

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

GIULIO DE MANINCOR CAPESTRANI

Integração de sistema de informações geográficas à avaliação do ciclo de vida: compreensão dos procedimentos metodológicos internacionais para aplicação no contexto de impactos regionais da produção de etanol do estado de São Paulo.

São Carlos, SP

2012

GIULIO DE MANINCOR CAPESTRANI

Integração de sistema de informações geográficas à avaliação do ciclo de vida: compreensão dos procedimentos metodológicos internacionais para aplicação no contexto de impactos regionais da produção de etanol do estado de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Montañó

Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

São Carlos, SP

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C239i Capestrani, Giulio de Manincor
Integração de sistema de informações geográficas à
avaliação do ciclo de vida: compreensão dos
procedimentos metodológicos internacionais para
aplicação no contexto de impactos regionais da produção
de etanol do estado de São Paulo. / Giulio de Manincor
Capestrani; orientador Marcelo Montaña; coorientador
Aldo Ometto. São Carlos, 2012.

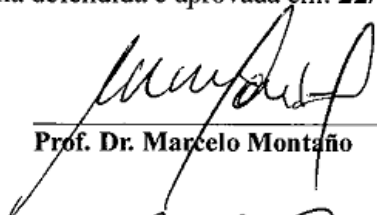
Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2012.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Sistema de
Informação Geográfica. 3. Inventário de Ciclo de Vida.
4. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida. 5. Impactos
Ambientais Regionais. 6. Categorias de Impacto. 7.
Etanol. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato(a): **Giulio de Manincor Capestrani**

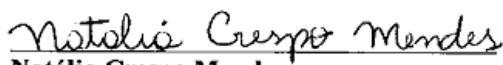
Monografia defendida e aprovada em: **22/11/2012** pela Comissão Julgadora:



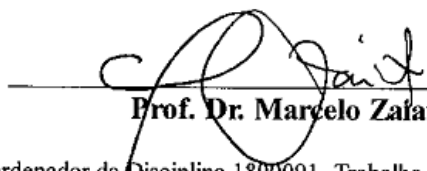
Prof. Dr. Marcelo Montañó



Profa. Renata Bovo Peres



Natália Crespo Mendes



Prof. Dr. Marcelo Zalaf

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Às famílias.

RESUMO

CAPESTRANI, G. M. **Integração de sistema de informações geográficas à avaliação do ciclo de vida**: compreensão dos procedimentos metodológicos internacionais para aplicação no contexto de impactos regionais da produção de etanol do estado de São Paulo. 63p. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

A necessidade de exploração dos recursos naturais para a produção de bens de consumo é fato já abarcado há anos pelas discussões em torno da sustentabilidade. Enquanto a tecnologia avança no sentido de aumento da produção agrícola para os mais diversos fins, os impactos ambientais decorrentes da superexploração dos recursos naturais parecem não seguir o mesmo rumo promissor, pois as práticas mais difundidas para uso do solo continuam degradando os ambientes naturais por todo o planeta. Diante da consolidação do mercado interno nacional de uso de motores bicom bustíveis, dos interesses internacionais caracterizados pela ascensão de preços do petróleo, dos compromissos internacionais para a redução de emissões de gases oriundos da queima de combustíveis fósseis, pode-se entender que o investimento na expansão do setor sucroalcooleiro é interessante para o país. As ferramentas de SIG e ACV são fundamentalmente diferentes e complementares, sendo o primeiro utilizado para organizar e analisar dados espaciais, e o segundo para levantar e analisar sistemas sem operar informações espaciais. Sendo assim, o presente trabalho procura focar a utilização da metodologia da ACV proposta pelas normas da ABNT, tendo o SIG como elemento de suporte metodológico e orientando as discussões para o contexto de produção de etanol no estado de São Paulo. O intuito do projeto é o estudo e a discussão de metodologias que permitam avaliar os impactos sobre o meio ambiente decorrentes da produção de etanol, com base nas experiências internacionais de aplicação da ACV em conjunto com o SIG. Conclui-se, dentre outras coisas, que se a elaboração de um ICV espaço dependente for possível, com informações relacionadas às características específicas das regiões do escopo definido para a ACV do etanol, esse serviria como uma base fundamental consistente para se conduzir avaliações relacionadas aos impactos, na etapa de AICV, permitindo a análise dos impactos ambientais relacionados a uma dada categoria de impacto adotada para o ciclo de vida do etanol paulista.

Palavras-chave: ACV; ICV; AICV; SIG; Impactos Ambientais Regionais; Etanol; Categorias de Impacto.

ABSTRACT

CAPESTRANI, G. M. **Integrating Geographic Information System to Life Cycle Assessment**: comprehension of the international methodological procedures for an application in the regional impacts context of São Paulo's ethanol production. 63p. Degree Thesis for Graduation on Environmental Engineering - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, 2012.

The need to explore the natural resources for the production of consuming goods is already widely accepted throughout the sustainability discussions. Summed to this, while the technology is moving towards the increase of the agricultural production, the environmental impacts related to these soil uses is not following such a promising path, due the fact that the most spread soil use methods are still degrading the natural environments all around the planet. Having in mind the consolidation of the biofuel national market, also the international interest related to high prices of the petroleum, and plus the international compromises headed for the reduction of the greenhouse gases emissions, it is understandable that the interest on investing on the expansion of the biofuel sector is on the rise, and that it is a favorable moment for this industry in Brazil. The GIS and LCA tools are both fundamentally different and complementary. The first is broadly used for the assessment of spatial data, while the second is truly handful for gathering and analyzing processes and information. What drives this project is the utilization of the LCA, according to the ISO 14.000 guidelines, having the GIS as an element of methodological foundation. The discussion is oriented to São Paulo's ethanol production's context. Also, this thesis uses the international bibliography as a start argument for discussing different approaches on the GIS and LCA union. The possibility of using the fusion of these two tools for assessing the environmental impacts related to the ethanol production is also discussed. The reached conclusions, among other things, are that if the preparation of an LCI, containing the information related to the specific characteristics of the regions inside the predefined scope for the LCA of ethanol, as a space-dependent data is possible, it would serve as a consistent fundamental source to conduct assessments related to environmental impacts, on the LCIA stage. In addition, it would allow the analysis of the environmental impacts related to a given specific impact category adopted for the lifecycle analyses of the ethanol produced in São Paulo.

Keywords: LCA; LCI; LCIA; GIS; Regionalized Environmental Impacts; Ethanol; Impact Categories.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de uma ACV	11
Figura 2– Funcionalidade do SIG.....	12
Figura 3 – Ocupação e Transformação do Solo	14
Figura 4 – Potencial de redução de CO ₂ com uma estratégia de uso do solo.....	16
Figura 5 – Relacionamento entre ACV e SIG.	17
Figura 6 – <i>Overview</i> dos impactos de <i>mid-point</i> e relação desses com os impactos de <i>end-point</i>	21
Figura 7 – Impactos regionais da rede de produção total anual dos EUA para as cinco categorias de impacto concomitantemente	23
Figura 8- Estrutura metodológica geral para utilização do SIG em ACV.....	30
Figura 9– Relações entre os resultados do ICV, os mecanismos ambientais, as categorias de impacto, os modelos de caracterização e os indicadores de categoria.	32
Figura 10- Estrutura geral para utilização do SIG nas ACV do etanol paulista.....	39
Figura 11– Exemplo de utilização de categoria de impacto da AICV na estrutura do SIG	40
Figura 12- Metodologia para obtenção de FC do etanol para exemplo de categoria de impacto de mudança climática	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de Riqueza de Espécies e.....	20
Tabela 2– Síntese dos aspectos ambientais utilizados na bibliografia	24
Tabela 4- Síntese da utilização do SIG em ACV	29
Tabela 4- Aspectos e Impactos das Etapas do Ciclo de Vida do Etanol	35
Tabela 5 - Impactos e Categorias de Impacto das Etapas do Ciclo de Vida do Etanol	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	-	Avaliação do Ciclo de Vida
AIA	-	Avaliação de Impacto Ambiental
AICV	-	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
CRHEA	-	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
EESC/USP	-	Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo
EFQ	-	Qualidade Funcional do Ecossistema
ESQ	-	Qualidade Estrutural do Ecossistema
EUA	-	Estados Unidos da América
FC	-	Fatores de Caracterização
GAMA	-	Grupo de Adequação Ambiental e Manufatura
GEE	-	Gases de Efeito Estufa
IAIA	-	<i>International Association for Impact Assessment</i>
ICV	-	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
IUCN	-	<i>International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources</i>
LANCA	-	<i>Land Use Indicator Value Calculation in Life Cycle Assessment</i>
LCRAM	-	<i>Life Cycle Region-specific Assessment Method</i>
ONU	-	Organização das Nações Unidas
PNMA	-	Política Nacional do Meio Ambiente
SIG	-	Sistema de Informação Geográfica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	4
3.	METODOLOGIA	5
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1.	DEFINIÇÕES RELEVANTES	6
4.1.1.	Ambiente, Poluição e Degradação Ambiental	6
4.1.2.	Desenvolvimento Sustentável	7
4.1.3.	Impactos, Aspectos e Processos Ambientais	8
4.1.4.	A Avaliação de Impacto Ambiental	9
4.1.5.	A Avaliação do Ciclo de Vida	9
4.1.6.	Os Sistemas de Informação Geográfica	11
4.2.	UTILIZAÇÃO DO SIG NOS ESTUDOS DE CASOS INTERNACIONAIS DE ACV	13
4.2.1.	Categorias de impacto	14
4.2.2.	Escopo espacial e temporal	18
4.2.3.	Fatores de Caracterização, Indicadores e Aspectos Ambientais	19
4.2.4.	Utilização do SIG nas ACV	25
4.2.5.	Estrutura metodológica para inserção do SIG em ACV	30
4.3.	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E O ÁLCOOL COMBUSTÍVEL	31
4.3.1.	Impactos ambientais decorrentes da produção de álcool combustivo	33
5.	DISCUSSÃO	36
5.1.	CATEGORIAS E IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DO ETANOL COMBUSTÍVEL	36
5.2.	ESCOPOS ESPACIAIS E TEMPORAIS	37
5.3.	MOTIVAÇÕES PARA USO DO SIG NA ACV DO ETANOL PAULISTA	38
5.4.	SIG NA ACV – ESTRUTURA GERAL	38
6.	CONCLUSÕES	42
7.	REFERÊNCIAS	44

1. Introdução

A necessidade de exploração dos recursos naturais para a produção agrícola é fato já abarcado há anos pelas discussões em torno da sustentabilidade. A qualidade da água e do solo são as mais sensíveis às mudanças no modo de produção agrícola, já sendo tradicionalmente considerados como passíveis de sofrer significativos impactos ambientais. Além de oferecerem o suporte físico e biótico necessários para o cultivo agrícola, exercem papéis ambientais importantíssimos e provêm funções ecossistêmicas fundamentais para a manutenção do equilíbrio ambiental. Enquanto a tecnologia avança no sentido de aumento da produção agrícola para os mais diversos fins, os impactos ambientais decorrentes da superexploração dos recursos naturais parecem não seguir o mesmo rumo promissor, pois as práticas mais difundidas para uso do solo continuam degradando os ambientes naturais por todo o planeta.

Por conta disso, a gestão do uso do solo e dos recursos hídricos deve ser tomada como prioridade, especialmente quando utilizadas de maneira extensiva como no caso da agricultura (NÚÑEZ, 2011).

Uma das estratégias mais utilizadas globalmente para a avaliação da sustentabilidade dos processos e produtos se dá pelo uso da avaliação, do berço ao túmulo, de seu ciclo de vida (OMETTO e SAAVEDRA, 2012).

O princípio básico da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é a busca pela identificação de todos os fluxos, de entrada e saída, de matéria-prima e energia utilizada no processo de manufatura do produto ou serviço, desde a extração do recurso natural bruto, até a disposição final dos resíduos gerados em todas as etapas, e ao longo de toda a vida útil do produto ou processo (BENGTSSON et al., 1998).

O uso da terra é um dos aspectos com os quais a ACV pode lidar, e a área de terra cultivável disponível é um recurso limitado importante, que deve ser tratado com bastante relevância, não apenas em relação à superfície de terra utilizada, mas também em relação à sua qualidade e tipos do uso (MATTSSON, CEDERBERG, e BLIX, 2000).

Não há consenso sobre qual abordagem deve ser utilizada na comunidade científica que trata da ACV para a avaliação de impactos do uso do solo (ACHTEN et al., 2009).

Os impactos ambientais mudam em função das características do meio em que ocorrem, e na produção agrícola as variações geográficas da produtividade do solo implicam em mudanças importantes no manejo do solo visando à máxima produtividade por unidade de área cultivada. Além disso, os impactos sobre o meio ambiente dependem não apenas do novo modo de cultivo, mas também do tipo de habitat existente e das espécies presentes.

Recentemente, a ACV foi reorganizada para servir como um instrumento efetivo para a avaliação dos impactos ambientais regionais de atividades. O maior obstáculo a ser ultrapassado é como aplicar a ACV em estudos regionais mantendo a fidelidade às características específicas da área, mantendo-as o mais próximo possível da realidade (YI et al., 2007).

Sabendo do grande reconhecimento internacional que o Brasil tem pela produção do setor sucroalcooleiro, e sendo esse setor referência para a produção agrícola monocultora do sudeste nacional, a importância de analisar a fundo os potenciais impactos ambientais relacionados fica evidente. Atualmente a indústria alcooleira está passando por um ciclo de expansão, com confirmação das expectativas de crescimento para a produção do etanol apresentadas por Rodrigues e Ortiz (2006).

Diante da consolidação do mercado interno nacional de uso de motores bicom bustíveis, dos interesses internacionais caracterizados pela ascensão de preços do petróleo, dos compromissos internacionais para a redução de emissões de gases oriundos da queima de combustíveis fósseis, pode-se entender que o investimento na expansão do setor sucroalcooleiro é interessante para o país. Assim, como afirmado por Rodrigues e Ortiz (2006), o atendimento a esta vasta e crescente demanda apontam na direção do avanço das monoculturas e de seus impactos sociais e ambientais no território nacional, principalmente no sudeste, demandando muita atenção da sociedade civil para serem prevenidos e mitigados.

A cana de açúcar já ocupa atualmente mais de 5 milhões de hectares de área plantada em território paulista e, com um rendimento médio de 85,5 ton./hectare, se caracteriza como uma das principais fontes de renda agrícola de São Paulo e do Brasil. Em 2010, a produção do setor chegou à 426.572.099 toneladas de cana de açúcar (IBGE, 2011).

O etanol de cana-de-açúcar tem sido apontado como a melhor opção para a produção de biocom bustíveis em larga escala. O balanço energético do etanol brasileiro é 4,5 vezes melhor do que o produzido a partir da beterraba ou do trigo, e quase sete vezes melhor do que o do

etanol de milho (ÚNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2008). É justamente por isso que deve ter seus impactos avaliados para que o setor tenha oportunidade de internalizar os custos sociais e ambientais decorrentes de sua produção e utilização.

Assim, é necessário o desenvolvimento de metodologias que tenham representatividade para descrever os impactos ambientais, preferencialmente de maneira espacializada, e que permitam refletir a complexidade com que o processo produtivo, como, por exemplo, o do etanol combustível, impactam o meio ambiente.

Softwares de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem facilmente operar dados relacionados a localidades específicas (e.g., tipos de solo, recursos hídricos, etc.), além de possibilitar a criação de novas informações correlacionadas (e.g., potencial de produção, potencial de impacto, área total de cada tipologia de uso, etc.) (GEYER et al. 2010b).

Nesse contexto, vários Inventários de Ciclo de Vida (ICV) e Avaliações de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) – etapas fundamentais do processo de Avaliação de Ciclo de Vida de produtos – foram empreendidos para tentar incluir as especificidades regionais das áreas em análise (YI et al., 2007). No entanto, no caso brasileiro, essas tentativas ainda são incipientes.

Sendo assim, o presente trabalho procura focar a utilização da metodologia da ACV proposta pelas normas ABNT (2008) e ABNT (2009), tendo o SIG como elemento de suporte metodológico e orientando as discussões para o contexto do cultivo da cana-de-açúcar para produção de etanol no estado de São Paulo. O intuito do projeto é o estudo das metodologias que permitam avaliar os impactos sobre o meio ambiente decorrentes do uso do solo para produção de etanol, com base nas experiências internacionais de aplicação da ACV em conjunto com o SIG.

2. Objetivos

O objetivo geral desse trabalho de graduação consiste na compreensão dos procedimentos metodológicos em SIG que possibilitam a regionalização das análises de impactos ambientais de ciclo de vida de produtos e processos, direcionando as metodologias internacionalmente utilizadas para o contexto de produção paulista do álcool combustivo, e subsidiando a gestão do ciclo de vida desse produto.

Consideram-se objetivos específicos deste projeto de pesquisa:

- Análise das formas de utilização do Sistema de Informações Geográfica nas Avaliações de Ciclo de Vida em artigos internacionais, quanto às abordagens para utilização de categorias de impacto, os escopos espaciais e temporais, os indicadores, o contexto de utilização, e a estrutura metodológica básica para inserção do SIG nas ACV;
- Direcionamento da estrutura metodológica básica para inserção do SIG nas ACV, a ser encontrada, para o contexto do etanol no estado de São Paulo, utilizando os artigos como base fundamental;
- Discussão sobre a possibilidade de utilização da fusão das ferramentas de SIG e ACV para enriquecer as AICVs do etanol.

3. Metodologia

O levantamento dos principais métodos para inserção da ferramenta de SIG na avaliação do ciclo de vida foi realizado por meio de revisão bibliográfica. O foco da análise são as ACVs baseadas na *International Organization for Standardization* (ISO) através das normas NBR ISO 14.040 (2008) e NBR ISO 14.044 (2009).

De maneira geral para os trabalhos identificados, o uso do SIG foi incorporado à ACV de modo que, durante a análise dos impactos ambientais, a variabilidade espaço-temporal dos recursos naturais estudados foi levada em conta. O SIG foi basicamente utilizado em duas fases da ACV: análise do inventário do ciclo de vida (ICV) e na avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), mas se comunica indiretamente com as outras etapas.

Durante a fase de ICV, as análises buscaram identificar o uso do SIG para realizar um inventário espaçodependente, possibilitando a escolha de categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização de impacto, onde os fluxos materiais e energéticos variam de acordo com a localização geográfica. Já na AICV, a análise foi feita para identificar fatores de caracterização (FC) espaçodependentes – utilizados para converter o resultado da análise do ICV em uma unidade comum do indicador de categoria – a serem aplicados nos modelos de impactos regionais, direcionados para estado de São Paulo, com o uso do SIG.

A leitura dos trabalhos e a sistematização da bibliografia foram direcionadas à identificação de: objetivos e motivações para uso do SIG em ACV, abordagens para utilização de categorias de impacto, escopos espaciais e temporais, indicadores utilizados para a criação de fatores de caracterização, contexto de utilização e estrutura metodológica para inserção do SIG na ACV. A organização das informações na revisão bibliográfica se deu no mesmo sentido.

Servindo de guia para a melhor compreensão das etapas de utilização do SIG nos procedimentos de ACV adotados pelos autores revisados, bem como para o melhor entendimento da forma de obtenção dos Fatores de Caracterização (FC), elaborou-se fluxogramas que relacionam as etapas da ACV, obrigatórias ou não, com as funções do SIG. Ainda no sentido de facilitar a compreensão – para a síntese, comparações e o direcionamento ao contexto do etanol – do grande volume de informações levantadas, foram criadas tabelas relacionais, como por exemplo, com o cruzamento de informações entre os *impactos ambientais* e as *categorias de impacto* das etapas do ACV para o etanol.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Definições Relevantes

4.1.1. Ambiente, Poluição e Degradação Ambiental

De acordo com Sánchez (2008), o conceito de “ambiente”, no campo do planejamento e gestão ambiental, é amplo, multifacetado e maleável. O caráter amplo do conceito vem dos diversos atores que têm influência na constituição do termo, que envolve tanto a esfera antrópica quanto a biológica. O conceito de ambiente pode ser utilizado nas mais diversas formas dentro dos mais diversos contextos, tomando sentidos e amplitudes de acordo com o grupo que o interpreta.

Para esse trabalho, o termo “ambiente” considerará também as interpretações da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), que de maneira bastante direta define o ambiente como *“o conjunto de condições, leis, influências e interpretações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”*.

Bem como a definição oferecida pela norma técnica NBR ISO 14001:2004 que define meio ambiente como sendo *“a circunvizinhança em que uma organização opera, incluindo-se ar, água, recursos naturais, flora, fauna, seres humanos e suas inter-relações”*.

O termo “poluição” retrata, de maneira geral, uma condição do meio ambiente que se mostra prejudicial à manutenção da vida e dos organismos. Para Sánchez (2008), as causas da poluição são as atividades humanas que, no sentido etimológico, “suja” o ambiente.

De acordo com a PNMA (Lei nº 6.938, de 31 de dezembro de 1981), “poluição” se define como:

“a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;*
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;*
- c) afetem desfavoravelmente a biota;*
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;*
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos”*.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o conceito de “degradação ambiental” traz consigo uma conotação negativa em relação às consequências da utilização dos recursos naturais para

a realização das atividades humanas. Na PNMA (Lei nº 6.938, de 31 de dezembro de 1981), o termo é definido como “*a alteração adversa das características do meio ambiente*”. Maneira bastante generalista, exatamente para abranger todos os prejuízos sociais, ambientais e econômicos do meio, atribuídos para a poluição (Sánchez, 2008).

4.1.2. Desenvolvimento Sustentável

A primeira vez que o termo *Desenvolvimento Sustentável* foi utilizado oficialmente foi em meados da década de 80, durante a *International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN)* (OLIVEIRA, MONTAÑO, e SOUZA, 2009). Porém, foi a partir da publicação do relatório de *Brundtland* em 1987, que o termo tomou sentido como “*aquele que atende às necessidades presentes sem comprometer a habilidade das gerações futuras em satisfazer as suas próprias necessidades*” (WCED - *World Commission on Environment and Development*, 1987), e começou a ser realmente considerado em nível mundial.

Desde então, o sentido do termo foi reinterpretado inúmeras vezes, acordando sempre com as ideias do grupo de pessoas que o manejavam. Existem problemas consideráveis em relação à flexibilidade de interpretação que fica dependente das opiniões e da constituição do grupo formado para a tomada de decisão (Oliveira, Montaña, & Souza, 2009). Mas isso já era esperado, visto que no próprio relatório é dito que o importante é manter-se a sinceridade na busca pelos objetivos da sustentabilidade (WCED, 1987).

Temos como ponto passivo que o desenvolvimento sustentável é uma aspiração nobre e necessária. Porém, o paradigma que se cria em relação a esse ponto é que mesmo sabendo que durante os últimos vinte anos, governos, empresas e a sociedade civil compreenderam e se comprometeram com os objetivos da sustentabilidade, as ações para se garantir a transição do modelo do desenvolvimento ultrapassado para o modelo sustentável, não se aprofundaram o suficiente nem tocaram nas mudanças realmente necessárias para suportar essa transição (IISD – *International Institute for Sustainable Development*, 2010).

A definição do conceito de desenvolvimento sustentável adotada por um governo vai determinar, por meio da adoção de políticas relacionadas à natureza e a extensão da gestão dos recursos naturais, a forma de gestão dos recursos naturais dentro deste país (Jones, et al. 2005).

No último encontro promovido pela Organização das Nações Unidas (ONU), em junho de 2012 no Rio de Janeiro, foram estabelecidos compromissos em prol do desenvolvimento

sustentável, sendo muitos desses relacionados à produção agrícola menos industrial e mais sustentável (U.N. – *United Nations*, 2012).

4.1.3. Impactos, Aspectos e Processos Ambientais

A série de normas ISO 14.000 regula os sistemas de gestão ambiental, o desempenho ambiental, a avaliação do ciclo de vida de produtos, *ecodesign*, entre outras coisas. Nela, encontra-se a definição de aspecto, impacto e processo ambiental, que é importante para a compreensão dos argumentos no decorrer do texto.

A expressão “*impacto ambiental*” traz, comumente, uma conotação pejorativa da situação descrita. Quando essa expressão é utilizada, normalmente se retrata uma situação onde houve dano à natureza causado por atividades humanas. Porém, segundo a norma NBR ISO 14001 (2004), *impacto ambiental* se define como “*qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, dos aspectos ambientais da organização*”.

É necessário cautela quando se interpreta o termo impacto ambiental dentro da lógica de causa e consequência. Impacto ambiental é o resultado de uma ação, e não a ação em si (SÁNCHEZ, 2008).

Segundo a norma NBR ISO 14.001 (2004), *aspecto ambiental* se define como “*elemento das atividades ou produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente*”, em seguida, por meio de uma nota, o texto relaciona *aspecto* a *impacto* dizendo que “*um aspecto ambiental significativo é aquele que tem ou pode ter um impacto ambiental significativo*”.

Para Sánchez (2008), aspecto ambiental pode ser entendido como o mecanismo através do qual uma ação humana causa um impacto ambiental. Porém, o emprego do termo *aspecto* causa confusão no momento de interpretação, exigindo o uso de exemplos para a melhor compreensão. Tomando a emissão de poluentes na atmosfera, a produção de resíduos sólidos, a produção de efluentes industriais, o desmatamento de florestas nativas, etc. como aspectos ambientais, e a poluição atmosférica, a contaminação do solo, a contaminação das águas superficiais, a erosão do solo como seus possíveis respectivos impactos ambientais, fica mais fácil de compreender.

Por fim, resumidamente, o termo *processos ambientais* é apresentado para possibilitar a análise de um determinado setor ambiental, de maneira isolada e levando em consideração os fluxos de energia e matéria dentro desse escopo reduzido. Assim, para possibilitar a

quantificação e a comparação entre os impactos ambientais sobre o meio ambiente, pode-se restringir a análise dos impactos ambientais causados por um aspecto ambiental a um determinado “setor”. Por exemplo, para compreender como as ações humanas impactam os processos naturais do solo, pode-se focar nos processos erosivos decorrentes dessas ações (SÁNCHEZ, 2008).

4.1.4. A Avaliação de Impacto Ambiental

A Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) foi proposta de maneira pioneira como um instrumento de planejamento ambiental, com caráter prévio e preventivo, a partir da criação da legislação norte americana, National Environmental Policy Act (NEPA), que entrou em vigor nos Estados Unidos da América em 1970, e inspirou a criação de outras legislações pelo mundo, inclusive a brasileira. Com o NEPA, nos EUA passou-se a exigir a elaboração de uma declaração, por parte do executor do empreendimento, que delimite o impacto ambiental potencial causado pelo empreendimento.

Existem inúmeras interpretações quanto ao significado e o objetivo da AIA, uma delas, bastante simplificada e de fácil entendimento, é apresentada pela *International Association for Impact Assessment* (IAIA), que segue: “*avaliação de impacto, simplesmente definida, é o processo de identificar as consequências futuras de uma ação presente ou proposta*” (IAIA, 2012).

Assim, de maneira geral, a AIA é apresentada, seja como um instrumento, seja como um procedimento, ou ambos, visando antever as possíveis consequências de uma decisão (Sánchez, 2008).

4.1.5. A Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apareceu pela primeira vez nos anos 60 como um instrumento para definir os impactos ambientais e as demandas de cada estágio da produção, dos processos e etc. (BARROW, 2006).

Conforme Barbieri (2007), a ACV é um instrumento de gestão ambiental aplicável a bens e serviços. O princípio básico da ACV é identificar toda matéria-prima e a energia utilizada no processo de manufatura do produto ou serviço, desde a extração do recurso natural bruto, a disposição final dos resíduos gerados em todas as etapas e durante toda a vida útil do produto ou processo.

Esse instrumento de gestão também é conhecida pela expressão *do berço ao túmulo* (*cradle to grave*), berço indicando o nascedouro dos insumos primários mediante a extração de recursos naturais e túmulo, o destino final dos resíduos que não serão reciclados ou reusados (BENGTSSON, et al. 1998).

Segundo Ometto e Saavedra (2012), é possível dizer que a ACV é o principal procedimento atualmente utilizado para avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados a produtos durante todas as etapas do ciclo de vida. Além disso, a ACV pode ser vista como um instrumento útil para a melhor compreensão de questões ambientais e para a avaliação de impactos ambientais.

As quatro fases de uma ACV são estruturadas dentro de uma norma internacional para a quantificação de emissões, consumo de recursos e impactos ambientais e sobre a saúde, que estão associados aos bens e serviços (ILCD, 2010).

A norma ISO 14040 coloca a avaliação de ciclo de vida como sendo a sequência de estágios intrinsicamente conectados ao sistema de produto, partindo da extração da matéria-prima e chegando até sua disposição final. As avaliações de ciclo de vida focam os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida do produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (do berço ao túmulo) (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

O estudo de ACV é composto por quatro principais fases (ABNT, 2009):

- Fase de definição de objetivo e escopo – define o escopo, o nível de detalhamento, a fronteira do sistema da ACV, a metodologia de AICV e tipos de impactos, a interpretação a ser utilizada, as limitações, os pressupostos, entre outras coisas. Tendo em vista que esses devem ser coerentes com a aplicação pretendida, e bem definidos em relação às decisões que devem sustentar;
- Fase de análise de Inventário (ICV) – Inventário de dados de entradas e saídas associados ao sistema em estudo. Essa fase envolve a coleta de dados, relacionados às emissões no ar, água e solo, necessários para o alcance dos objetivos e do escopo do estudo;
- Fase de avaliação de impactos (AICV) – Baseada nos resultados da análise do inventário do ciclo de vida, que incluem os fluxos que envolvem o sistema, oferece as

informações adicionais para ajudar na avaliação da relevância dos resultados de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental.

- Fase de interpretação – onde os resultados da ICV e AICV são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo.

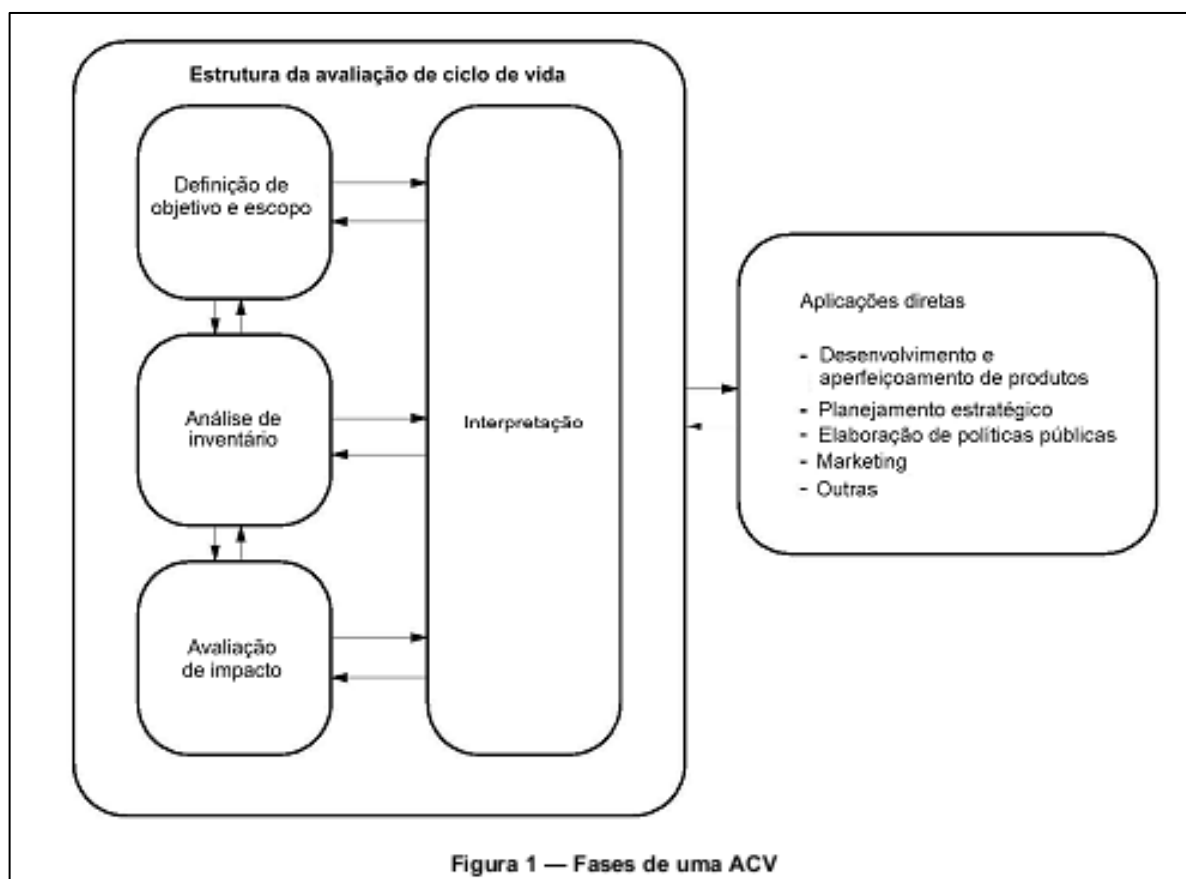


Figura 1 - Fases de uma ACV

Fonte: (ABNT, 2008)

Essa estrutura básica se mostra bastante flexível, justamente para possibilitar a adaptação para os diversos sistemas de produto e produção do mundo, mas tenta manter uma preocupação para o estabelecimento de diretrizes, que garantam a credibilidade da norma. De acordo com Barbieri (2007), as avaliações feitas segundo critérios diferentes chegam a conclusões diferentes sobre os impactos ambientais de um mesmo produto.

4.1.6. Os Sistemas de Informação Geográfica

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) surgiram para possibilitar o armazenamento, a manipulação e a geração de mapas com grande volume de informações geográficas

(informações que possuem dimensão espacial georeferenciadas, num dado instante do tempo), provenientes de diversas fontes das áreas em análise (LACRUZ e SOUZA FILHO, 2009).

O SIG, como uma ferramenta para o geoprocessamento permite “modelar” as características do ambiente dentro de um contexto que leva em conta as variáveis espaciais e temporais. Como Mendes e Cirilo (2001) afirmam, para possibilitar a construção de modelos (representando o ambiente) algumas características do ambiente são reformuladas de modo a tornarem-se mais familiar, simplificada, acessível, observável, facilmente apresentada ou controlável. Isso possibilita a interpretação dessas informações e a retirada de conclusões a respeito desse ambiente, permitindo sua melhor compreensão e, conseqüentemente, gestão.

Uma das funções mais amplamente utilizadas nos sistemas de informação geográfica é a sobreposição de informação, representada pelo conjunto de planos ou camadas de informação, que permite realizar uma análise integrada dos dados. Por exemplo, mapas temáticos que misturam informações sobre vegetação, solos, geomorfologia e uso do solo (Lacruz & Souza Filho, 2009).

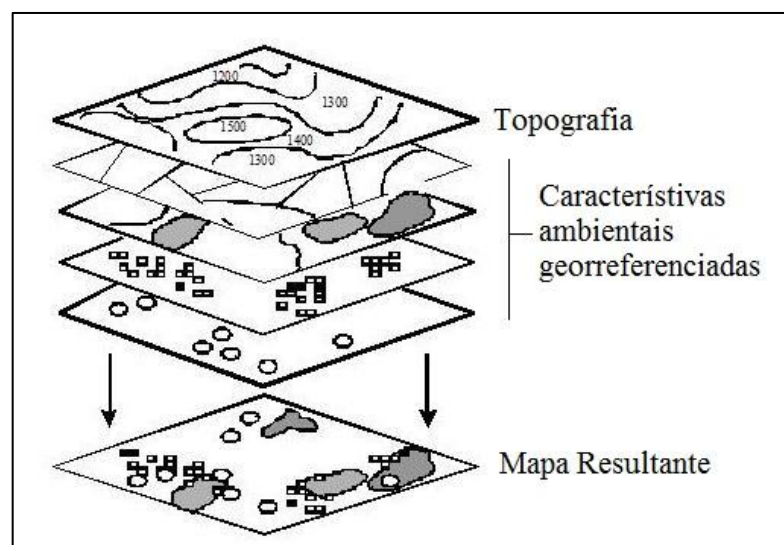


Figura 2– Funcionalidade do SIG
Fonte: Adaptado de (SIGeográfico, 2009).

Porém, tal ferramenta traz consigo uma fragilidade grande relacionada á exatidão e confiabilidade das informações concluídas. Isso se dá por uma série de razões, entre elas (MENDES e CIRILO, 2001):

- Visão da realidade excessivamente formalizada;
- Estruturação dos problemas de uma forma muito mais exata do que permitem os dados utilizados, resultando em previsões inadequadas;

- Ansiedade, quando do desenvolvimento de modelos, pela generalidade;
- Atitudes de desprezo, quando do desenvolvimento de modelos, pelo caso particular.

Mesmo com essas fragilidades, e concordando com Barrow (2006), o SIG se mostra como uma ferramenta importante para o planejamento, monitoramento, pesquisa e avaliação ambiental. Além disso, consiste, basicamente, numa rede de armazenamento e interpretação de dados que dá suporte visual para a representação espacial de fenômenos que ocorrem dentro de uma determinada área geograficamente referenciada.

4.2. Utilização do SIG nos estudos de casos internacionais de ACV

As ferramentas de SIG e ACV são fundamentalmente diferentes e complementares. O SIG é utilizado para organizar e analisar dados espaciais, enquanto ACV levanta e analisa os sistemas produtivos sem operar informações espaciais (GEYER et al., 2010a).

Dada a especialidade do SIG em tratar das informações espaciais e a fraqueza do ACV na descrição dessas mesmas, a integração das duas ferramentas se mostra positiva para a conversão dos resultados da análise do inventário do ciclo de vida numa unidade comum para a representação quantificável de uma categoria de impacto ambiental, por meio do uso de Fatores de Caracterização (FC) regionais (NÚÑEZ et al., 2010), possibilitando a melhor descrição da realidade ambiental da região.

Tendo em vista que os modos tradicionais de ACV, feitos para plantações extensivas, não contemplam de maneira satisfatória os impactos sobre o meio ambiente, que a produtividade do solo varia de acordo com suas características biofísicas (tipo de solo e clima, posição geográfica, etc.) e que um aumento da produção, baseado nas previsões de aumento da demanda em nível nacional e internacional, resultará em um aumento não linear na área produtiva – pela necessidade de ocupar áreas com características menos favoráveis – a necessidade de complementar o instrumento de avaliação de ciclo de vida com informações espaço-temporais fica evidente.

Um modelo de SIG calcula mapas para cada cenário que, quando cruzados com as informações do ICV, oferecem informações sobre todos os processos com demandas levantadas na ICV, relacionadas à categoria de impacto levantada, no formato de *layers* (GEYER et al., 2010b).

Softwares de SIG podem facilmente operar dados relacionados a localidades específicas (e.g., tipos de solo e fatores climáticos) dentro de um determinado período temporal, além de

possibilitar a criação de novas informações correlacionadas, através da sobreposição dessas *layers* (e.g., potencial de produção, cruzando informações sobre as características edafoclimáticas da área e as necessidades bio-fisicoquímicas da cultura).

Assim, a potencialidade de fusão das duas ferramentas fica evidente e já foi confirmada por diversos autores por todo o mundo (GEYER, et al., (2010a), NÚÑEZ, et al., (2010), VOGTLANDER, et al., (2004), e YI et al., (2007)). A organização da revisão bibliográfica foi feita de acordo com as categorias de impacto utilizadas nos estudos, iniciando a análise quanto às abordagens para utilização de categorias de impacto, seguido dos escopos espaciais e temporais, dos indicadores utilizados nos fatores de caracterização, da motivação para utilização do SIG, e da estrutura metodológica para inserção do SIG nas ACV.

4.2.1. Categorias de impacto

Segundo a NBR ISO 14044 (2009), uma categoria de impacto deve representar as questões ambientais relevantes, de maneira abrangente, às quais os resultados da análise do ICV podem ser associados, levando em consideração os objetivos e o escopo da avaliação de ciclo de vida.

Alguns autores utilizam uma abordagem que objetiva a quantificação dos efeitos que os diferentes tipos de uso têm sobre as funções do solo, levando em consideração a área, a duração e a progressões das qualidades de uso. Essas metodologias podem ser exemplificadas por dois modelos de intervenção (Figura 3), o de ocupação do solo e de transformação do solo, recorrentes em alguns desses trabalhos.

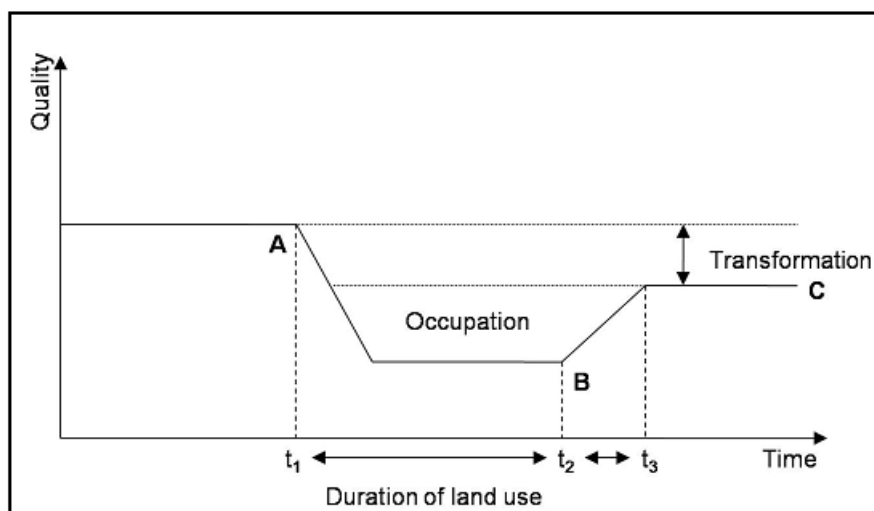


Figura 3 – Ocupação e Transformação do Solo
Fonte: (BECK et al., 2011)

Na figura, Beck et al. (2011), expressa as mudanças na qualidade relacionadas a um exemplo hipotético de uso do solo. O estado inicial “A” sofre uma mudança na sua qualidade devido a deterioração causada pela atividade hipotética, levando ao estado de qualidade “B”. Durante a utilização do solo, ou *ocupação*, considera-se que suas qualidades sejam mantidas constantes – pelo uso de insumos agrícolas –, porém, após o final da utilização dessa área, as qualidades da terra podem se recuperar somente até certo ponto, “C”, inferior a “A”. Essa diferença de qualidade entre “A” e “C” é chamada de *transformação*.

De maneira geral, os estudos consideram o solo como um bem limitado que necessita de maior cuidado em relação ao planejamento do uso. Além disso, é muito recorrente a afirmação da necessidade de se estabelecer uma abordagem para a avaliação dos impactos ambientais do uso do solo. (SAAD, et al. (2011) e BECK, et al. (2011)).

Há também outra linha de pesquisadores que trabalha com a potencialidade de uso do SIG nas ACVs que fundamentariam o planejamento do uso do solo levando em conta as emissões de gases de efeito estufa. Nessa linha, que leva a categoria de impacto ambiental de mudanças climáticas como carro chefe de sua avaliação, é considerado, entre as motivações, a forma de obtenção de energia elétrica por diferentes fontes, renováveis e não renováveis. A utilização do SIG nesta vertente permitiu a correlação de diversas características relevantes na forma de mapas, como na Figura 4, que é resultado de uma pesquisa na Espanha, onde a integração das ferramentas ofereceu informações e resultados suficientes para subsidiar a elaboração de uma estratégia de uso do solo para as culturas em análise que reduz anualmente o consumo de energia e as emissões de CO₂.

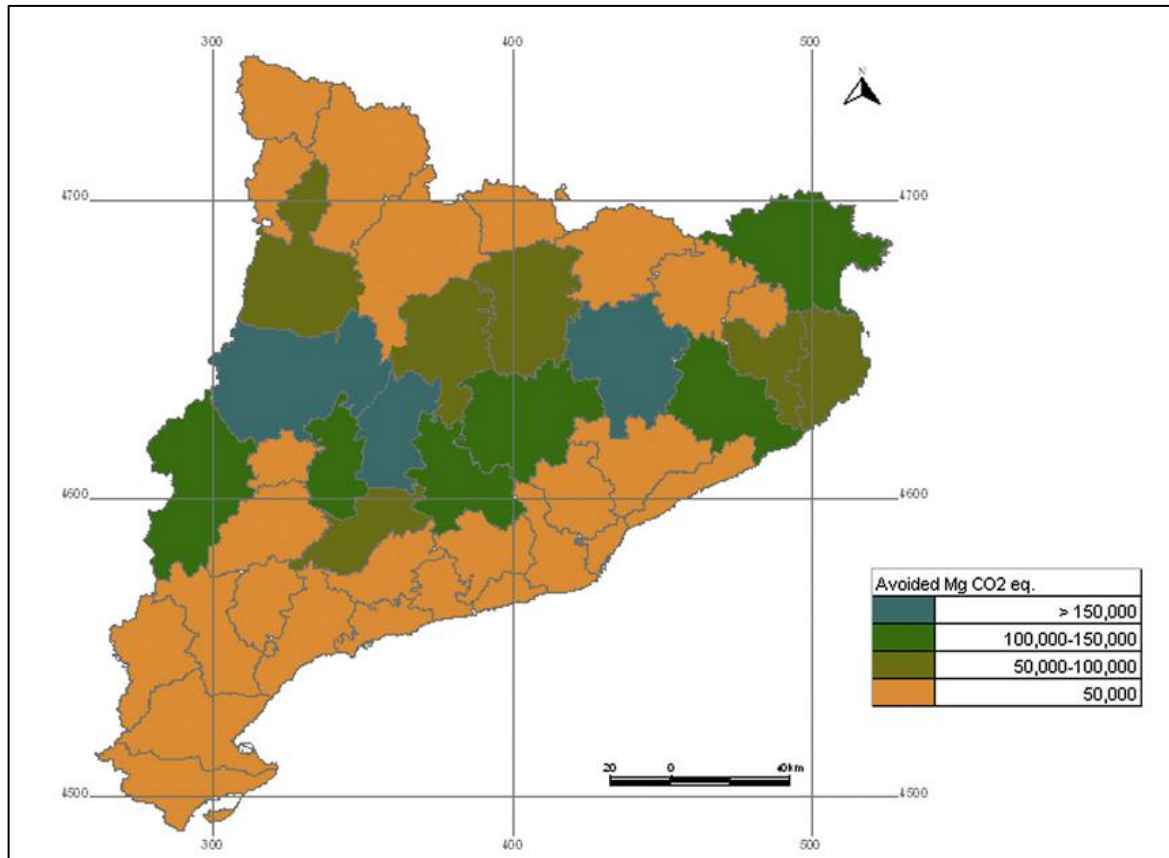


Figura 4 – Potencial de redução de CO₂ com uma estratégia de uso do solo
 Fonte: (GASOL et al., 2011)

Na linha que usa os gases de efeito estufa para discutir a utilização do SIG em ACV estão os trabalhos desenvolvidos por Dresen e Jandewerth (2012), Gasol et al., (2011) e Yi et al., (2007), entre outros.

Outra vertente comum que pôde ser identificada relaciona as mudanças causadas pelo uso do solo aos impactos sobre a biodiversidade, pois consideram necessário discutir os potenciais impactos sobre esse aspecto para o suporte à elaboração de políticas que se comprometem com a produção em larga escala. Além de que os modos tradicionais de ACV, feitos para plantações extensivas, não contemplam impactos sobre o meio ambiente de forma regionalizada. Um exemplo da utilização do SIG nessa vertente é bem ilustrado por Geyer et al. (2010b), que usa o conjunto de SIG com ACV para facilitar a visualização das entradas e saídas de fluxos não lineares do sistema, descrevendo os fluxos elementares de áreas de habitats em função do tipo de cultura e nível de produção (Figura 5). Outros autores revisados nessa linha são: Achten, Mathijs e Muys (2009), Mattsson, Cederberg, e Blix (2000), Lindeijer E. (2000) e Vogtlander et al. (2004).

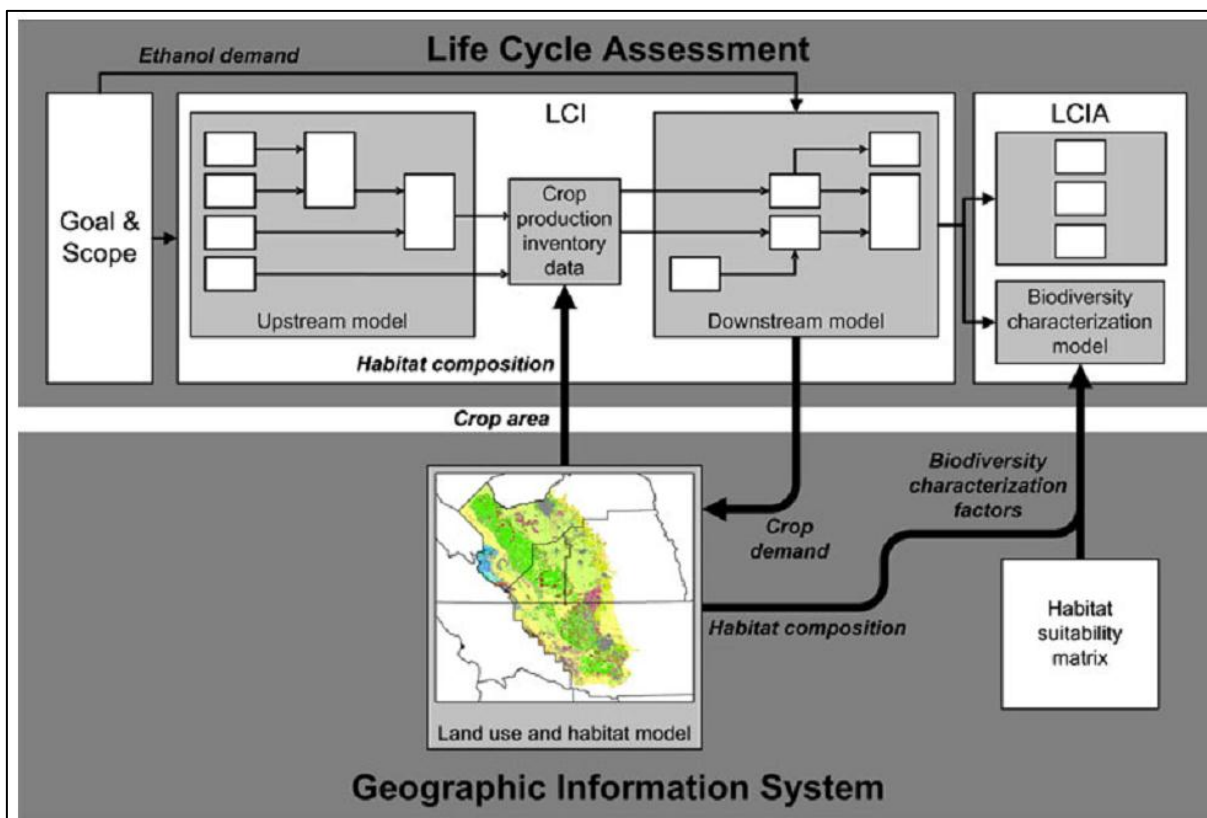


Figura 5 – Relacionamento entre ACV e SIG.

Fonte: (GEYER et al., 2010b)

Na figura 5, o modelo de ACV converte a demanda do etanol em demanda da cultura (matéria-prima) e é interpretado pelo modelo de SIG, retornando um cenário relacional entre o uso do solo e o habitat, baseado nas demandas da cultura. As informações geradas são utilizadas para compor o inventário e os FC para a AICV sobre a biodiversidade.

Além dessas abordagens relacionadas em grupos, vale notar a adotada por Bengtsson, et al. (1998), que orienta seu modelo de utilização de SIG em ACV sobre três subsistemas generalizados, o técnico, o ambiental e o social, sendo que o técnico e o ambiental são relacionados principalmente pelos fluxos de energia e matéria, que são as causas dos impactos ambientais, por sua vez, o social é o que “percebe e avalia” as mudanças nos outros dois.

Seguindo o raciocínio, há também a abordagem adotada por Núñez et al. (2010), que foca no desenvolvimento de uma metodologia que inclui o impacto de desertificação do solo derivado do uso agrícola em ACV, utilizando a ferramenta do SIG para inserir as variáveis relacionadas às propriedades biofísicas do solo como aridez, erosão, superexploração de aquíferos e risco de incêndio, na etapa de ICV, complementando a AICV.

Finalmente, o trabalho realizado por Mutel, Pfister e Hellweg (2012) realiza uma abordagem no sentido de caracterizar a distribuição espacial das categorias de impactos ambientais como consumo de recursos, saúde humana, eutrofização, acidificação e danos ao ecossistema, causados pela produção de energia elétrica norte americana.

4.2.2. Escopo espacial e temporal

Deve-se estabelecer o escopo de utilização espacial do SIG concomitantemente com os objetivos da ACV, pois há uma grande dificuldade em manter-se a fidelidade às características específicas da área, mantendo-as o mais próximo possível da realidade. Se o escopo for maior do que o necessário, há a possibilidade de serem utilizadas simplificações desnecessárias que causem o distanciamento da realidade e comprometam a qualidade do estudo. Porém, é muito comum a realimentação das etapas iniciais da ACV com informações e resultados das etapas finais, o que causa um reajuste e uma lapidação da estratégia inicial.

Num dos trabalhos estudados, por exemplo, num estudo sobre a utilização da energia gerada pela queima de biomassa da Alemanha, Dresen e Jandewerth (2012) utilizaram, como vários outros autores, as fronteiras nacionais como escopo do estudo. Porém, foram feitas subdivisões para permitir a análise individual e o processamento das informações características locais. Nesse caso, o autor seguiu critérios como a possibilidade de conexão das novas plantas de biogás à rede de distribuição, a distribuição de suprimentos em uma distância transportável e a necessidade de existência de áreas agrícolas dentro da área de influência da planta de biogás.

Em outro caso, Mutel, Pfister e Hellweg (2012) se baseiam no fundamento da primeira lei da geografia, *tudo está relacionado com todo o resto, mas coisas próximas se relacionam mais diretamente do que coisas distantes*, para estruturar uma metodologia de “minimização da autocorrelação espacial”, e a consideram como um critério cabível para determinar a escala espacial da AICV.

Já para Saad, et al. (2011), a utilização de unidades biogeográficas são mais apropriadas, pois fornecem informações relativas à integridade dos recursos naturais, sua manutenção e análises ambientais. Nesse trabalho, os autores utilizaram o conceito de *ecozonas* (unidades que descrevem os vastos tipos de ecossistemas, como fauna, flora e características geomorfológicas) e *ecoregiões* (fatores ecológicos distintos como paisagem, macro/mesoclima, e distribuição de plantas em escala regional). Com isso, foi feita a avaliação das mudanças da capacidade do solo de cumprir com suas funções ecológicas

(controle de erosão, regulação hídrica e purificação hídrica), organizadas em quatro indicadores de impactos: erodibilidade; recarga de recursos subterrâneos; filtração mecânica e físico-química.

Essa abordagem permitiu, em comparação entre os modelos de avaliação que utilizam ou não dados espaciais, a obtenção de resultados até quatro vezes mais significativos no caso dos fatores de caracterização regionais. Segundo os autores, isso demonstrou a importância de inserção dos parâmetros regionais em escalas adequadas nas ACV.

Foi muito recorrente a utilização do período de um ano para a avaliação dos impactos ambientais decorrentes do uso do solo. Para outras abordagens, o escopo temporal deve levar em conta tanto a completeza e a confiabilidade/profundidade dos dados que comporão o estudo, quanto os seus objetivos, prazos e orçamento.

4.2.3. Fatores de Caracterização, Indicadores e Aspectos Ambientais

Segundo a NBR ISO 14.044 (2009), o termo *fator de caracterização* consiste num fator, derivado do modelo de caracterização aplicado, que serve para converter o resultado alcançado na etapa de inventário de ciclo de vida para uma unidade comum igual a do indicador de categoria.

Aqueles que tomaram as metodologias exemplificadas pelos dois modelos de intervenção (ocupação e transformação do solo) fizeram uso de parâmetros pertencentes às metodologias da ecologia para compor os indicadores da qualidade do solo. São recorrentes os seguintes parâmetros propostos por Baitz (2002): *erodibilidade, capacidade de filtração mecânica, capacidade de filtração físico-química, capacidade de recarga de águas subterrâneas*

Segundo os autores, esses parâmetros possibilitam a consideração dos aspectos multifuncionais do solo, não se limitando à sua capacidade produtiva. Porém, nem todos os parâmetros foram unanimemente considerados nos estudos por razões como disponibilidade e acesso aos dados relacionados (Saad, et al. (2011), Beck, et al. (2011) e Núñez (2011)).

Em relação à abordagem relacionada às mudanças climáticas, que envolve a consideração dos gases de efeito estufa na avaliação dos impactos sobre o solo, fatores de caracterização como as cargas ambientais de CO_2 , NO_x , SO_x e *Material Particulado em Suspensão (SPM)*, convertidos em “ CO_2 equivalentes”, foram levados em consideração por Yi et al., (2007). Porém, os estudos elaborados por Gasol et al., (2011) o FC utilizado se limita a equalização relacionada aos pontos com *emissões de CO_2* .

Na linha de pensamento que leva a biodiversidade como foco da análise, podemos tomar o trabalho desenvolvido por Lindeijer E. (2000) que relaciona os aspectos ambientais que envolvem os impactos do uso da terra às características ambientais que oferecem suporte à vida, e garantem a manutenção da biodiversidade. Para isso ele compara os indicadores de *diversidade de plantas vasculares e produção líquida de biomassa livre*.

Um segundo trabalho, feito por Vogtlander, et al. (2004) para desenvolver um modelo de utilização de SIG na ACV se baseou, num primeiro momento, na classificação dos impactos sobre o uso da terra segundo os níveis de *transformação e a ocupação* da área, para definir o momento em que se inicia a avaliação dos impactos. E num segundo momento, na *riqueza de espécies* e na *raridade dos ecossistemas* e sua vegetação vascular, os indicadores que descrevem o “valor botânico” da terra são:

- *Riqueza de Espécies*: valor relativo baseado na quantidade de vegetação vascular presente numa determinada área, dividido pelo valor “normal” que deveria existir (numa escala maior) de vegetação vascular, em relação à mesma área;
- *Ecossistemas Raros*: segue o pressuposto de que, quando há muitas espécies, existe uma grande chance de existirem espécies valiosas também; e que cada ecossistema possui tipos específicos de plantas vasculares, oferecendo resultados num valor para “valor botânico do Km²”, Q.

Uma comparação entre os dois sistemas adotados por Vogtlander, et al. (2004) pode ser vista na Tabela 1, a seguir:

O sistema de "Riqueza de Espécies"	O sistemas de "ecossistemas raros"
Vantagens:	Desvantagens:
é o sistema de caracterização mais comum aplicado no mundo pelos usuários de ACV	não é muito difundido em ACV ou na AIA em geral
é relativamente simples e direto de aplicar, além de possuir grande disponibilidade de dados	sistema mais complexo e difícil de compreender, além de exigir mais informações sobre a flora
Desvantagens:	Vantagens:
todas as espécies contribuem para o resultado, incluindo as espécies causadoras do problema	só leva em consideração espécies relevantes para o ecossistema em estudo
ecossistemas com diversidade de espécies naturalmente baixa (dunas, altitudes, etc.) recebem valores muito baixos	usa a riqueza de espécies no ecossistema de maneira relativa, valorizando os ecossistemas com baixa biodiversidade natural
não considera diferenças entre a importância de espécies em extinção e outras mais comuns	leva em conta a raridade do ecossistema, e indiretamente a raridade das espécies presentes

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de Riqueza de Espécies e Ecossistemas Raros

Fonte: Vogtlander, et al. (2004).

No caso de Mattsson, Cederberg, e Blix (2000), que elaborou um estudo para a avaliação de impacto ambiental do uso da terra para a agricultura de três espécies de plantas oleaginosas em três localidades no mundo, apesar de também utilizar conceitos relacionados à *transformação e à ocupação do solo*, o aspecto da *biodiversidade* se mostrou mais presente na interpretação, assim sendo, os indicadores utilizados foram subdivididos em grupos e agregados como segue:

- *Indicadores estruturais*: Erosão do solo, efeitos hidrológicos, matéria orgânica, estrutura do solo, pH, acumulação de metais pesados, e concentrações de P e K;
- *Indicadores para o tipo de uso*:
 - *Biodiversidade*: acabar com a vegetação naturalmente diversa e utilizar o espaço para a produção monocultura de culturas agrícolas é uma violação contra o indicador, mas as consequências ambientais aparecem como fatores específicos locais, como o número de espécies afetadas pelo cultivo;
 - *Valor estético da paisagem*: a escolha da cultura e do tipo de sistema de cultivo afeta esse indicador. Pesquisas na Suécia mostram a preferência pelas paisagens compostas por diversas culturas.

A abordagem de Núñez, et al. (2010), onde se tratam dos impactos relacionados à desertificação do solo derivado do uso agrícola em ACV, utiliza, para caracterizar os impactos ambientais, os indicadores de *aridez, erodibilidade, superexploração de recursos hídricos, e risco de incêndio*.

Finalmente, no estudo proposto por Mutel, Pfister, e Hellweg (2012), para utilização de métodos de avaliação de impactos regionais para a ACV da produção de energia elétrica nos EUA, foram utilizados os indicadores de emissões atmosféricas para identificar os impactos dentro das categorias de impacto de *eutrofização e acidificação, consumo de recursos hídricos e saúde humana* pelas plantas de geração de energia, (Figura 7).

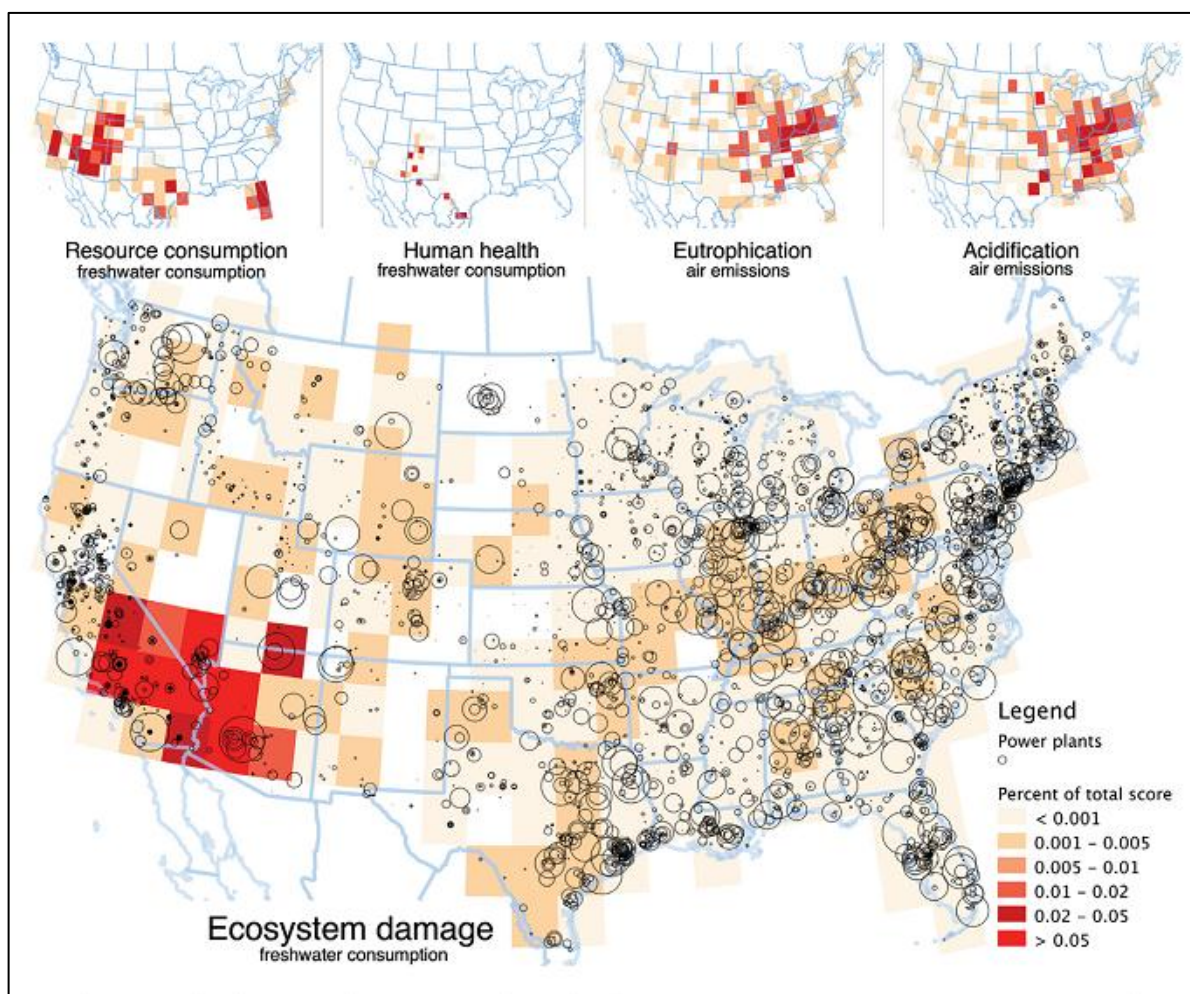


Figura 7 – Impactos regionais da rede de produção total anual dos EUA para as cinco categorias de impacto concomitantemente
Fonte: (Mutel, Pfister, e Hellweg, 2012).

A escolha dos indicadores de impactos ambientais foi feita por todos os autores de maneira a refletir as mudanças nos aspectos ambientais, e, quando se tratando do uso do solo, as informações se relacionam com o consumo dos recursos tanto quanto com a pressão que o sistema tem sobre os mesmos.

Para facilitar a visualização das diferenças entre os aspectos ambientais utilizados diante de cada abordagem de utilização da fusão das ferramentas de SIG e ACV, foi elaborada a Tabela 2, que os relaciona com seus respectivos temas abordados.

Aspectos Ambientais Utilizados para Caracterizar os Impactos Ambientais			
Abordagem	Autores	Tema do Trabalho	Aspectos Ambientais
Ocupação e Transformação do Solo	(Saad, et al, 2011)	Envolve 15 ecozonas e 193 ecoregiões no Canadá, e se propõe a identificar as funções ecológicas do solo e melhorar o desenvolvimento de fatores de caracterização regionais.	Erodibilidade; Recarga de recursos subterrâneos; Filtração mecânica; e Capacidade de filtração físico-química
	(Beck, et al, 2011)	Desenvolvimento da ferramenta LANCA, que objetiva a quantificação dos efeitos que os diferentes tipos de uso do solo têm sobre as funções do solo, visando à aplicação no ACV.	Erodibilidade; Recarga de recursos subterrâneos; Filtração mecânica; Capacidade de filtração físico-química; e Produção Biótica
Gases de Efeito Estufa	(Yi, Itsubo, Inaba, & Matsumoto, 2007)	Desenvolvimento de um abordagem para ACV focada em regiões, que considera a estrutura e as características ambientais das regiões que são afetadas direta, e indiretamente, pela atividade executada.	Emissões de CO ₂ , NO _x , SO _x e Material Particulado em Suspensão (SPM)
	(Gasol, Gabarrell, Rigola, González-García, & Rieradevall, 2011)	Elaboração de uma metodologia integrada para determinar áreas apropriadas para o cultivo de duas espécies de plantas (Brassica spp. e Populus spp.) cultivadas monoculturalmente, levando em conta as emissões de CO ₂ durante as etapas de produção de biomassa	Emissões de CO ₂
	(Dresen & Jandewerth, 2012)	Investigação para a integração do ICV diretamente no SIG, para analisar a produção, bem como as relacionadas emissões e custos, da produção de biogás.	Emissões de CH ₄
Biodiversidade	(Lindeijer, 2000)	Relaciona os aspectos ambientais que envolvem os impactos do uso da terra às características ambientais que oferecem suporte à vida, e garantem a manutenção da biodiversidade	Diversidade de plantas vasculares e produção líquida de biomassa livre
	(Vogtlander, et al, 2004)	Desenvolver um modelo de utilização de SIG na ACV baseado na riqueza de espécies e outro na base de raridade dos ecossistemas e suas vegetação vascular	“Indicador de riqueza de espécies” = proporção de vegetação vascular existente em relação a natural do local; e “Valor botânico do Km ² ” (Q) = presença de plantas vasculares específicas do local
	(Geyer, et al, 2010)	Variações da biodiversidade em função da produtividade do solo e das qualidades locais	Nível de preservação, riqueza de espécies, abundância de espécies e uniformidade de espécies
	(Achten, Mathijs, & Muys, 2009)	Desenvolvimento de uma metodologia que identifique os impactos de “end-points” e “mid-points”	Número de espécies de plantas vasculares, fertilidade do solo, produção de biomassa, total de biomassa superior, estrutura do solo, estrutura vegetal, e balanço hídrico local
	(Mattsson, Cederberg, & Blix, 2000)	Avaliação de impacto ambiental do uso da terra para a agricultura de três espécies de plantas oleaginosas em três localidades no mundo	Estruturais: Erosão do solo, efeitos hidrológicos, matéria orgânica, estrutura do solo, pH, acumulação de metais pesados, e concentrações de P e K; e para o tipo de uso: a) Biodiversidade em número de espécies afetadas pelo cultivo; e b) Valor estético da paisagem na escolha da cultura e do tipo de sistema de cultivo
Desertificação	(Núñez, et al, 2010)	Incluir os impactos relacionados à desertificação do solo derivado do uso agrícola em ACV	Aridez, erodibilidade, superexploração de recursos hídricos, e risco de incêndio
Eutrofização e Acidificação	(Mutel, Pfister, & Hellweg, 2012)	Utilização de métodos de avaliação de impactos regionais para a ACV da produção de energia elétrica nos EUA	Emissões atmosféricas causadores de eutrofização e acidificação, e consumo de recursos hídricos, pelas plantas de geração de energia

Tabela 2– Síntese dos aspectos ambientais utilizados na bibliografia

4.2.4. Utilização do SIG nas ACV

Seguindo a mesma ordem de raciocínio, os modelos que utilizaram os conceitos de *transformação* e *ocupação* estruturaram a análise de impacto ambiental do ciclo de vida, utilizando a ferramenta de SIG principalmente para verificar a variabilidade espacial dos impactos do uso da terra.

No caso de Saad et al., (2011), foram estudadas duas formas de variação: tipos de utilização do solo (compara a magnitude do impacto sobre o solo proveniente de diferentes formas de utilização, dentro da mesma unidade ecológica) e sistemas de classificação ecológica (considera o impacto induzido por uma única atividade em diferentes unidades ecológicas, respeitando suas propriedades e vulnerabilidades). Além disso, o SIG permitiu a visualização em mapas das diferenças, na gravidade do impacto ambiental, entre a utilização de fatores de caracterização (FC) genéricos e FC que levam em consideração as especificidades do local.

Já com Beck et al., (2011), por se tratar da elaboração de um método para o cálculo dos indicadores do uso do solo baseado nas funções ecossistêmicas, utilizando a metodologia proposta por Baitz (2002) misturada com a estrutura de ACV proposta por Milà i Canals et al., (2007), com adaptações para alcançar os objetivos da pesquisa, o SIG é visto como uma segunda ferramenta com potencial para utilização na LANCA (*Land Use Indicator Value Calculation in Life Cycle Assessment*). Segundo os autores, utilizando as informações de SIG relacionadas às características regionais na construção do banco de dados da LANCA podem-se produzir dados confiáveis, em escala geográfica adequadas, além de permitir a criação de valores característicos médios para qualquer área de interesse e utilização na ACV.

As pesquisas que tomaram os impactos ambientais relacionados às emissões de **gases de efeito estufa** variaram a forma de utilização do SIG em seus estudos. Por exemplo, os pesquisadores Yi et al., (2007), elaborando uma metodologia de ACV focada em regiões (*Life Cycle Region-specific Assessment Method - LCRAM*), consideram que a estrutura e as características ambientais das regiões são afetadas direta, e indiretamente, pela atividade executada em uma dada região, em relação às emissões atmosféricas. Assim, utilizaram o SIG para mapear condições regionais estruturais (produção, consumo e fluxos inter-regionais) e ambientais (localização geográfica, clima, densidade populacional, etc.), de maneira a refletir fielmente as características regionais para impactos diretos e indiretos de cada atividade.

Por sua vez, Gasol et al., (2011) utilizaram o SIG para possibilitar a criação de uma metodologia capaz de oferecer informações suficientes para determinar uma estratégia de

plantio agrícola para a produção de energia, que reduz o consumo desnecessário e as emissões de CO₂. De acordo com o estudo, a integração das ferramentas ofereceu informações e resultados suficientes para subsidiar a elaboração de uma estratégia de uso do solo para as culturas em análise que reduz anualmente o consumo de energia e as emissões de CO₂. Na pesquisa, um software de SIG foi base para a compreensão das questões relacionadas à bioenergia (demanda, fornecimento de biomassa, distância de transporte), de maneira espacializada. Os autores fizeram uso da *plotagem* de diferentes *layers*, ranqueados, com diversas qualidades do solo e clima, mais ou menos favoráveis à produção das culturas (declividade do terreno, orientação em relação ao sol, incidência solar, precipitação, risco de congelamento, tipo de clima), com essas e outras informações, os autores fizeram estimativas de localidade para verificar as melhores possibilidades de implantação de indústrias de biomassa de acordo com o mercado consumidor, resultando em mapas temáticos e tabelas que discriminam e descrevem as terras com maior potencial produtor de cada cultura, bem como mapas com as estimativas de mudanças nas emissões de CO₂ de cada região.

Na pesquisa de Dresen e Jandewerth (2012), relacionada ao melhor planejamento da distribuição das plantas de geração de biogás na Alemanha, o SIG permitiu, não apenas a avaliação da localização de plantas de produção de biogás, mas também a determinação dos potenciais de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), o potencial de geração de biogás e os investimentos necessários para regiões inteiras. Nessa pesquisa, o banco de dados fundamental contém inventários que incluem os processos de entrada e saída, assim esses inventários podem ser entendidos como uma lista de recursos consumidos e emitidos associados ao sistema. A abordagem adotada é de relacionar os recursos consumidos dentro de um contexto espacial conectado ao banco de dados da agricultura para relacionar com as necessidades de suprimento e fatores de emissões, contidas nas informações da ACV e do SIG. Com isso, os autores não apenas puderam demonstrar que os parâmetros locais têm efeitos sobre os balanços resultantes, mas até mesmo os elementos da cadeia de processos, independentemente da localização, receberam uma referência espacial com a aplicação da análise da área de influência.

As pesquisas que utilizaram a biodiversidade para balizar as ACV se beneficiaram das qualidades do SIG de operação de dados relacionados às localidades específicas (como tipos de solos, clima, diversidade de espécies de plantas vasculares, geomorfologia, etc.) para a criação de novas informações correlacionadas com os dados do ICV (e.g. potencial de produção, área total de cada tipologia de uso, etc.). O uso conjunto de ACV e SIG facilita a

visualização das entradas e saídas de fluxos não lineares no sistema, e possibilita a análise dos impactos sobre a biodiversidade local. De maneira geral, modelos de SIG calculam a quantidade e a localização de uma cultura, com isso, são gerados mapas para cada cenário de cultivo que, quando cruzados com as informações do ICV, oferecem informações sobre todos os processos com demandas específicas das características do solo.

Nessa linha, por exemplo, os autores Geyer, et al. (2010a), utilizaram o SIG para gerar, para cada tipo de cultura, uma lista de parcelas no terreno que, se utilizadas para o plantio, alcançariam a meta de produção estabelecida anteriormente. Para tanto, os pesquisadores se basearam principalmente em quatro passos: o mapeamento da safra potencial de cada cultura; o levantamento de dados de venda específicos para a região; a elaboração de um algoritmo que ranqueasse as parcelas de solo segundo sua capacidade produtiva e retorno financeiro por hectare; e a inserção dos fluxos médios regionais de insumos agrícolas necessários em cada área. Esses, cruzados com os dados do ICV sobre os tipos de habitats e as características de biodiversidade das áreas estudadas, produzido com uma metodologia de SIG para modelagem do uso do solo, constituíram uma fonte consistente para se conduzir avaliações dos impactos sobre a biodiversidade do cultivo de monoculturas para a produção de etanol, segundo os autores.

Já com Núñez, et al. (2010), num estudo que foca no desenvolvimento de uma metodologia que inclua o impacto de desertificação do solo derivado do uso agrícola em ACV, são sugeridos fatores de caracterização (FC), a serem incluídas no ICV, para possibilitar a identificação de cenários de impactos na etapa de AICV. Esses FC são obtidos por meio da utilização do SIG, que cruza as informações sobre aridez, erosão, superexploração de aquíferos e risco de incêndio (cada qual com sua escala de ponderação), com a localização geográfica, e as distribuições espaço-temporais da atividade. Os FC foram calculados utilizando SIG por meio da elaboração de um *layer* para cada variável e das seguintes sobreposições, além do uso da coleção de mapas e dos dados estatísticos de várias fontes de informação. Obtendo informações estatísticas de cada variável sobre cada ecoregião. Na pesquisa, as informações adquiridas com o SIG foram diretamente aplicáveis à ACV, permitindo o cálculo dos fatores de caracterização (FC) na fase de AICV, e o embasamento dos processos decisórios da gestão territorial.

Vale citar a forma como Bengtsson, et al. (1998) utilizaram o SIG sobre o modelo orientado nos subsistemas técnico, ambiental e social. Para os autores, a relação entre sistemas técnicos

e geografia, normalmente incluem processos que podem ser referenciados geograficamente, e que são conectados por vias de sistemas de transporte, como de bens (rodovias, mar, ar) ou energia (tubulações, redes elétricas). Já para os sistemas ambientais, é possível modelar a dispersão dos vários agentes impactantes, possibilitando a inclusão da sensibilidade ambiental de ecossistemas e regiões quando for relevante. Em relação aos sistemas sociais, no estudo de ACV, sistemas sociais relevantes já são previamente definidos (agricultores, trabalhadores, empreendedores, consumidores, etc.). No estudo, o sistema técnico da ACV é agregado dos subsistemas descritos, assim as mudanças ambientais causadas por esse sistema são calculadas utilizando-se os dados geográficos relacionados com ambos os sistemas técnico e ambiental. Finalmente, a AICV é analisada relacionando cada impacto ambiental, em cada localização geográfica, com as informações pertencentes a cada local, região ou área..

Por último, o estudo realizado por Mutel, Pfister, e Hellweg (2012) em que foi criado um mapa que relaciona a localização das plantas de geração de energia com a área de abrangência de impactos ambientais como: consumo de água, eutrofização, acidificação, etc., faz uso do SIG na ACV da seguinte forma:

- O SIG estrutura suas informações basicamente sob a forma de pontos, linhas e polígonos. Todas as três formas geométricas podem estar presentes nos ICV regionais. Por exemplo, um ponto pode representar uma fábrica, uma linha representaria uma rota de transporte, e um polígono seria a área de atividade (fazenda, cidade, etc.);
- Métodos de avaliação de impactos regionais têm, idealmente, toda sua área de interesse coberta por polígonos, cada qual com um Fator de Caracterização (FC) para cada fluxo ambiental, e os FCs representam então, os danos causados em uma dada localização.

Para facilitar o entendimento e a comparação das informações discutidas nesse capítulo, foi feita a Tabela 4 comparativa que pode ser visualizada na sequência:

Síntese da utilização do SIG em ACV			
Autores	Abordagem	Motivação	Utilização do SIG na ACV
(Saad, et al, 2011)	Ocupação e Transformação do Solo	Verificação da variabilidade espacial dos impactos do uso da terra	Visualização em mapas das diferenças, na gravidade do impacto ambiental, entre a utilização de FC genéricos e FC com as especificidades locais
(Beck, et al, 2011)		Melhoria na base de dados estruturas da ferramenta LANCA, aumentando a precisão e confiabilidade	Produzir dados confiáveis, em escala geográfica adequada, além de permitir a criação de valores característicos médios, para qualquer área de interesse, para utilização na ACV
(Yi, et al, 2007)	Gases de Efeito Estufa	Consideram que a estrutura e as características ambientais das regiões são afetadas direta, e indiretamente, pela atividade executada em uma dada região, em relação às emissões atmosféricas	Mapeamento das condições regionais estruturais (produção, consumo e fluxos inter-regionais) e ambientais (localização geográfica, clima, densidade populacional, etc.), refletindo as características regionais para impactos diretos e indiretos das atividades
(Gasol, et al, 2011)		Possibilitar a criação de uma metodologia capaz de oferecer informações suficientes para determinar uma estratégia de plantio agrícola para a produção de energia, que reduz o consumo desnecessário e as emissões de CO ₂	Compreensão das questões relacionadas à bioenergia de maneira espacializada; estimativas de localidade de acordo com o mercado consumidor; mapas temáticos e tabelas sobre as terras com maior potencial produtor de cada cultura, e com estimativas de mudanças nas emissões regionais de CO ₂
(Dresen & Jandewerth, 2012)		Relacionar os recursos consumidos dentro de um contexto espacial conectado ao banco de dados da agricultura para relacionar com as necessidades de suprimento e fatores de emissões, contidas nas informações da ACV e do SIG	Avaliação da localização de plantas de produção de biogás, a determinação dos potenciais de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), o potencial de geração de biogás e os investimentos regionais necessários
(Geyer, et al, 2010)	Biodiversidade	Gerar, para cada tipo de cultura, uma lista de parcelas no terreno que, se utilizadas para o plantio, alcançariam a meta de produção estabelecida anteriormente	O cruzamento dos dados sobre safra, características regionais, produtividade do solo e especificidades dos habitats, possibilitaram a avaliação dos impactos sobre a biodiversidade do cultivo de monoculturas para a produção de etanol
(Bengtsson, Carlson, Molander, & Steen, 1998)	Sistemas técnico, ambiental e social	Possibilidade de georeferenciar as relações entre os sistemas técnicos, ambiental e social, para calcular os impactos ambientais causados pelo primeiro	AICV é analisada relacionando cada mudança ambiental, em cada localização geográfica, com as informações pertencentes a cada local, região ou área com essa mudança ambiental
(Núñez, et al, 2010)	Desertificação	Elaboração de FC, para incluir na AICV e possibilitar a produção de cenários de impactos de desertificação	Cruzamento das informações sobre aridez, erosão, superexploração de aquíferos e risco de incêndio (cada qual com sua escala de ponderação), com a localização geográfica, e as distribuições espaço-temporais da atividade, e plotagem pela sobreposição de <i>layers</i>
(Mutel, Pfister, & Hellweg, 2012)	Eutrofização e Acidificação	Criação de um mapa que relaciona a localização das plantas de geração de energia com a área de abrangência de impactos ambientais como: consumo de água, eutrofização, acidificação, etc.	Avaliação de impactos regionais têm, idealmente, toda sua área de interesse coberta por polígonos, cada qual com um Fator de Caracterização (FC) para cada fluxo ambiental, e os FCs representam então, os danos causados em uma dada localização

Tabela 3- Síntese da utilização do SIG em ACV

4.2.5. Estrutura metodológica para inserção do SIG em ACV

Buscando respeitar as demandas em relação às qualidades das ACV normatizadas pela ABNT e levando em consideração as metodologias utilizadas internacionalmente, principalmente pelos autores Geyer et al., (2010a), Dresen e Jandewerth (2012) e Bengtsson et al., (1998), pela clareza na apresentação e qualidade das metodologias, um esboço da estrutura básica para da utilização do SIG nas ACV pôde ser traçado como visto na Figura 9, a seguir:

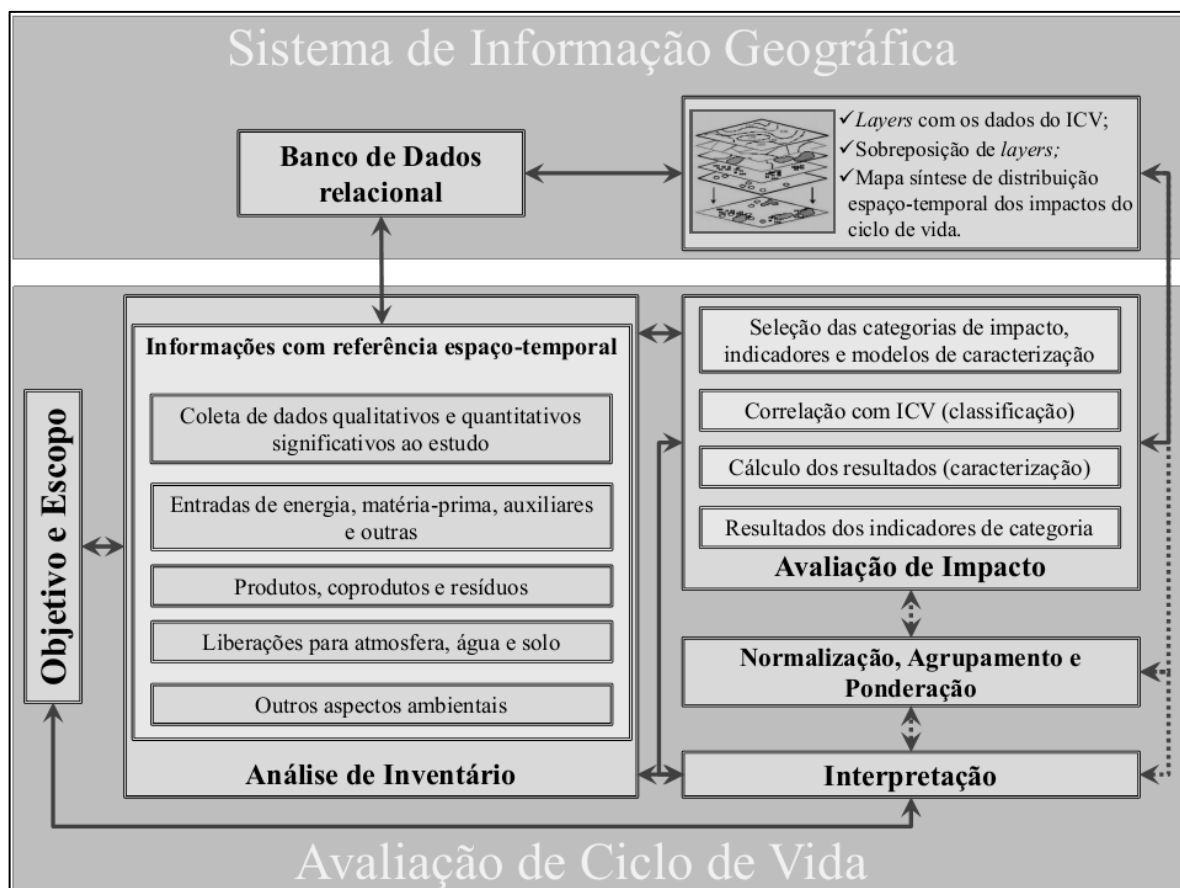


Figura 8- Estrutura metodológica geral para utilização do SIG em ACV

Após a definição cautelosa do objetivo e do escopo da análise, as informações coletadas para o inventário do ciclo de vida, que serão utilizadas na análise espacializada de impactos ambientais, devem estar relacionadas a uma localização geográfica e a um período de tempo, possibilitando a criação de um banco de dados de ACV que se relaciona com o SIG, e podendo ser expresso por meio de *layers* com os parâmetros de entrada e saída do sistema.

Na etapa de AICV, tendo definidas as categorias de impactos, os indicadores e o modelo de caracterização, enriquecidos pela interpretação dos dados georeferenciados levantados no ICV e expressos pelos *layers*, serão inseridos os resultados da análise de ICV nas categorias de impactos, possibilitando a identificação das *layers* que têm impactos espaçodependentes, e a

criação de um cenário regional de impactos. Na sequência, através da sobreposição dos *layers*, fica possível analisar os impactos regionais dos processos envolvidos dentro do escopo estipulado. Mapas com a síntese do mecanismo ambiental adotado, e produzidos a partir da sobreposição dos *layers*, auxiliarão na interpretação final da avaliação de impactos do ciclo de vida, pois facilitam a visualização da distribuição espacial dos impactos ambientais.

Somando a isso, ainda é possível utilizar o SIG para auxiliar nas etapas não mandatórias, mas sugeridas pela (ABNT, 2009), de *normalização* (elaborando cenários variados em relação a uma referência), *agrupamento* (criando uma relação ordenada das *layers*) e *ponderação* (determinando numericamente a influência que cada categoria de impacto terá num mapa síntese).

4.3. Avaliação de Ciclo de Vida e o Álcool Combustível

Segundo Núñez (2011), existem significativas diferenças entre a ACV feita para avaliação de sistemas industriais e a ACV para sistemas agrícolas. Dentre elas, destaca-se a não especificidade locacional das ACV industriais, enquanto a produção agrícola depende fundamentalmente das condições espaciais e temporais, como qualidade do solo, clima, disponibilidade hídrica e as variações na produtividade de acordo com as práticas de cultivo e qualidades edafoclimáticas.

Além disso, os sistemas agrícolas têm funções múltiplas e relacionadas. Por exemplo, numa plantação de culturas alimentícias, além da produção de alimentos, a área serve como suporte para o desenvolvimento da biodiversidade, e também possui valores estéticos de paisagem e culturais (NÚÑEZ, 2011).

Dentre essas pesquisas, destaca-se um estudo de ACV (baseado nas normas ISO 14040 e em outros métodos científicos) para avaliar o ciclo de vida do etanol etílico hidratado (produto combustível automotivo oriundo de processos da cana-de-açúcar) no contexto paulista, realizado numa tese de doutorado por Ometto (2005).

Dentre as motivações do autor Ometto (2005) para a realização deste trabalho, estão:

- O álcool combustível é um combustível, de fonte renovável, alternativo aos derivados de petróleo;
- O estado de São Paulo é o maior produtor nacional de álcool, com características de solo e clima propícios à produção de cana-de-açúcar, além de possuir a tecnologia e o *know how* de produção;

- O álcool combustível tem um alto potencial para ser ambientalmente adequado;
- Há a necessidade de indicação de melhorias de suas atividades de modo integrado e não pontual.

Para a elaboração da ACV, *do berço ao túmulo*, do etanol etílico hidratado, o mesmo autor, incluiu como etapas o “preparo solo” e o cultivo agrícola da cana-de-açúcar, o “transporte” interno, o “processo industrial”, a “reutilização” dos resíduos e dos efluentes industriais, a “geração de vapor” e de energia elétrica, a “armazenagem e distribuição”, assim como a “utilização” do álcool etílico hidratado combustível (Ometto, 2005).

Vale o aprofundamento sobre a primeira etapa mandatória da AICV, relacionada aos conceitos de indicadores de categoria, pois essa é uma etapa fundamental para a compreensão da metodologia de inserção das variáveis espaço-temporais na ACV. Assim sendo, cada “categoria de impacto” se relaciona com seu próprio “mecanismo ambiental”, que, por sua vez, possui um “modelo de caracterização” criado para gerar “fatores de caracterização”. Um exemplo dessa relação pode ser visto na Figura 9.

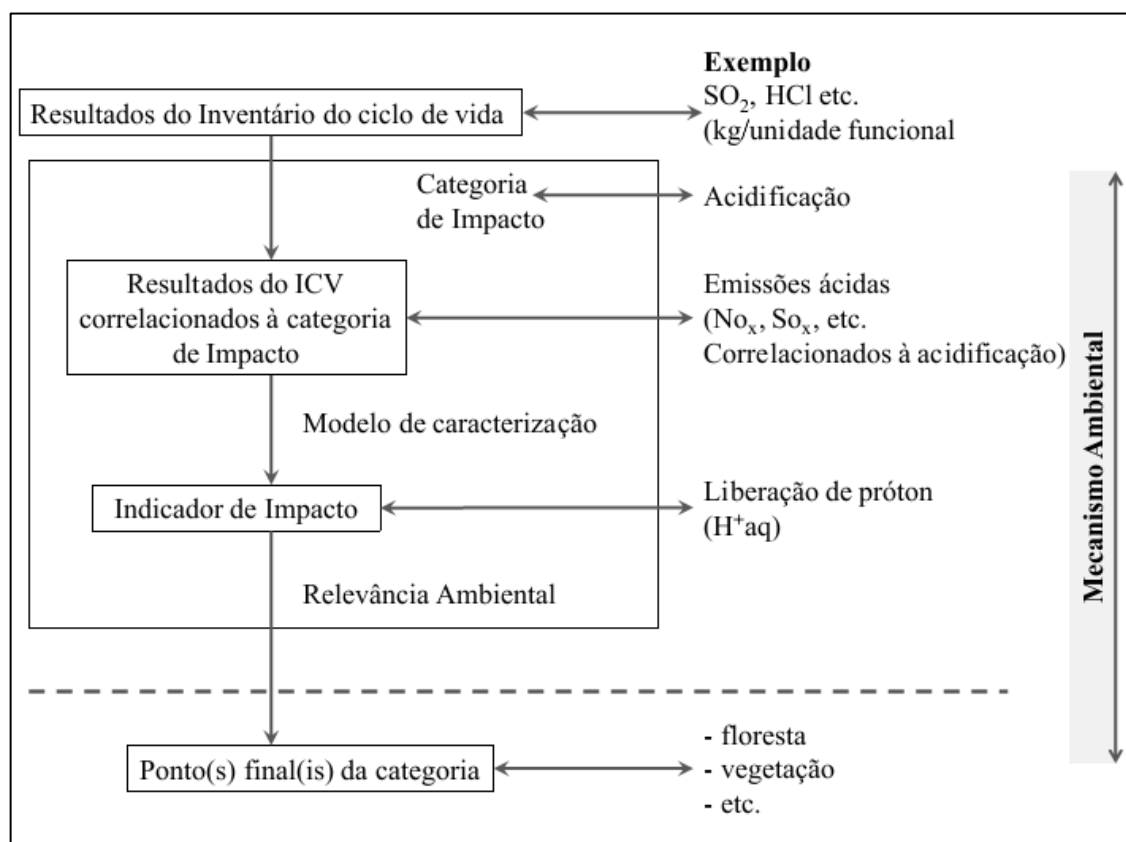


Figura 9– Relações entre os resultados do ICV, os mecanismos ambientais, as categorias de impacto, os modelos de caracterização e os indicadores de categoria.

Fonte: (ABNT, NBR ISO 14042, 2004).

4.3.1. Impactos ambientais decorrentes da produção de álcool combustível

A cultura de cana se expandiu no Brasil durante o ciclo do Proálcool, e se distribuiu principalmente por áreas onde já se fazia o cultivo agrícola de alguma outra cultura anual, ou onde se criava gado. No entanto, o novo impulso pelo aumento da produção agrícola do setor trás a busca por novas áreas para cultivo, podendo provocar tanto a ocupação direta de novas áreas naturais quanto o deslocamento de parte da pecuária e de produções agrícolas para regiões de fronteira agrícola, com consequente destruição de habitat e impactos relevantes sobre o meio ambiente (Rodrigues & Ortiz, 2006).

A cana de açúcar ocupa atualmente 5.071.205 hectares de área plantada território paulista, e, com um rendimento médio de 58.543 kg/hectare, se caracteriza como uma das principais fontes de renda agrícola de São Paulo e do Brasil. Em 2010, a produção do setor chegou à 426.572.099 toneladas de cana de açúcar (IBGE, 2010), fornecendo matéria-prima para 170 usinas instaladas e distribuídas por todo o estado de São Paulo (UNICA, 2008).

A produção projetada para 2019 é de 58,8 bilhões de litros, mais que o dobro da registrada em 2008. O consumo interno está projetado em 50 bilhões de litros e as exportações em 8,8 bilhões de litros (MAPA, 2012).

A fase agrícola da produção do etanol combustível traz consigo os seguintes principais impactos ambientais (Andrade & Diniz, 2007):

- Redução da biodiversidade, causada pelo desmatamento e pela implantação de monocultura;
- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas e do solo, por meio da prática excessiva de adubação química, corretivos minerais e aplicação de herbicidas e defensivos agrícolas;
- Compactação do solo, pelo tráfego de máquinas pesadas, durante o plantio, tratos culturais e colheita;
- Assoreamento de corpos d'água, devido à erosão do solo em áreas de reforma;
- Emissão de fuligem e gases de efeito estufa, na queima da palha ao ar livre durante o período de colheita;
- Danos à flora e fauna, causados por incêndios descontrolados;
- Consumo intenso de óleo diesel, nas etapas de plantio, colheita e transporte;

- Concentração de terras, rendas e condições subumanas do trabalho do cortador de cana.

Por sua vez, o processo industrial de obtenção do álcool hidratado envolve, nas usinas, uso intenso de água, energia térmica e eletromecânica, cuja fonte principal provém da queima, nas caldeiras, do próprio bagaço de cana de açúcar (ANDRADE e DINIZ, 2007).

Portanto, o processo de obtenção de álcool combustível oriundo da cana-de-açúcar, mesmo sendo a melhor opção para a produção sustentável de biocombustíveis em larga escala (UNICA, 2008), deve ser tratado com bastante relevância, não apenas em relação à superfície de terra utilizada, mas também na qualidade e sustentabilidade do uso.

Na Tabela 4 a seguir podem-se situar possíveis impactos ambientais decorrentes de cada uma das etapas de produção do etanol, incluindo as etapas agrícola, industrial, de distribuição e utilização.

Aspectos e Impactos das Etapas do Ciclo de Vida do Etanol				
Etapa	Descrição	Operações relacionadas	Aspectos ambientais relacionados	Impactos ambientais relacionados
Extração da matéria-prima	Atividades agrícolas do cultivo de cana-de-açúcar	utilização de maquinário pesado para limpeza física e preparo físico-químico-biológico do terreno	alterações no relevo e constituição do solo, e fertilização química	erosão do solo, poluição do ar, poluição de águas, diminuição da biodiversidade, eutrofização e acidificação
		plantio e aplicação de herbicidas	aplicação de herbicidas	diminuição da biodiversidade
		colheita (queima da palhada e transporte)	emissão de gases tóxicos (CO ₂ , NO _x e SO _x) e liberação de materiais particulados, HPAs e outras substâncias orgânicas	poluição do ar e erosão do solo
Produção	Processamento da cana-de-açúcar em etanol, geração de energia elétrica e vapor	lavagem da cana	alto consumo de água, e geração de efluente líquido	contaminação da água
		desfibração por turbinas a vapor (queima do bagaço, motores elétricos ou hidráulicos)	consumo elevado de energia elétrica, emissão de gases e material particulado	poluição do ar
		tratamento do caldo	geração de torta e lodo com alta carga orgânica	contaminação do solo e água, superficiais e subterrâneas
		fermentação, destilação e retificação	produção de vapor	consumo de energia
Reciclagem	Reutilização de subprodutos	fertirrigação da vinhaça e torta de filtro nos campos de cultivo	disposição de material com alta carga mineral e orgânica no ambiente	salinização do solo e contaminação de águas superficiais e subterrâneas
Armazenagem	Tanques de álcool	armazenamento em tanques de concreto	N/A	N/A
Distribuição	Transporte do etanol até os postos revendedores	transporte por meio de caminhões movidos a diesel	emissão de gases tóxicos provenientes da queima de combustível fóssil	poluição do ar
Utilização	Combustão	combustão em veículos automotores	emissão de gases pela queima do etanol	poluição do ar

Tabela 4- Aspectos e Impactos das Etapas do Ciclo de Vida do Etanol

Fontes: adaptados de Ometto (2005) e Andrade e Diniz (2007)

5. Discussão

Como tentativa de contextualização para o modelo de produção de cana-de-açúcar para etanol no estado de São Paulo, e resgatando uma das grandes questões levantadas por Mattsson, Cederberg, e Blix (2000), se discuti a necessidade de a consideração, ou não, da transformação a partir do ambiente natural para uma área de produção agrícola. Pensando no fato de que a ACV trata principalmente dos impactos causados por produtos, o ponto de partida para o estudo no contexto paulista poderia ser o estado imediatamente anterior ao cultivo. Se tratado desta maneira, em princípio, a única degradação atribuída àquela cultura será a causada durante o período de plantio. Porém, se a área cultivada está em processo de expansão, a vegetação natural da região será degradada, tornando relevante a inclusão da transformação da nova área na ACV.

5.1. Categorias e impactos ambientais na produção do etanol combustível

Tendo em vista os vários impactos ambientais que todo o processo de produção do etanol causa, as aplicabilidades do SIG na ACV desse processo poderiam permear tanto as fases agrícola e industrial, quanto às de armazenamento, transporte e consumo do produto. É possível eleger indicadores de impactos georeferenciados semelhantes aos vistos nos trabalhos internacionais estudados, desde que alcançados pelo uso dos fatores de caracterização em diversos *layers* produzidos em SIG, em termos de ocupação e transformação do solo, emissão de gases estufa, superexploração e eutrofização de recursos hídricos, biodiversidade, desertificação, entre outros, para cada uma dessas fases no processo de obtenção do etanol. Posteriormente, deverá ser feita a sobreposição dessas *layers* de forma a permitir visualização regionalizada dos impactos do processo produtivo, industrial, de transporte e consumo do etanol, possibilitando uma noção mais totalitária da influência ambiental da produção do etanol combustível. A Tabela 5 mostra uma visão simplificada das possibilidades de utilização das categorias de impacto ambiental nas etapas de produção do etanol, vale ressaltar que a utilização de uma única categoria de impacto não abrangerá todos os impactos ambientais relacionados à produção do etanol, porém, se os objetivos, o escopo e o levantamento de dados no ICV forem devidamente cumpridos, respeitando a fidedignidade dos dados, a AICV terá uma confiabilidade razoável e servirá ao seu propósito de maneira competente.

Impactos e Categorias de Impacto das Etapas do Ciclo de Vida do Etanol				
Etapa	Descrição	Operações relacionadas	Impactos ambientais relacionados	Possíveis Categorias de Impacto
Extração da matéria-prima	Atividades agrícolas do cultivo de cana-de-açúcar	Utilização de maquinário pesado para limpeza física e preparo físico-químico-biológico do terreno	Erosão do solo, poluição do ar, poluição de águas, diminuição da biodiversidade, eutrofização e acidificação	Ocupação e transformação do solo; Gases de efeito estufa; Biodiversidade; Eutrofização e acidificação; Consumo de Recursos e Potenciais de impactos ambientais
		Plantio e aplicação de herbicidas	Diminuição da biodiversidade	Biodiversidade
		Colheita (queima da palhada e transporte)	Poluição do ar e erosão do solo	Ocupação e transformação do solo; Gases de efeito estufa
Produção	Processamento da cana-de-açúcar em etanol, geração de energia elétrica e vapor	Lavagem da cana	Contaminação da água	Eutrofização e acidificação; Consumo de recursos renováveis
		Desfibração por turbinas a vapor (queima do bagaço, motores elétricos ou hidráulicos)	Poluição do ar	Gases de efeito estufa
		Tratamento do caldo	Contaminação do solo e água, superficiais e subterrâneas	Eutrofização e acidificação
		Fermentação, destilação e retificação	Produção de Vapor	Gases de efeito estufa
Reciclagem	Reutilização de subprodutos	Fertirrigação da vinhaça e torta de filtro nos campos de cultivo	Salinização do solo e contaminação de águas superficiais e subterrâneas	Eutrofização e acidificação; Consumo de recursos renováveis
Armazenagem	Tanques de álcool	Armazenamento em tanques de concreto	N/A	N/A
Distribuição	Transporte do etanol até os postos	Transporte por meio de caminhões movidos a diesel	Poluição do ar	Gases de efeito estufa; Consumo de recursos não-renováveis
Utilização	Combustão	Combustão em veículos automotores	Poluição do ar	Gases de efeito estufa; Consumo de recursos não-renováveis

Tabela 5 - Impactos e Categorias de Impacto das Etapas do Ciclo de Vida do Etanol

5.2. Escopos espaciais e temporais

Em relação à escolha do escopo espacial, usualmente, dois tipos gerais de escalas são adotados na AICV: as fronteiras de administração política e as fronteiras biogeográficas (SAAD et al., 2011). Porém, dificilmente alguma delas consegue representar de maneira completa as dinâmicas naturais dos ecossistemas, especialmente para grandes territórios, comprometendo a fidelidade da análise das consequências ambientais das formas de uso e

ocupação do solo. Assim, os limites da área analisada devem se dar de acordo com a abordagem adotada, tomando cuidado para garantir que todos os aspectos técnico-econômicos, ambientais e sociais sejam contemplados.

O escopo temporal utilizado pelos autores estudados foi, normalmente, de um ano. Para o contexto do etanol proveniente dos processos de beneficiamento da cana-de-açúcar, esse escopo temporal se mostra adequado, justamente por ser período mínimo indicado para a amostragem dos dados da ACV do etanol por Ometto (2005).

5.3. Motivações para uso do SIG na ACV do etanol paulista

Dentre todas as razões levantadas para justificar a aplicação da ferramenta de SIG nas ACV internacionais estudadas, são poucas as que não podem se aplicar ao contexto do etanol brasileiro. Porém, vale ressaltar algumas que se destacam por conta dos benefícios múltiplos socioeconômicos, técnicos e ambientais, que podem alcançar:

- A capacidade de produzir informações que estruturem uma estratégia de plantio agrícola para a produção de etanol, dando suporte ao planejamento territorial e reduzindo as distâncias entre a área de cultivo, a usina e o mercado consumidor;
- Possibilidade de produzir mapas com informações relacionadas à capacidade de produção regional, de cada cultura agrícola, de acordo com as características edafoclimáticas, permitindo o uso do solo, por parte dos fazendeiros, de maneira estratégica;
- Capacidade de elaboração de fatores de caracterização para as categorias de impacto que levem em consideração a biodiversidade, o solo, a água e o ar, de maneira regionalizada;
- Capacidade de incluir nos estudos de ACV os impactos causados pelo transporte do etanol a grandes distâncias, e o consumo do produto, permitindo a visualização mais abrangente das zonas impactadas.

5.4. SIG na ACV – Estrutura Geral

Tendo em vista a necessidade de uma revisão mais aprofundada relacionada aos impactos ambientais do processo de produção do etanol paulista, uma forma geral de incorporação da ferramenta SIG na ACV do etanol, agora regionalizada, pode se dar como na Figura 10.

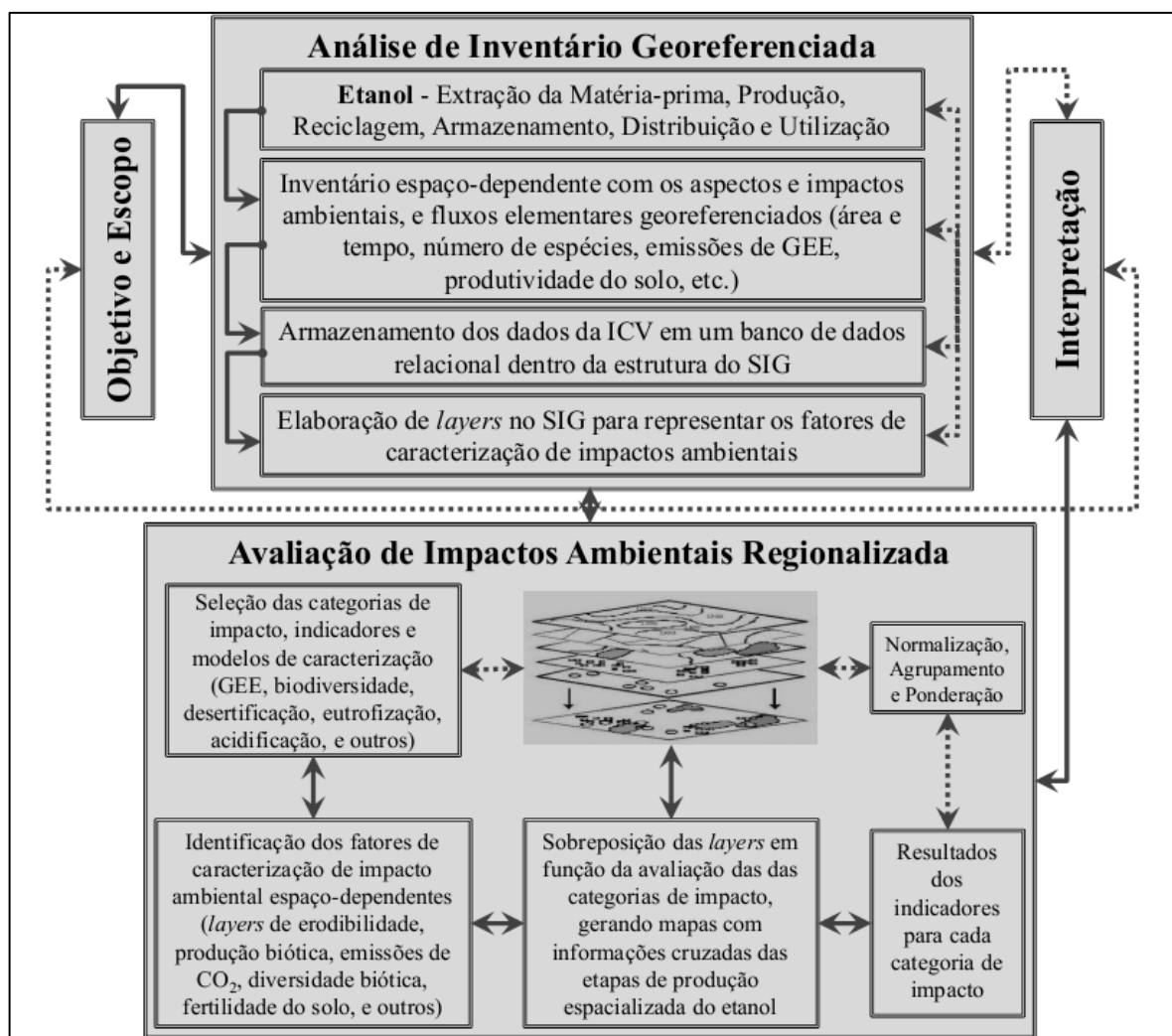


Figura 10- Estrutura geral para utilização do SIG nas ACV do etanol paulista

Assim, com a o geoprocessamento dos dados de inventário relacionados às etapas de produção do etanol e as informações sobre os aspectos ambientais e fluxos elementares em formato de *layers* de SIG, a avaliação de impacto ambiental poderá ser feita de maneira estruturada como em uma ACV normal, porém, com resultados espacializados. Permitindo a interpretação dos impactos ambientais a partir de mapas com os resultados dos indicadores sobre os pontos finais, para cada categoria de impacto.

Vale frisar que essa estrutura geral pode ser alterada de acordo com as exigências definidas nos objetivos e no escopo da ACV.

Assim, o papel do SIG no ICV se estruturará na georeferenciação das informações relacionadas aos fluxos de entrada e saída dessa etapa, produzindo *layers* que representem, por exemplo, as emissões para cada tipologia dos gases de efeito estufa, bem como sobre as qualidades do “ponto final da categoria” que será impactado.

Na sequência, na interação do SIG com a AICV, um “modelo de caracterização” terá de ser utilizado para definir o “indicador de categoria”, por sua vez representado por um “fator de caracterização” equivalente para os níveis de emissões de gases de efeito estufa. Um “resultado do indicador” será expresso, de acordo com o modelo de caracterização proposto, em função de sua localização espaço-temporal, permitindo a avaliação regionalizada dos impactos ambientais que a atividade tem sobre os “pontos finais da categoria” de impacto decidida anteriormente. O exemplo pode ser mais bem compreendido quando visualizado nas Figuras 11 e 12.

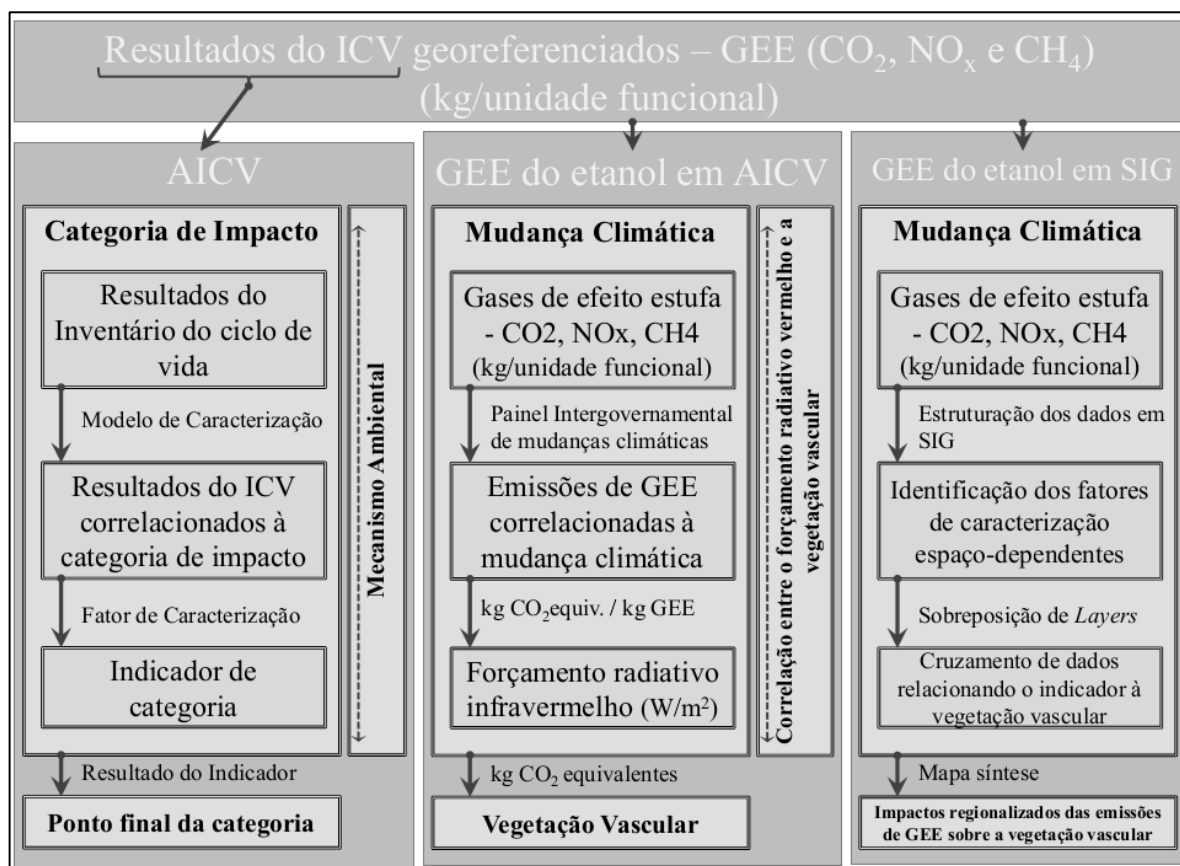


Figura 11– Exemplo de utilização de categoria de impacto da AICV na estrutura do SIG

Aprofundando mais um pouco a discussão para a maneira de escolha dos “fatores de caracterização” que comporão a base para a análise dos impactos ambientais do ciclo de vida do etanol, pode-se utilizar a estrutura de raciocínio proposta por Núñez, et al. (2010), que, quando adaptada para o contexto do etanol, toma a seguinte forma:

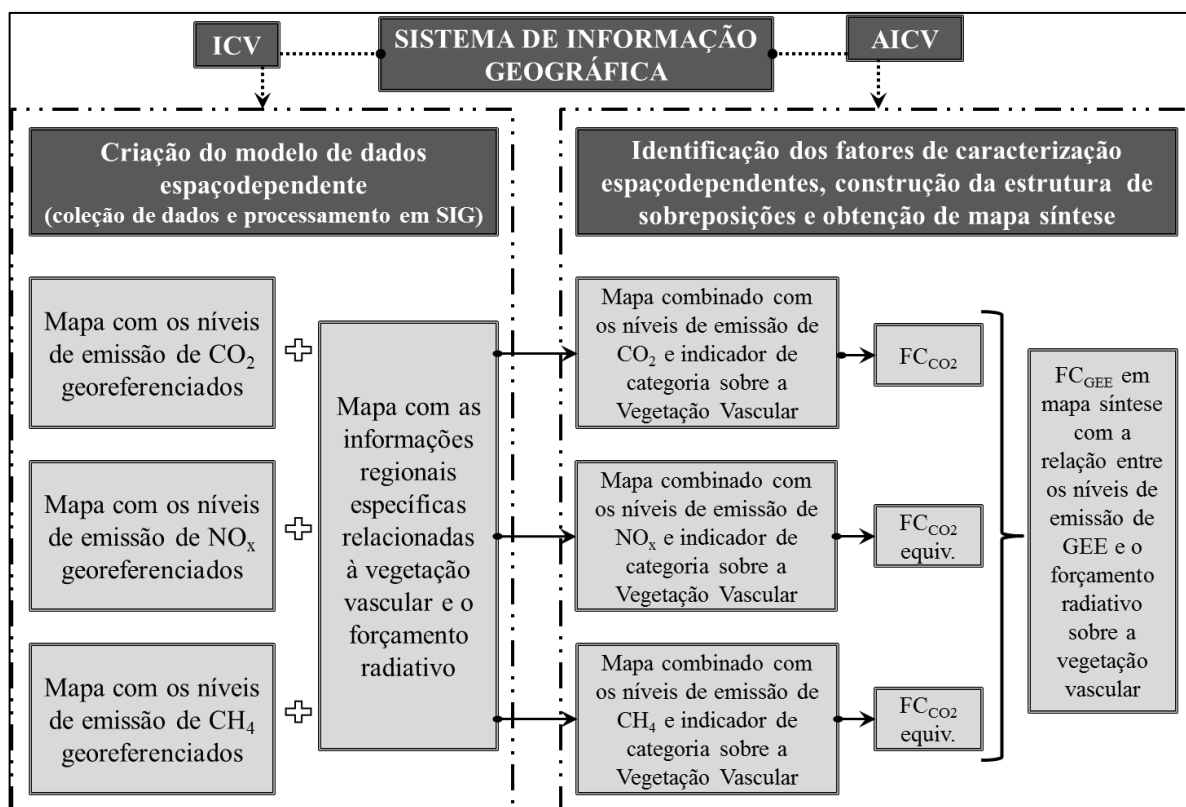


Figura 12- Metodologia para obtenção de FC do etanol para exemplo de categoria de impacto de mudança climática

Na Figura 12 temos que, a partir das informações do ICV contidas no banco de dados do *software* de SIG, o processamento possibilitará a geração de mapas que representam os aspectos ambientais, e a relação entre o indicador e o ponto final de categoria. Com a sobreposição dos *layers* produzidos durante o inventário é possível criar mapas combinados que cruzam informações sobre os aspectos ambientais e o ponto final de categoria, seguindo os resultados dos indicadores de categoria. Então, pelo uso dos fatores de caracterização, um mapa síntese pode ser elaborado para representar a relação final entre as categorias de impacto, seus aspectos e pontos finais. Permitindo a interpretação visual e especializada do mecanismo ambiental analisado, segundo a correlação entre o indicador ambiental e os pontos finais de categoria, e a avaliação dos impactos ambientais.

Portanto, a estrutura metodológica de utilização do SIG nos processos de elaboração de ICV e no enriquecimento da AICV se mostra flexível exatamente para poder contemplar as diferenças entre os escopos e objetivos das ACV, permitindo a utilização das ferramentas de acordo com a necessidade encontrada em cada tipo de avaliação de ciclo de vida de processos e produtos.

6. Conclusões

Tomando o caso do ciclo de vida do etanol, que transforma e ocupa grandes áreas pelo estado de São Paulo pelo plantio e colheita da cana-de-açúcar, além das outras etapas do ciclo produtivo que impactam o meio ambiente e a biota de diferentes formas, vemos que a precisão do processo de ACV precisa ser acurada com a inserção da análise espaçotemporal dos fluxos de entrada e saída dos processos produtivos e seus respectivos impactos ambientais. Assim, por não existir uma metodologia de fusão da ACV com o SIG, para a regionalização de impactos ambientais, estabelecida e reconhecida internacionalmente, o SIG se mostra como a ferramenta potencial ótima para a combinação entre as informações espaciais e as funções analíticas nos diversos estudos internacionais, possibilitando quantificar os fluxos regionais e agindo como uma confiável ferramenta complementar.

Sendo a qualidade da ACV para uso do solo bastante dependente do volume de informações disponíveis a respeito das áreas estudadas, fica claro que o levantamento de dados de inventário que preencherão os modelos de fusão da ACV com o SIG, formando um banco de dados relacional, deve receber atenção especial dentre as etapas estipuladas pelas normas relacionadas à ACV pela ISO, garantindo a confiabilidade da análise final e a precisão dos estudos.

Pode-se entender, portanto, que se for possível elaborar, utilizando o SIG na modelagem da ACV para o processo de produção do etanol paulista, um ICV espaçodependente, com informações relacionadas às características específicas das regiões do escopo definido para a ACV do etanol, isso serviria como uma base fundamental consistente para se conduzir avaliações relacionadas aos impactos, na etapa de AICV, tanto sobre a biodiversidade, quanto sobre as funções do solo, água, emissões gasosas (mudanças climáticas), e qualquer outra categoria de impacto interessante. Além disso, a potencial utilização do SIG se mostrou útil também para a valoração, ponderação e referência espacial dos impactos ambientais causados durante as etapas relacionadas ao processo produtivo do etanol combustível.

Somado a isso, como esperado, a estrutura geral alcançada para a utilização de categorias de impacto em SIG, para aprimoramento da ACV do etanol paulista, se mostrou relativamente simples. As críticas levantadas pelos autores estudados em relação à confiabilidade dos dados e à precisão da avaliação foram, em geral, relacionadas à qualidade dos dados levantados durante as etapas iniciais de ICV, portanto essas fraquezas podem ser toleradas se geridas de

maneira clara e honesta, compatível com o escopo e objetivos da avaliação, não comprometendo a base estrutural do estudo.

Concordando com os autores estudados, essa fusão da ACV com o SIG deverá ser aprofundada e aplicada em futuros estudos, enriquecendo a discussão em torno da ACV de forma geral, além da ACV do etanol paulista, contribuindo significativamente para o planejamento territorial agrícola, o planejamento funcional dos processos produtivos e a noção/prevenção dos impactos ambientais relacionados.

Fica, então, o desafio da aplicação dessa estrutura em um estudo de caso que relacione, da maneira o mais fidedigna possível em SIG, os dados dos fluxos de entrada e saída da produção do etanol paulista às suas respectivas distribuições espaço-temporais, e às avaliações de impactos ambientais espacializados decorrentes.

Finalmente, a leitura da bibliografia relacionada foi fundamental para as conclusões alcançadas nesse trabalho, pois ficou esclarecida a flexibilidade e a abrangência do potencial de utilização da fusão das ferramentas de SIG no processo de ACV, além de ilustrar possíveis metodologias para essa fusão, abrindo caminhos para uma aplicação mais direcionada ao contexto do etanol paulista, podendo até funcionar como fundamentação técnica auxiliar na tomada de decisões, agora fundamentada em bases regionalizadas, relacionadas ao setor.

7. Referências

Lei nº 6.938, de 31 de dezembro de 1981. *Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências*. Distrito Federal, Brasília, Brasil: Diário Oficial da União.

IAIA (2012) - *International Association for Impact Assessment*. Acessado em 16 de setembro de 2012 em: <http://www.iaia.org/>

ABNT. (2004) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14001:2004. *Sistemas da gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso*.

ABNT. (2004) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14042:2004. *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Avaliação do impacto do ciclo de vida*.

ABNT. (2008) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040. *Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*.

ABNT. (2009) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044. *Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*.

ACHTEN, W. M., MATHIJS, E., e MUYS, B. (2009). Proposing a life cycle land use impact calculation methodology. *6th International Conference on LCA in the Agri-Food Sector*. Zurich: Nature Precedings.

ANDRADE, J. M., e DINIZ, K. M. (2007). *Impactos Ambientais da Agroindústria da Cana-de-açúcar: Subsídios para a Gestão*. Piracicaba: ESALQ.

BAILEY, R. (1996). *Ecosystem geography*. New York: Springer.

BAILEY, R. (1998). *Ecoregions: the ecosystem geography of the oceans and continents*. New York: Springer.

BAITZ, M. (2002). *Die Bedeutung der funktionsbasierten Charakterisierung von Flächen-Inanspruchnahmen in industriellen Prozesskettenanalysen: Ein Beitrag zur ganzheitlichen Bilanzierung*. Instituto de Polímeros e Teste: Shaker Verlag

BARBIERI, J. C. (2007). *Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. São Paulo: Saraiva.

BARROW, C. (2006). *Environmental Management for Sustainable Development* (Vol. Second Edition). Oxon, UK: Taylor e Francis e-Library.

BECK, T. et al. (2011). *Land Use Indicator Value Calculation in Life Cycle Assessment – Method Report*. University of Stuttgart, Department Life Cycle Engineering. Stuttgart: Department Life Cycle Engineering, University of Stuttgart.

BENGTSSON, M., et al. (1998). An approach for handling geographical information in life cycle assessment using a relational database. *Elsevier Science*, 67-75.

DRESEN, B., e JANDEWERTH, M. (2012). Integration of spatial analyses into LCA—calculating GHG emissions with geoinformation systems. (L. Schebek, Ed.) *Springer-Verlag* 2012, DOI 10.1007/s11367-011-0378-3.

- GASOL, C. M. et al., (2011). Environmental assessment: (LCA) and spatial modelling (GIS) of energy crop implementation on local scale. *Elsevier Ltd.*, 2975-2985.
- GEYER, R. et al., (2010a). Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. *Int J Life Cycle Assess*, pt. 1, 454-467.
- GEYER, R. et al., (2010b). Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. *Int J Life Cycle Assess*, pt. 2, 692-703.
- IBGE. (2011) – Instituto Brasileiro de Normas Técnicas. Lavoura Temporária. São Paulo, Brasil. <http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=sp&tema=lavouratemporaria2011>; Acesso em setembro de 2012.
- IISD. (2010) - *International Institute for Sustainable Development; Sustainable Development: From Brundtland to Rio 2012*. New York: Drexhage, John; Murphy, Deborah.
- ILCD. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators* (Vol. 1st edition). (E. Commission, Ed.) Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- JONES, C. et al., (2005). *Strategic Environmental Assessment and Land Use Planning: An International Evaluation*. London.
- LACRUZ, M. S., e SOUZA FILHO, M. D. (2009). *Desastres Naturais e Geotecnologias - Sistemas de Informação Geográfica: Caderno Didático #4*. Acesso em 16 de Setembro de 2012, disponível em <http://www.inpe.br/crs/geodesastres/cadernodidatico.php>
- LINDEIJER, E. (2000). Biodiversity and life support impacts of land use in LCA. *Elsevier Science Ltd.*, 313-319.
- LINDEIJER, E., MÜLLER-WENK, R., e STEEN, B. (2002). Impact assessment of resources and land use. (F. G.-W. Udo de Haes H, Ed.) *Life-cycle impact assessment: striving towards best practice*, 11-64.
- MAPA. (2012) - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Acesso em setembro de 2012, disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>
- MATTSSON, B., CEDERBERG, C., e BLIX, L. (2000). Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops. *Journal of Cleaner Production - Elsevier Science Ltd.*, 283-292.
- MENDES, C. A., e CIRILO, J. A. (2001). *Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- MILÀ I CANALS, L. et al., (2007). Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5-15.
- MUTEL, C. L., PFISTER, S., e HELLWEG, S. (2012). GIS-Based Regionalized Life Cycle Assessment: How Big Is Small Enough? Methodology and Case Study of Electricity Generation. *Environmental Science e Technology*, 1096–1103.
- NÚÑEZ, M. (2011). *Modelling location-dependent environmental impacts in life cycle assessment: water use, desertification and soil erosion. Application to energy crops grown in*

Spain. Tese de Doutorado, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA), Barcelona, Espanha.

NÚÑEZ, M. et al., (2010). Assessing potential desertification environmental impact in life cycle assessment. *Springer-Verlag*, pt.1, 67-78.

OLIVEIRA, I. S., MONTAÑO, M., e SOUZA, M. P. (2009). *Avaliação Ambiental Estratégica*. São Carlos: Suprema.

OMETTO, A. R. (2005). *Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia*. São Carlos.

OMETTO, A. R., e SAAVEDRA, Y. M. (2012). Gestão e Engenharia do Ciclo de Vida. In: Vários, *Ecoinovação para a Melhoria Ambiental de Produtos e Serviços: Experiências Espanholas e Brasileiras nos Setores Industrial, Urbano e Agrícola* (pp. 25-38). São Carlos: Diagrama.

RODRIGUES, D., e ORTIZ, L. (2006). *Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil*. São Paulo.

RUDORFF, T. F. et al., (2004). *Estimativa de área plantada com cana de açúcar em municípios do estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2004/2005*. São José dos Campos: INPE.

SAAD, R. et al., (2011). Assessment of land use impacts on soil ecological functions: development of spatially differentiated characterization factors within a Canadian context. (L. M. Canals, Ed.) *Springer-Verlag* 2011, 198-211.

SÁNCHEZ, L. E. (2008). *Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos*. São Paulo: Oficina de Textos.

SIGEOGRÁFICO. (2009). *SIG Geográfico*. Acesso em 19 de setembro de 2012, disponível em <http://sigeografico.wikidot.com/processos-de-um-sig>

TORQUATO, S. A. (2006). *Cana-de-açúcar para indústria: o quanto vai precisar crescer*. São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento.

U.N. (2012) – *United Nations. The Future we Want, United Nations Conference on Sustainable Development*. Rio de Janeiro, Brazil.

UNICA. (2008) – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. *Relatório de Sustentabilidade*. São Paulo: UNICA.

VOGTLANDER, J. G. et al., (2004). Characterizing the change of land-use based on flora: application for EIA and LCA. *Elsevier Science Ltd.*, 47-57.

WCED. (1987) - *World Commission on Environment and Development. Our Common Future*. United Nations World Commission on Environment and Development. Stockholm: Brundtland, Gro Harlem.

WITTE, J.-P., e TORFS, J. (2001). *Scale dependency and fractal dimension of rarity*. Wageningen: Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University.

YI et al., (2007). Development of the Interregional I/O Based LCA. (S. Suh, Ed.) 353-364.