y se apoya de midpoints para su cálculo.

En general, los indicadores midpoint llevan asociada una menor incertidumbre debido a que solamente una pequeña parte del mecanismo ambiental precisa de ser modelado, mientras que los endpoints se basan en suposiciones y extrapolaciones por lo que sus resultados son menos fiables. A su vez, los indicadores endpoint son más intuitivos y fáciles de entender e interpretar que los midpoints (Goedkoop, 2010).

Las distintas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida siguen distintos criterios y procedimientos para la obtención de los indicadores, luego los numerosos métodos existentes proporcionan a menudo resultados diferentes. Con intención de solucionar dicho problema, la norma ISO 14044 proporciona un marco encaminado a estandarizar los principios sobre los que se fundamenta toda metodología de EICV, aunque aun no se haya conseguido compatibilizar todas ellas (EC-JRC, 2010a).

Las metodologías de uso más común que se encuentran para la EICV son las siguientes:

- CML 2002
- Eco-Indicator 99
- EDIP (1997-2003)
- EPS2000
- Impact 2002+
- ReCiPe
- Swiss Ecoscarcity
- TRACI
- MEEuP methodology

A la hora de seleccionar la metodología más adecuada para la realización de un ACV, es muy importante seleccionar las categorías de impacto que más adecuadamente responden al objetivo y al alcance del estudio ACV. No todas las metodologías anteriormente señaladas

incluyen todas las categorías luego en una primera aproximación muchas de éstas pueden ser descartadas por carecer de alguna de las categorías de impacto requeridas (Goedkoop, 2010).

2. Categorías de impacto ambiental más relevantes para la fitorremediación

Dada la enorme variedad de posibles escenarios que se derivan de las múltiples combinaciones entre tipo y estado del suelo a recuperar, parámetros climáticos, tecnología de fitorremediación utilizada, aprovechamiento final del cultivo, así como usos finales del suelo, resulta demasiado costoso el inventario de todos los impactos ambientales posibles, por lo que este estudio se centra en determinar qué categorías de impactos son las más influyentes desde el punto de vista del análisis de ciclo de vida para la fitorremediación.

Suer y Andersson-Sköld (2010) llevaron a cabo un estudio para un pequeño terreno de 5000 m² en Suecia que había alojado en el pasado un depósito de petróleo y estaba contaminado principalmente por aceites de origen mineral, compuestos alifáticos orgánicos, compuestos aromáticos y BTEX.

Dicho estudio se realizó con la intención de comparar los efectos medioambientales resultantes de aplicar tres tratamientos alternativos en un plazo de 20 años:

- No actuar sobre la parcela, dejando a los procesos naturales que sigan su curso.
- Tratamiento convencional del suelo contaminado, que para dicho caso se limitó a la excavación del perfil contaminado para su posterior transporte a vertedero, y relleno con suelo apto para desarrollo urbanístico.
- Descontaminación mediante fitorremediación con *Salix vitaminalis* para aprovechamiento de biomasa.

Dicho estudio determinó que para el caso de la plantación de *Salix*, el análisis de ciclo de vida viene dominado por el cambio de uso del suelo, ya que tras la descontaminación, el suelo pasa a ser clasificado como bosque bajo, puntuando favorablemente el impacto en biodiversidad.

Por otro lado, el ACV muestra que la fitorremediación también tiene sus impactos perjudiciales debidos principalmente a la labor de cultivo, al transporte de materias primas, personal y material y al empleo de fertilizantes, si bien el indicador único de ReCiPe está dominado por el cambio de uso de suelo.

Es importante mencionar que este estudio no consideró para la realización del ACV el aprovechamiento energético final, si no que consideró que los pies plantados permanecerían en el suelo, luego los efectos derivados de la obtención de energía a partir de la biomasa no fueron modelados. Dicho efectos son potencialmente beneficiosos debido a que el potencial de calentamiento global y la acidificación son reducidos al sustituir combustibles fósiles por biomasa obtenida en suelos contaminados (ERP, 2002).

Para el cálculo del balance de CO₂ se ha de tener en cuenta por un lado, la energía consumida para implantar, mantener y aprovechar los cultivos, y por otro la captura de carbono por parte de las plantas durante la fotosíntesis, así como la energía marginal ahorrada cuando la biomasa de los cultivos es aprovechada. Además, la captura de CO₂ gana especial importancia en los casos en los que la opción de no recuperar el suelo contaminado no es posible, ya que todos los tratamientos convencionales son intensivos en energía luego se le debe añadir el ahorro en CO₂ por evitar la realización de dichos tratamientos.

De ese modo, Witters et al. (2011) estudió el potencial de captura neta de CO₂ en proyectos de fitorremediación con *Salix spp*, maíz (*Zea mays L.*) y *Brassica napus L.* en suelos

contaminados por metales pesados en la región Campine localizada entre Bélgica y Holanda. Dicho estudio establece a través del análisis de ciclo de vida de las alternativas, que el balance de emisión y captura del gas invernadero es beneficioso para todos los cultivos estudiados. A la hora de realizar dichos análisis, es importante puntualizar que el balance de CO₂ está fuertemente ligado a la tecnología utilizada para la conversión en energía de la biomasa. Para el caso del maíz se utilizó la digestión anaeróbica con posterior combustión del gas en electricidad y calor en un ciclo combinado. El aprovechamiento de *Brassica* se realizó a través de la conversión en biodiesel del aceite producido tras su prensado, mientras que la biomasa de *Salix* se aprovecha a través de combustión directa.

Además, Witters et al. (2011) estudiaron los posibles efectos negativos que la alta concentración de metales pesados presente en las plantas fitorremediadoras pudieran tener en la eficiencia energética de éstas durante su conversión, estableciendo que para ninguno de los tres casos estudiados la producción energética es reducida o se produce algún tipo de incompatibilidad.

Por otro lado, se debe tener en cuenta el potencial impacto beneficioso que se deriva de la extracción de sustancias contaminantes en el suelo, si bien se destaca en la bibliografía consultada que la modelización de dichos impactos necesita ser replanteada debido a que actualmente considera que la liberación de contaminantes desde el suelo por lixiviación o evaporación sigue un patrón lineal mientras que la observación revela que el ritmo de emisión es variable con el tiempo, y exige de un modelado dinámico en su lugar (Morais y Delerue-Matos, 2010) (Pettersen y Hertwich, 2008).

Finalmente, los resultados de un estudio no publicado en el que se realizó el ACV para la descontaminación de un vertedero siderúrgico en el norte de España afectado por la presencia de metales pesados, confirma los indicios mostrados anteriormente, donde se estudiaron 4 posibles alternativas de tratamiento:

- Inacción
- Fitorremediación con *Melilotus alba* con aprovechamiento energético mediante la producción de biogás
- Fitorremediación con *Betula celtibérica* para aprovechamiento maderero
- Solidificación/Estabilización

De ese modo, la remediación con *Betula celtibérica* destacó por su impacto positivo debido a la mejora del ecosistema y a evitar la explotación de otros bosque naturales para aprovechamiento maderero, mientras que la alternativa de la remediación con *Melilotus alba* destacó la contribución positiva debida a la generación de biogás a partir de la biomasa generada por evitar tener que consumir otros cultivos para su producción.

3. Metodologías de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida para el uso en fitorremediación

Como se ha mostrado en el apartado anterior, la bibliografía muestra que a la hora de realizar un análisis de ciclo de vida de un proyecto de fitorremediación, dos de las categorías de impacto más relevantes son Cambio climático y el Uso del suelo. Por lo tanto, a continuación se procede a analizar el tratamiento que las distintas metodologías de EICV hacen de las citadas categorías.

3.1 Cambio climático

La categoría de impacto Cambio Climático aparece en todas las metodologías EICV de uso común, y todas ellas se sustentan en los modelos desarrollados por el Panel

Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). Sin embargo, se ha constatado que este modelo varía entre las distintas metodologías debido a que el IPCC actualiza sus modelos con cierta periodicidad y no todas utilizan los factores de impacto más modernos. Además, el IPCC publica distintos modelos para diferentes períodos de tiempo y las distintas metodologías consideran unos u otros buscando coherencia con el resto de las categorías.

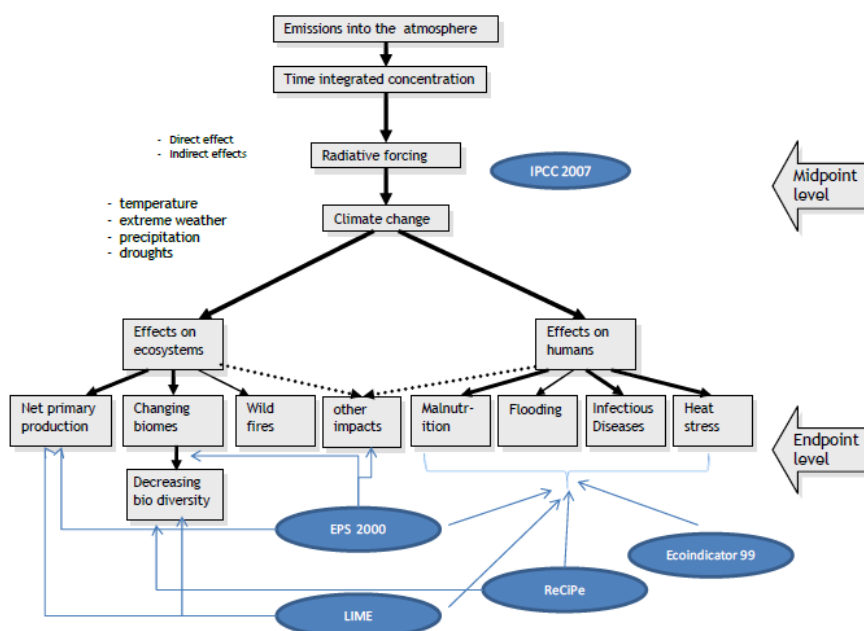
De ese modo, el modelo conocido como GWP (Global Warming Potential) publicado en el IPCC's Fourth Assessment Report es tomado como indicador en todos los modelos de caracterización a nivel de midpoint. Este modelo viene desarrollado para tres períodos de tiempo, tras 20, 100 y 500 años, recomendándose el uso del período de 100 años por ser el más usado, aunque es recomendable usar los períodos de referencia de 20 y 500 años para el análisis de sensibilidad (EC-JRC, 2010b).

Para los endpoints, destaca por un lado la metodología Eco-Indicator 99 que solamente toma en cuenta la categoría de daño a la salud humana determinado mediante el número y la duración de las enfermedades, y los años de vida perdidos debido a la muerte prematura por causas ambientales expresados en Años de vida sometidos a una discapacidad (DALY en inglés).

Por otro lado, también para la determinación de los endpoints destaca la metodología ReCiPe que incluye tanto los daños a la salud humana como la pérdida de especies. Los daños en la salud humana vienen determinados por el estrés térmico, los casos de malaria, malnutrición, diarrea y la frecuencia de inundaciones medidos en Años de vida sometidos a una discapacidad también. A su vez, la pérdida de especies viene expresada por la Fracción Potencial de Desaparición de Especies (siglas PDF en inglés). (De Schryver and Goedkoop, 2009).

A continuación, la Figura 1 resume la consideración que hacen las metodologías EICV en función de los mecanismos ambientales del cambio climático.

Figura 1: Mecanismo ambiental para el cambio climático y metodologías EICV asociadas (EC-JRC, 2010b)



La elección del método más adecuado para los midpoints es clara ya que los modelos del IPCC son los únicos utilizados en todas las metodologías aunque sería recomendable utilizar una que incluyese los modelos más actualizados.

Para el cálculo de los endpoints, destaca ReCiPe sobre el resto debido a que es el más actualizado y completo, y su desarrollo se apoya en el propio Eco-Indicator 99. No obstante, dicha recomendación debe ser tomada con cautela dada la gran incertidumbre que conllevan las numerosas asunciones y aproximaciones necesarias para considerar los impactos a tan largo plazo (EC-JRC, 2010b).

3.2 Uso del suelo

Para los impactos a nivel de midpoint, la caracterización viene principalmente determinada por la variación tanto en cantidad como en calidad de suelo ocupado o transformado.

A este nivel, la metodología más relevante es ReCiPe, aunque también se destaca el modelo específico Milà i Canals.

El método Milà i Canals se basa en el concepto de Contenido en Materia Orgánica como indicador de la calidad del suelo, especialmente para evaluar los impactos de los usos sobre suelo fértil. Este modelo tiene la limitación de que no considera la biodiversidad. Por otro lado, la metodología ReCiPe simplemente considera el área superficial ocupada o transformada sin ninguna caracterización, por lo que se considera que en realidad es más un catálogo de parámetros ICV que un modelo de caracterización (EC-JRC, 2010b). Así, el modelo Milà i Canals es más adecuado que ReCiPe debido a que está basado en indicadores más robustos, aunque este último es más conocido y tiene una aplicabilidad mayor.

Para los indicadores endpoint, la oferta de metodologías es mayor. Todos los modelos consideran los daños causados a la biodiversidad en función del manejo del suelo y se basan en datos de observación en lugar de parámetros provenientes de relaciones causa-efecto.

De entre las metodologías disponibles destaca Eco-Indicator 99. Los impactos derivados por el uso del suelo aparecen expresados como Fracción Potencial de Desaparición de Especies (siglas PDF en inglés) y tiene una especial aplicabilidad para los casos en los que se utilicen dosis considerables de fertilizante o herbicidas dado que permite evitar la doble contabilización de impactos, de manera que los efectos provocados por la adición de fertilizante aparecen para la categoría de Uso del Suelo pero no en la de eutrofización (EC-JRC, 2010b).

Por otro lado, ReCiPe considera tanto la ocupación como la transformación del suelo aunque solamente para 12 tipos, lo que obliga al modelador a aproximar su caso a una de estas 12 tipologías. Además, utiliza datos y modelos más modernos que Eco-Indicator 99 y considera diferentes grados de intensidad de uso de la tierra. Como desventaja comparativa se observa que este sistema no considera mecanismos para evitar la doble contabilización de impactos. Por todo ello, la metodología más adecuada es ReCiPe aunque como ocurre para el resto de indicadores endpoint, está basado en numerosas asunciones e imprecisiones que resultan en una baja fiabilidad (EC-JRC, 2010b).

4. Conclusiones

Dado que las tecnologías de fitorremediación son aun muy novedosas, el rango de publicaciones científicas disponibles que analizan a la fitoextracción desde la perspectiva del ACV es muy limitado, si bien suficiente para arrojar algunas conclusiones.

A la hora de establecer cuáles son los factores más relevantes a tener en cuenta a la hora de realizar un ACV para un proyecto de fitorremediación, se ha repasado la bibliografía existente en el tema y se ha encontrado que las categorías de impacto, Cambio Climático y Uso del Suelo tienen una gran relevancia en este tipo de estudios.

Tras un repaso del tratamiento que varias metodologías de Evaluación de Impacto Ambiental de uso común en ACV hacen de estas categorías, se ha encontrado que ReCiPe es la metodología más completa dado que considera todos los impactos de interés y tiene los modelos más actualizados, destacando especialmente para el cálculo de los endpoints. No obstante, la precisión de los endpoints está comprometida debido a la dificultad y las incertidumbres asociadas a las estimaciones a largo plazo luego exige un mayor estudio.

Finalmente, tras establecer la importancia que la categoría de Usos del Suelo tiene para los proyectos de fitorremediación, se ha encontrado que los modelos utilizados están basados en datos obtenidos de regiones muy concretas, noroeste Europeo en el caso de ReCiPe, y Centroeuropa para el caso de Eco-Indicator 99, luego su validez fuera de dichas regiones añade incertidumbre adicional a los resultados.

5. Referencias

De Schryver A.M., Brakkee K.W., Goedkoop M.J., Huijbregts M.A.J. Characterization Factors for Global Warming in Life Cycle Assessment Based on Damages to Humans and Ecosystems. Environmental Science and Technology. 2009

EC-JRC (2010a) ILCD Handbook. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Available at <http://lct.jrc.ec.europa.eu>

EC-JRC (2010b) ILCD Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Available at <http://lct.jrc.ec.europa.eu>

Environment Research Programme-ERP- Bioremediation and economic renewal of industrially degraded land by biomass fuel crops. Summary report. 2002

Goedkoop, M et al.. 2010. Introduction to LCA with SimaPro 7. Report 4.5 – November 2010

IPCC (2007). IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

ISO. 2006. Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida –Requisitos y directrices. ISO 14044:2006.

ISO. 2006. Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida –Principios y marco de referencia. ISO 14040:2006.

Morais, S, Delarue-Matos, C. A perspective on LCA application in site remediation services: Critical review of challenges. Journal of Hazardous Materials. 2009.

Petterson, J, Hertwich, E G. Critical review: life-cycle inventory procedures for long-term release of metals, Environmental Science and Technology. 2008.

Suer, P, Andersson-Sköld, Y. Life cycle assessment (LCA) of soil remediation options. Biomass & Bioenergy. 2010.

Witters, N. Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide abatement. Biomass & Energy. 2011

Correspondencia (Para más información contacte con):

Francisco Manuel Marey Pérez

Chalet nº 1 - Avda de las Ciencias, Campus Vida

Universidad de Santiago de Compostela

Santiago de Compostela (ESPAÑA)

E-mail: manuel.marey@usc.es