



ESTUDIO DE LAS CALCULADORAS GEI PARA LOS SECTORES AGRÍCOLA Y FORESTAL

*Guía para la elección y utilización de
herramientas de evaluación a nivel
territorial*



Versión 2.0

Autores

Vincent COLOMB (autor principal, IRD, UMR Eco&Sols)

Martial BERNOUX (Coordinador, IRD, UMR Eco&Sols, martial.bernoux@ird.fr)

Louis BOCKEL (Jefe de proyecto, FAO)

Jean-Luc CHOTTE (IRD, UMR Eco&Sols)

Sarah MARTIN (ADEME, Servicio Agrícola y forestal)

Cécile MARTIN-PHIPPS (ADEME, Servicio internacional)

Jérôme MOUSSET (ADEME, ADEME, Servicio Agrícola y forestal)

Marianne TINLOT (Consultora Junior, FAO)

Ophélie TOUCHEMOULIN (Consultora Junior, FAO)

Junio 2012

Nota previa

El contenido de este estudio y la manera en que aparecen presentados los datos no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), de la Agencia francesa del Medio Ambiente y de la Gestión de la Energía" (ADEME) y del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o sobre sus autoridades, ni tampoco respecto de la delimitación de sus fronteras o límites territoriales. La mención de empresas o productos de fabricantes concretos, estén o no patentados, no implica que FAO, ADEME o IRD los aprueben o recomienden frente a otros de naturaleza similar que no aparezcan mencionados.

Las opiniones mostradas en este estudio son las de sus autores y no representan necesariamente las de FAO, ADEME o IRD.

Todos los derechos reservados. FAO, ADEME e IRD agradecen la reproducción y difusión del material contenido en este estudio. Su uso para fines no comerciales se autorizará de forma gratuita, previa solicitud. La reproducción para la venta o con fines comerciales, incluidos fines educativos, podría estar sujeta a pago de derechos o tarifas. La solicitud de autorización para reproducir o difundir material de cuyos derechos de autor sea titular la FAO, así como toda consulta relativa a derechos y licencias deberá realizarse por correo electrónico a: copyright@fao.org.

Este documento ha sido producido con el apoyo del equipo **EX-ACT** de la **FAO** (EX-Ante Carbon-balance tool - www.fao.org/tc/exact), la Unidad de Investigación Conjunta **Eco&Sols** (Ecología Funcional y Biogeoquímica de Suelos y Agro-ecosistemas - <http://www.montpellier.inra.fr/ecosols>) y del programa **ClimAgri** de ADEME (www.ademe.fr).

Copyright de las fotografías ©: ADEME, Moizo Bernard – IRD (www.indigo.ird.fr),



Revisores externos asociados

Eleanor MILNE (Universidad Estatal de Colorado)

Dipti THAPA (Banco Mundial)

Carlos Eduardo PELLEGRINO CERRI (Universidad de São Paulo)



1.1.1.1.1 Estudio disponible online :
<http://www.fao.org/tc/exact/exact-publications/publicaciones-en-las-que-se-menciona-a-exact/es/>



Índice

2	Resumen	4
3	Introducción	10
4	Metodología	11
5	Ámbito geográfico de las calculadoras	13
6	Los desarrolladores de calculadoras.....	14
7	La metodología preconizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)	15
8	Tiempo y capacidades requisitos	16
9	Diferentes calculadoras para diferentes objetivos	17
9.1	Del nivel de terreno al nivel nacional	19
9.2	Zona de uso apropiado para las calculadoras	20
10	Consideración del suelo y el clima	20
11	Parámetros considerados por las calculadoras.....	25
12	Resultados.....	32
13	Incertidumbres	35
14	Contexto económico y político sobre las calculadoras de GEI	38
15	Disponibilidad de las calculadoras y sus guías de usuario	39
16	Observaciones generales y conclusiones	41
17	Lista de acrónimos	43
18	Bibliografía	44

REVISIÓN DE LAS CALCULADORAS GEI PARA LOS SECTORES AGRÍCOLA Y FORESTAL: *Guía para la elección y utilización de herramientas de evaluación a nivel territorial*

2 Resumen

El cambio climático está reconocido como uno de los mayores retos ambientales de este siglo. Las actividades agrícolas y forestales pueden ser tanto fuentes como sumideros de gases de efecto invernadero (GEI). En la mayoría de países estas actividades suponen una proporción significativa de las emisiones nacionales, estimándose en un 30% a nivel global. Para cumplir con los objetivos globales y nacionales de reducción de emisiones y al mismo tiempo garantizar la seguridad alimentaria, los sectores agrícola y forestal tienen que tener en consideración este nuevo contexto. Paralelamente a los avances metodológicos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se han desarrollado en los últimos años numerosas herramientas para la evaluación del balance de GEI para actividades agrícolas y forestales. Deneff et al. (2012) proponen la siguiente clasificación de las herramientas existentes: calculadoras, protocolos, guías de buenas prácticas y modelos. Este estudio se centra en las calculadoras, es decir, programas basados en cálculos *online*, en MS Excel® u otros formatos digitales que permitan cuantificar el balance de GEI de actividades agrícolas y forestales. Estas calculadoras tienen un nivel de complejidad limitado y deben ser consideradas como herramientas de apoyo a la toma de decisiones políticas o de gestión de proyectos, a diferencia de los modelos, que son más complejos y están destinados a trabajos de investigación, según la definición de Deneff et al. La revisión se centra en las calculadoras que realizan evaluaciones a nivel territorial y a nivel de explotación, incluyendo varias producciones: agricultura, ganadería y bosque. Se han identificado dieciocho calculadoras, entre las cuales destacan EX-ACT, Climagri®, Cool Farm Tool, Holos, USAID FCC y ALU. Las calculadoras fueron probadas y analizadas en base a diferentes criterios. Además, se envió un cuestionario a los desarrolladores de cada calculadora para que completaran y validaran el análisis de su producto.

Los resultados muestran que las distintas calculadoras han sido desarrolladas con diferentes enfoques y objetivos. Además, cada una tiene un área geográfica de aplicación. Se propone a continuación una clasificación general de calculadoras para que el usuario, en función de su objetivo principal, escoja la herramienta más adaptada a sus necesidades.

- **Sensibilización:** herramientas básicas, que no necesitan capacitación especial pero tienen un alcance limitado. Identifican las fuentes principales de GEI pero no son eficientes a la hora de buscar soluciones.
- **Informes:** herramientas que describen en detalle la situación actual. Permiten disponer de cifras cuantificadas, obtenidas en base a una metodología homogénea. De esta manera, se pueden realizar comparaciones entre diferentes territorios o explotaciones, sirviendo además para facilitar la adaptación de las políticas. Estas calculadoras pueden tener en cuenta toda la diversidad de prácticas de gestión de cada territorio o explotación.
- **Evaluación de proyectos:** en base a una situación inicial conocida, estas calculadoras permiten comparar la situación "sin proyecto" frente a la situación "con proyecto". Estas calculadoras se pueden dividir en dos subcategorías, en función de si se enfocan hacia mercados de carbono o hacia otro tipo de proyectos.
- **Herramientas orientadas a mercados y productos:** el objetivo es comparar el balance de GEI para productos y no para territorios, y están orientados al mercado (por ejemplo, etiquetado ecológico). Estas herramientas permiten comparar las emisiones de diferentes productos para un nivel de producción similar. Los resultados se expresan en cantidad de GEI por cada kg de producto

Tabla 1: Clasificación de las calculadoras según sus objetivos y zona geográfica.

OBJETIVO DEL USUARIO		CALCULADORAS Y ZONA GEOGRAFICA
Sensibilización		Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture (NZ), Cplan v0 (UK), Farming Enterprise GHG Calculator (AUS), US cropland GHG calculator (USA)
Informes	Nivel territorial	ALU (mundial), Climagri (FR), FullCam (AUS)
	Nivel de explotación	CALM (UK); CFF Carbon Calculator (UK); Dia'terre®(FR); IFSC (USA)
Evaluación de proyectos	Enfocado en mercados de carbono	Carbon Farming tool (NZ), Farmgas (AUS), Forest tools : TARAM (mundial), CO2 fix (mundial)
	No enfocado en mercados de carbono	CAR livestock tools (USA), CBP (mundial), EX-ACT (mundial); Holos (CAN), US AID FCC (países en desarrollo)
Herramientas orientadas a mercados y productos		Cool farm tool (mundial), Diaterre® (FR), programas ACV y bases de datos asociadas (SimaPro, ecoinvent, LCA food, etc: principalmente para países occidentales)

AUS: Australia; CAN: Canadá; FR: Francia, NZ: Nueva Zelanda; UK: Reino Unido; USA: Estados Unidos; FullCam: calculadora utilizada por Australia para el cálculo nacional de carbono; no tiene en cuenta los flujos de N₂O ni de CH₄. Es una herramienta muy precisa, gracias a la integración de bases de datos con modelos de procesos biofísicos.

Todas las calculadoras estudiadas tienen en cuenta las principales fuentes de GEI, con la excepción de las emisiones debidas a cambios de uso del suelo). A pesar de que todas estas calculadoras expresan los resultados en toneladas de CO₂ equivalente (t-CO₂eq)¹, los resultados obtenidos por las diferentes herramientas no se pueden comparar de manera directa, debido a las **diferencias en las metodologías y en las variables consideradas por** cada calculadora. Para una interpretación adecuada es imprescindible comprobar el enfoque del estudio, los parámetros considerados y tener en cuenta las **incertidumbres**.

Uno de los principales retos para la evaluación a nivel territorial es conseguir integrar la **heterogeneidad de los sistemas productivos con la gran variedad de mecanismos biológicos que intervienen en las emisiones de GEI**. Además, el cambio de escala desde el nivel de una explotación hasta el nivel territorial implica un cambio en el tipo de datos disponibles. A escala de parcela o de explotación los datos técnicos son fáciles de conseguir, y pueden ser aportados directamente por el gestor. A escala territorial, los datos se obtienen a partir de estadísticas oficiales o mediante conocimiento experto, lo que aumenta las incertidumbres. Por otro lado, las calculadoras que evalúan los mecanismos biológicos que emiten GEI se basan en modelos biofísicos (Roth-C, Century, etc.) ligados en ocasiones a datos espaciales (por ejemplo, en el proyecto GEFSOC o APEX) o bien en factores de emisión promedio, proporcionados por el IPCC o por estudios nacionales. En el caso del almacenamiento de carbono en el suelo y en la biomasa, que supone grandes cantidades de CO₂, es importante tener en cuenta las dinámicas temporales. El funcionamiento de estos reservorios de carbono está ligado a las técnicas de cultivo y gestión utilizadas, así como a los cambios de usos del suelo. En el futuro, se espera que las técnicas de teledetección (imágenes de satélite, espectroscopía de infrarrojo cercano, etc.), permitan la medición directa y con un coste reducido de la evolución del contenido de carbono del suelo y de la biomasa. Sin embargo, no se prevé disponer a corto plazo de técnicas de medición directa de flujos de N₂O o CH₄ a escala territorial y con coste reducido. Para aumentar la precisión de las evaluaciones de emisiones de GEI, es preciso continuar con el desarrollo de modelos de procesos y de métodos baratos de medición directa. De esta manera, se dispondrá de factores de emisión más exactos para todas las condiciones edafo-climáticas y para todos los mecanismos biológicos estudiados.

¹ CO₂ equivalente: La unidad de CO₂ equivalente explica el forzante radiativo (impacto sobre el cambio climático) de una sustancia, en general GEI, en comparación con el CO₂, para un período de tiempo determinado. Se calcula en base al Potencial de Calentamiento Climático (GWP). Los valores oficiales del IPCC para los PCG son: 21 para el metano (es decir: 1 kg de CH₄ tiene mismo impacto radiativo que 21 kg de CO₂) y de 310 para el óxido nitroso (N₂O), para una escala temporal de cien años.

Las fuentes de emisión que requieren una atención especial

- Agricultura: fertilización nitrogenada, gestión de los residuos, cultivo de arroz, conversión de humedales, cambio de usos del suelo, cambio de las técnicas de gestión del suelo (impactos en el contenido de carbono).
- Ganadería: alimentación animal y cálculo de GEI en la importación de comida (proporción que representa frente al pastoreo directo), gestión de las deyecciones y cálculo de las emisiones del uso de fertilizantes orgánicos (estiércol), discriminando entre ganadería y agricultura.
- Horticultura: infraestructuras y consumo de energía.
- Bosques: carbono del suelo, plantaciones vs. bosque natural, cambios de usos del suelo (por ejemplo, deforestación).

Las calculadoras proporcionan resultados en las siguientes unidades: $\text{CO}_2\text{eq.año}^{-1}$, $\text{CO}_2\text{eq.ha}^{-1}$, $\text{CO}_2\text{eq.proyecto}^{-1}$ o $\text{CO}_2\text{eq.cantidad de producto}^{-1}$ (por ejemplo, kg de materia seca de trigo, leche, etc.). La decisión sobre el indicador más adaptado depende de los objetivos de cada estudio. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el vínculo entre el nivel de producción de un territorio y sus emisiones por hectárea, para evitar posibles efectos de desplazamiento de las emisiones a otras áreas. Por ejemplo, la reducción de las emisiones de un territorio por una disminución de su nivel de producción podría ser compensada por un aumento de las emisiones en otro territorio. También es importante considerar la permanencia de las emisiones: algunos aumentos o reducciones de las emisiones son temporales, mientras que otros son más continuos, como es el caso de los cambios en los sistemas productivos. Por último, hay que tener en cuenta que una evaluación ambiental o de sostenibilidad no debe limitarse a la cuantificación del balance de GEI. De igual manera, las medidas encaminadas a mejorar del balance de GEI deben considerar posibles efectos negativos sobre otros criterios (aumento del uso de pesticidas o del consumo de agua, pérdida de biodiversidad, etc.). El objetivo final debe ser en todo caso mejorar la sostenibilidad global del sistema.

En el caso de los sistemas productivos muy intensivos la evaluación de GEI debe centrarse en mejorar la eficiencia de los "inputs" (factores de producción) por unidad de producto (por ejemplo: fertilización nitrogenada). Sin embargo, en zonas menos productivas la prioridad puede ser la resiliencia de los ecosistemas y la seguridad alimentaria, a través de la mejora de las prácticas agronómicas. Existen claras sinergias entre la eficiencia agronómica y las prácticas agroecológicas o la "agricultura climáticamente inteligente".

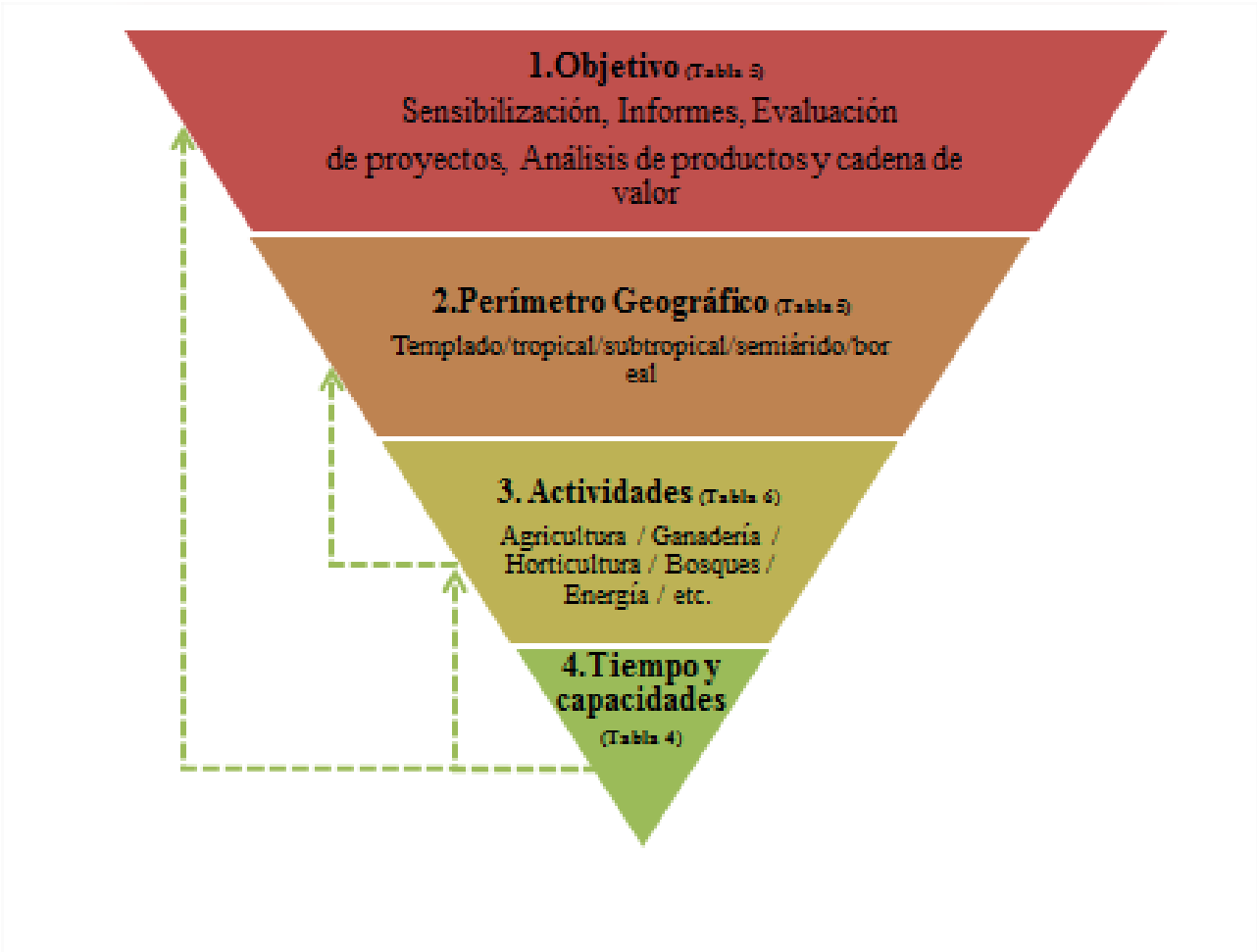
Un resultado importante de este estudio es la existencia de calculadoras adaptadas a cada situación, aunque para muchas regiones estas herramientas tienen un nivel de incertidumbre muy alto y no están adecuadamente asociadas con parámetros

socioeconómicos. El desarrollo de las calculadoras futuras debe ir encaminado a facilitar la toma de decisiones políticas y la gestión de proyectos, integrando el cambio climático. Los desarrolladores de calculadoras deben considerar qué indicadores y resultados son los más adecuados para cada situación. Además, la estandarización de las metodologías, tal como se hace en estudios de Análisis de Ciclo de Vida según la norma ISO 14040, permitiría realizar evaluaciones de GEI con una mayor claridad, transparencia y comparabilidad entre ellas.

Por último, y en función de los objetivos del usuario, cada calculadora busca el mejor compromiso posible entre facilidad de uso, tiempo necesario para su utilización y precisión de los resultados. Mientras las evaluaciones de GEI sigan siendo principalmente voluntarias y con un impacto económico relativamente bajo (ausencia de impuestos al carbono, etiquetado ecológico, etc.), el coste y nivel de complejidad de manejo de las calculadoras deberían mantenerse bajos. Si se llevaran a cabo políticas más restrictivas, entonces sí sería imprescindible mejorar la estandarización y la precisión de los resultados.

Propuesta de proceso para la elección de una calculadora de GEI

El usuario selecciona las herramientas en base a criterios cada vez más específicos, con ayuda de las tablas que se muestran en este estudio. Sin embargo, si no existe ninguna calculadora específica para el objetivo y el área concreta, se debe recurrir a herramientas más generales, siguiendo el esquema mostrado a continuación.



Palabras clave: gases de efecto invernadero, calculadoras, evaluación ambiental

3 Introducción

El cambio climático está reconocido como uno de los mayores retos ambientales de este siglo. Este fenómeno concierne a los sectores agrícola y forestal de varias maneras:

- 1) Los sistemas productivos están afectados por el cambio climático y deben desarrollar estrategias de adaptación.
- 2) En muchas zonas del mundo la agricultura depende en gran medida de la utilización de productos químicos o derivados del petróleo, cuyo coste será creciente en el futuro. Al mismo tiempo, la creciente demanda de alimentos y bioenergía requerirá un aumento de la producción global.
- 3) La agricultura, la ganadería y la deforestación son responsables de una gran parte de las emisiones de GEI.
- 4) Los bosques y los terrenos agrícolas pueden ser importantes sumideros de carbono si se llevan a cabo prácticas de gestión adecuadas.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se han desarrollado numerosas herramientas para el cálculo de GEI en actividades agrícolas y forestales. Deneff et al. (2012) clasifican estas herramientas en: calculadoras, protocolos, guías de buenas prácticas y modelos. Este estudio se centra en las calculadoras, es decir, programas basados en cálculos *online*, en MS Excel[®] u otros formatos digitales que permitan cuantificar el balance de GEI de actividades agrícolas o forestales. Estas calculadoras tienen un nivel de complejidad limitado y deben ser consideradas como herramientas de apoyo a la toma de decisiones políticas o de gestión de proyectos, a diferencia de los modelos, que son más complejos y están destinados a trabajos de investigación, según la definición de Deneff et al.

La Agencia del Medio Ambiente y de la Gestión de la Energía (ADEME), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), y el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) decidieron realizar un estudio de estas calculadoras. El objetivo es facilitar a los usuarios la elección de la calculadora más adaptada a sus necesidades, así como resaltar las principales diferencias metodológicas existentes entre las diferentes herramientas. Este trabajo pretende promover la transparencia en los estudios de balances de carbono y la interpretación adecuada de los resultados por parte de los usuarios, así como proponer ideas para el desarrollo de nuevas herramientas.

4 Metodología

Este estudio se ha realizado en varias etapas. Inicialmente, se realizó una recopilación de las calculadoras de GEI existentes para actividades agrícolas y forestales (lista completa en el Anexo 1), basada en una revisión de bibliografía técnica y científica. La búsqueda se hizo en francés, inglés y español. Muchas de estas herramientas están centradas en un producto concreto (leche, carne, cereales, madera, etc.), mientras que solo algunas tienen en cuenta varios subsectores de manera transversal (cultivos, ganadería, bosques, cambio de usos del suelo, deforestación, etc.) y tienen un enfoque territorial. A partir de esta lista se seleccionó una submuestra de aquellas calculadoras que realizan evaluaciones de múltiples actividades, tanto a nivel de explotación como a nivel territorial, resultando un total de 18 (Tabla 2). Estas calculadoras fueron probadas y comparadas en base a numerosos criterios prácticos y metodológicos. En base a este análisis se envió un cuestionario pre-completado a los desarrolladores de cada calculadora, para que validaran y completaran el análisis. Los resultados de todo este proceso se resumen en este estudio.

Tabla 2 Lista de herramientas seleccionadas para el análisis

Calculadoras	Validación	Institución desarrolladora	Responsable	Correo electrónico
ALU	x	Colorado State University (USA)	Stephen M. Ogle	ogle@nrel.colostate.edu
Calculateur AFD	no	Agence Française de Développement AFD (FR)		
CALM	x	Country Land and Business Association CLA (UK)	Derek Holliday	Derek.Holliday@cla.org.uk
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	x	AERU, Lincoln university, (NZ)	Caroline Saunders	Caroline.Saunders@lincoln.ac.nz
Carbon Farming Calculator	x	Carbon Farming Group (NZ)	Clayton Wallwork	clayton@carbonfarming.org.nz
CBP; carbon benefit project	x	GEF, Colorado State University (USA)	Eleanor Milne Mark Easter	eleanor.milne@colostate.edu ; mark.easter@colostate.edu
CFF Carbon Calculator	x	Farm Carbon Cutting Toolkit (UK)	Jonathan Smith	jonathan@cffcarboncalculator.org.uk
Climagri®	x	ADEME, con desarrollo de Solagro (FR)	Sarah Martin, Sylvain Doublet,	sarah.martin@ademe.fr sylvain.doublet@solagro.asso.fr
CoolFarmTool	x	Unilever Sustainable Agriculture,; University of Aberdeen (UK)	Jon Hillier	j.hillier@abdn.ac.uk
CPLAN v2	x	SEE360 (UK)	Drew Coulter, Ron Smith & Jan Dick	drew@cplan.org.uk
Dia'terre®	x	ADEME (FR)	Audrey Trévisiol	audrey.trevisiol@ademe.fr
EX-ACT	x	FAO	Martial Bernoux, Louis Bockel	EX-ACT@fao.org , martial.bernoux@ird.fr , louis.bockel@fao.org
FarmGAS	x	Australian Farm Institute (AUS)	Renelle Jeffrey	jeffreyr@farminstitute.org.au
Farming Enterprise Calculator	x	Queensland university, Institute for Sustainable Resources (AUS)	Peter Grace	isr@qut.edu.au ;
Full CAM	x	Australian Government (AUS)	-	nationalgreenhouseaccounts@climatechange.gov.a u
Holos	x	Agriculture and Agri-food Canada (CAN)	José M. Barbieri	Holos@agr.gc.ca
IFSC	x	Peter University of Illinois (USA)	David Kovaicic, Peter McAvoy, Tim Marten, Aaron Petri	pete@octagonal.org
USAID FCC	x	Winrock International (USA)	Felipe Casarim, Nancy Harris	carbonservices@winrock.org

Nota: debido a problemas de accesibilidad no se ha podido completar la evaluación de la calculadora "Overseer".

5 **Ámbito geográfico de las calculadoras**

Todas las calculadoras estudiadas fueron desarrolladas por países del Anexo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (países industrializados). La mayoría de estas herramientas está enfocada hacia los sistemas agrícolas industrializados. Los países más activos en el desarrollo de estas calculadoras son Estados Unidos (que no ha ratificado el Protocolo de Kioto), Australia, Nueva Zelanda, Reino Unido, Canadá y Francia. Otros países europeos se han centrado en desarrollar calculadoras para productos específicos (como por ejemplo los biocombustibles). Las calculadoras desarrolladas por países de "Renta Baja" se suelen centrar en proyectos de desarrollo y en el mercado de créditos de carbono (Mecanismos de Desarrollo Limpio). Cabe destacar que países emergentes con gran capacidad de exportación, como Chile o Sudáfrica, están desarrollando calculadoras para sus producciones estratégicas (vino, cítricos, etc.), probablemente para anticiparse a posibles penalizaciones en los mercados occidentales relacionadas con criterios ambientales (eco-impuestos, etiquetado ecológico, etc.). Debido a la metodología de estudio, es posible que se hayan obviado calculadoras regionales, si no estaban disponibles en inglés, español o francés. Se han observado numerosos estudios de caso en Brasil, China, India y Rusia, grandes productores agrícolas a nivel mundial. Sin embargo, las calculadoras utilizadas en estos estudios habían sido desarrolladas por instituciones internacionales o por países occidentales, no habiéndose identificado ninguna calculadora específica de estos países. Ocurre una situación similar en el caso de África del Norte y Oriente Medio que no tienen calculadora propia, pese a que sus sectores agrícolas son muy vulnerables al cambio climático. El desarrollo de calculadoras en árabe, si es que no existen, podría resultar útil para esta zona del mundo.

Tabla 3 Ámbito geográfico de aplicación de las calculadoras estudiadas

País de uso (preferentemente)	Principales calculadoras identificadas*	Numero total de calculadoras identificadas
Australia	FullCam; Farmgas; Farming Enterprise GHG Calculator; numerosas calculadoras orientadas a productos concretos	>10
Canadá	Holos	1
Chile	Todas las calculadoras están orientadas a productos específicos	3
Francia	Climagri [®] , Dia'terre [®]	3
Nueva Zelanda	Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture; Carbon Farming calculator	2
Sudáfrica	Calculadora orientada en la producción de vino	1
Reino Unido	CALM; Cplan; CFF Carbon Calculator	4
Estados Unidos	IFSC, el resto de calculadoras están orientadas a actividades específicas (agricultura, ganadería, bosques,...)	>10
A nivel mundial	EX-ACT; Cool Farm tool; Calculateur AFD; CBP simple assessment; ALU	5
Países en vías de desarrollo	USAID FCC	1

*Solo se muestran en esta tabla las calculadoras aptas para evaluaciones a nivel territorial. El número total de calculadoras (columna derecha) incluye, además, las calculadoras específicas para determinados productos.

6 Los desarrolladores de calculadoras

Los organismos que desarrollan calculadoras de emisiones de GEI son diversos. La mayoría son centros públicos de investigación que crean calculadoras de uso gratuito para gestores y políticos, de manera que se facilite la consideración de aspectos relativos al cambio climático en la toma de decisiones. Estos equipos de investigación suelen estudiar al mismo tiempo los mecanismos biofísicos implicados en las emisiones de GEI. Desde el sector privado también se están desarrollando calculadoras, generalmente centradas en productos concretos, con un enfoque de Ciclo de Vida. El desarrollo de estas herramientas se realiza en el marco de la estrategia de desarrollo sostenible de las compañías. Estas calculadoras pueden ser desarrolladas por empresas (ej.: Cool Farm Tool) o por consorcios de productores y

transformadores (ej.: sector vinícola); son generalmente gratuitas, en ocasiones sujetas a registro. Las consultoras ambientales también desarrollan calculadoras (ej.: Cplan) aunque en ocasiones utilizan calculadoras oficiales, previo pago de licencia o tras pagar una tasa en concepto de formación (ej: Dia'terre[®]). Por último, algunas ONG han desarrollado calculadoras con el objetivo de sensibilizar sobre el cambio climático y promover la sostenibilidad.

7 La metodología preconizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

El IPCC es un grupo internacional de científicos encargados de compilar y sintetizar todos los estudios relacionados con el cambio climático. También transfiere información a la sociedad y a los políticos sobre aspectos relativos al cambio climático, y publica guías de buenas prácticas para la contabilidad de GEI (IPCC, 2006), que aparecen mencionadas en todas las calculadoras estudiadas. El IPCC organiza la contabilidad de GEI mediante tres aproximaciones, llamadas "Tiers". Tiers 1 tiene un enfoque global, con factores de emisión medios correspondientes a grandes eco-regiones del mundo. Tiers 2 es similar, pero utiliza datos a nivel de Región o de Estado, de manera que considera con mayor precisión los factores de emisión. Por último, Tiers 3 tiene un enfoque mucho más detallado y suele incluir aspectos de modelización biofísica de los procesos relacionados con los GEI. Estos modelos solo están disponibles para unas pocas fuentes de emisión y para escasas áreas del mundo.

En el caso de las emisiones de CO₂ procedentes de la producción energética, así como las correspondientes a N₂O y a CH₄, el enfoque más común del IPCC consiste en multiplicar un dato de actividad (número de animales, superficie de un determinado cultivo, cantidad de carburante, etc.) por su factor de emisión específico. En cambio, el cálculo de la emisión o fijación de CO₂ que interviene en actividades diferentes a la producción energética se realiza en base a sus fluctuaciones: se estudia, por tanto, la evolución del contenido de CO₂ a lo largo del tiempo, en cinco componentes: biomasa aérea, biomasa subterránea, hojarasca, madera muerta y carbono de suelo.

8 Tiempo y capacidades requisitos

Algunas calculadoras son de fácil manejo y obtención de datos, mientras que otras son más complejas. No es fácil dar una estimación del tiempo requisito para cada calculadora porque depende mucho del nivel deseado de detalles, de fiabilidad y de la disponibilidad de los datos en cada territorio. Sin embargo, proponemos una estimación general, que también permite comparar las calculadoras entre ellas (Tabla 4). Las capacidades requisitas corresponden a las capacidades en agronomía/forestal como a las capacidades informáticas para usar el software.

Tabla 4. Necesidades en tiempo y capacidades

Calculadoras	Tiempo necesario para un estudio	Capacidades requisitas para usar la calculadora
AFD calculator	++	+
ALU	++++	++++
CALM	++	++
Carbon benefit project CPB	+++	+++
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	+	+
Carbon Farming Group Calculator	+	+
CFF Carbon Calculator	++	+++
Climagri®	++++	++++
CoolFarmTool	++	++
CPLAN v2	++	++
Dia'terre®	++	++++
EX-ACT	+	++
FarmGAS	+++	+++
Farming Enterprise Calculator	+	+
FullCAM	++++	++++
Holos	+++	++
IFSC	+	+++
USAID FCC	+	++

Leyenda: + a ++++; del requisito mínimo de tiempo (<1 día)/capacidad al requisito máximo de tiempo (>1 mes) /capacidad (capacitación formal obligatoria)

9 Diferentes calculadoras para diferentes objetivos

Los cálculos de GEI pueden ser realizados por diferentes motivos, según el grupo de interés y el contexto local. La clasificación mostrada a continuación no debe considerarse como estricta, ya que algunas calculadoras pueden corresponder a más de una categoría. El objetivo es clasificarlas en base a criterios clave para facilitar su análisis y guiar al usuario. Esta clasificación viene a complementar las propuestas por la Coalición sobre los Gases Agrícolas de Efecto Invernadero (C-AGG, 2010; Driver et al., 2010a), la de Post et al. (2001) sobre las emisiones de los suelos y la de Milne et al. (2012) sobre la agricultura de pequeña escala.

- Sensibilización:

Calculadoras orientadas principalmente para los gestores de explotaciones y consultores. Su objetivo es informar sobre el tema del cambio climático y del papel de la agricultura al respecto. Estas calculadoras, generalmente disponibles por internet, son muy fáciles de utilizar (no requieren formación) y permiten identificar las principales fuentes de emisión. Siguen el enfoque Tiers 1, y tienen grandes incertidumbres. La mayoría de ellas no tiene en cuenta el carbono del suelo ni los cambios de usos del suelo. Ejemplos: *Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture (NZ)*, *Cplan v0 (UK)*; *Farming Enterprise GHG Calculator (AUS)*; *US cropland GHG calculator (USA)*.

- Informes:

Estas calculadoras pueden funcionar a escala de explotación o a escala territorial y deben ser considerar la diversidad de prácticas de cada área. Utilizan los enfoques Tiers 1 o Tiers 2. El objetivo es hacer un análisis detallado de la situación actual y, en base a una metodología homogénea, realizar comparaciones entre diferentes explotaciones o territorios y adaptar las políticas.

- Calculadoras a nivel territorial: Evaluación de las emisiones de GEI en general exigidas por instituciones oficiales. Las calculadoras deben evitar dobles conteos e integrar estándares oficiales. Los resultados tienen importantes incertidumbres, ya que se basan en cifras promedio, y por tanto no manejan datos precisos de actividades ni de factores de emisión. La utilización de estas calculadoras suele ser muy lenta (cada estudio puede requerir días o meses), debido a la dificultad para conseguir los datos de base. Ejemplos: *ALU (Mundo)*; *Climagri® (FR)*.
- Calculadoras a nivel de explotación: para un gestor, conocer en detalle la situación de su explotación es la primera etapa para implementar una estrategia de reducción de sus emisiones. Sin embargo estas calculadoras están más enfocadas en el diagnóstico de una situación que en la evaluación de posibles alternativas. Ejemplos: *Dia'terre® (FR)*; *CALM (UK)*; *CFF Carbon Calculator (UK)*.

- Evaluación de proyectos

Las calculadoras utilizadas para la evaluación de proyectos comparan la situación actual frente a una situación "con proyecto" y una situación "sin proyecto". Estas herramientas se dividen en dos subcategorías, en función de si están o no orientadas hacia proyectos vinculados a mercados de crédito de carbono. Las calculadoras empleadas se adaptan a cada tipo de proyecto: por ejemplo, las calculadoras orientadas a mercados de carbono deben tener una gran precisión a la hora de calcular el balance de emisiones, mientras Un aspecto común a estas calculadoras es la necesidad de considerar todas las opciones posibles de mitigación, incluido el almacenamiento en el suelo.

- Calculadoras orientadas hacia mercados de créditos de carbono: principalmente para países en los que la agricultura esté sujeta al sistema de créditos de carbono o bien para los que pueden desarrollar proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Estas calculadoras deben tener una gran precisión a la hora de calcular el balance de emisiones porque de los resultados depende el valor económico de los proyecto. Ejemplos: *Farmgas (AUS)*, *Carbon Farming Calculator (NZ)*; *Calculadora forestal: TARAM (mundial)*, *CO2 fix (mundial)*.
- Calculadoras orientadas hacia otro tipo de proyectos: estas calculadoras permiten dar información a los gestores de proyectos, agentes implicados y donantes. Estas calculadoras destinadas a proyectos con otra finalidad que el mercado de carbono (ej.: seguridad alimentaria, restauración de áreas degradadas, proyectos sociopolíticos, etc.) deben ser fácilmente accesibles y fáciles de utilizar. Ejemplos: *EX-ACT (Mundial)*; *US AID FCC (Países en desarrollo)*, *CBP (Mundial)*, *Holos (CAN)*, *CAR livestock tools (US)*
- Herramientas orientadas a mercados y productos: estas calculadoras permiten comparar resultados de emisiones de GEI a nivel de producto (incluyendo la fases de producción y transporte) y no a nivel de territorio. De esta manera, se pueden comparar las emisiones resultantes de diferentes niveles de producción (independientemente del territorio donde se generen), de manera que no sean infravaloradas por haberse desplazado la producción a otro área. Los resultados se expresan en cantidad de GES.kg⁻¹ de producto. Ejemplos: *Cool farm tool (Mundial)*; *Dia'terre[®] (FR)*, programas ACV vinculados a bases de datos (*SimaPro[®]*, *Ecoinvent[®]*, *LCA food etc.*; datos disponibles principalmente para países occidentales).

Tabla 5: Clasificación de las calculadoras según sus objetivos y zona geográfica.

OBJETIVO DEL USUARIO		CALCULADORAS Y ZONA GEOGRAFICA
Sensibilización		Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture (NZ), Cplan v0 (UK), Farming Enterprise GHG Calculator (AUS), US cropland GHG calculator (USA)
Informes	Nivel territorial	ALU (mundial), Climagri (FR), FullCam (AUS)
	Nivel de explotación	CALM (UK); CFF Carbon Calculator (UK); Dia'terre® (FR); IFSC (USA)
Evaluación de proyectos	Enfocado en mercados de carbono	Carbon Farming tool (NZ), Farmgas (AUS), Forest tools : TARAM (mundial), CO2 fix (mundial)
	No enfocado en mercados de carbono	CAR livestock tools (USA), CBP (mundial), EX-ACT (mundial); Holos (CAN), US AID FCC (países en desarrollo)
Herramientas orientadas a mercados y productos		Cool farm tool (mundial), Diaterre® (FR), programas ACV y bases de datos asociadas (SimaPro, ecoinvent, LCA food, etc: principalmente para países occidentales)

AUS: Australia; CAN: Canadá; FR: Francia, NZ: Nueva Zelanda; UK: Reino Unido; USA: Estados Unidos; FullCam: calculadora utilizada en Australia para realizar inventarios nacionales. Solo contabiliza el carbono, no los flujos de N₂O o de CH₄. Se trata de una calculadora territorial con alto nivel de precisión, combinando extensas bases de datos con modelos biofísicos.

9.1 Del nivel de terreno al nivel nacional

Este estudio se centra en las calculadoras que permiten una evaluación a nivel territorial, considerando diversas actividades: agrícola, ganadera y forestal. Este enfoque va desde el nivel de una explotación, hasta el nivel estatal o regional. A escala de parcela o de explotación los datos técnicos son fáciles de conseguir, y pueden ser aportados directamente por el gestor. Además, existe poca variabilidad de itinerarios técnicos para cada cultivo. A medida que se amplía la escala de trabajo se necesitan estadísticas oficiales, por lo que puede resultar muy difícil conseguir datos detallados. A escala de paisaje puede ser necesario recurrir al conocimiento experto, lo que aumenta las incertidumbres. Sin embargo, no siempre aumenta el nivel de incertidumbre con la escala de trabajo: por ejemplo, es más fácil disponer de datos para una región administrativa (comarca, estado) que para una cuenca hidrográfica. El aumento de la escala también puede reducir la incertidumbre debida a importantes heterogeneidades locales (ej.: tipo de suelo, itinerarios técnicos), ya que éstas se equilibran al trabajar a nivel de datos promedio (Post et al., 2001).

Para realizar evaluaciones de GEI a nivel territorial, deben utilizarse calculadoras creadas específicamente para esa escala (Tabla 5). Sin embargo, si éstas no están

disponibles para la zona de estudio, puede ser necesario recurrir a calculadoras que funcionen a la escala de explotación y simular una "explotación de dimensiones regionales/nacionales". En estos casos es necesario estimar cuáles son las prácticas de gestión promedio, aunque puede ser necesario considerar múltiples sistemas de gestión (ej.: simulación de una explotación con sistemas de producción lechera tanto intensivo como extensivo), lo que no todas las calculadoras permiten. No son válidas para esta extrapolación las calculadoras que realizan cálculos a nivel de explotación con un nivel de detalle muy elevado. Estas herramientas pueden requerir datos demasiado específicos, que no estén disponibles a escala territorial, o que sean demasiado heterogéneos como para que el valor medio tenga sentido (ej.: datos precisos sobre maquinaria agrícola).

9.2 Zona de uso apropiado para las calculadoras

La adecuación geográfica de una calculadora puede ir del nivel regional (ej.: Queensland en Australia) al nivel mundial (ej.: EX-ACT). Algunos tipos de emisión son muy específicos de regiones concretas: quema de la sabana, gestión de los residuos de los cultivos, producción de arroz o humedales. Las calculadoras de ámbito geográfico global tienen que considerar todas estas fuentes, mientras que las calculadoras regionales se centran únicamente en las fuentes locales.

La disponibilidad de datos cambia mucho entre las diferentes regiones del mundo, por lo que las calculadoras a nivel global deben ceñirse a indicadores básicos e intentar incluir un enfoque económico, lo cual suele ser complejo. En cambio, las calculadoras a nivel regional se pueden construir más fácilmente, a partir de los datos que se sepa que estarán disponibles, integrando los indicadores económicos más relevantes. Las opciones de mitigación a promover dependen obviamente del contexto local (sistemas de producción, contexto socioeconómico, etc.), por lo que es más fácil proponer y evaluar planes de acción detallados para las calculadoras regionales que para las calculadoras globales. No obstante, y como se mencionó previamente, cada país tiene una capacidad de investigación para el desarrollo de calculadoras, de manera que las desarrolladas a nivel global son interesantes especialmente para aquellas áreas en las que la investigación local sea insuficiente.

10 Consideración del suelo y el clima

En agricultura, una gran parte de las emisiones depende de las condiciones ambientales locales, especialmente del tipo de suelo y clima. Estos parámetros tienen un impacto especialmente marcado en las emisiones de N₂O (proceso de nitrificación-denitrificación), así como para el potencial de almacenamiento de carbono en el suelo.

Un aspecto crucial de las calculadoras de actividades agrícolas es el cálculo adecuado de las emisiones del suelo. De hecho, el 40% de las emisiones agrícolas a nivel

global corresponden al N₂O del suelo, que es además el mayor sumidero de carbono, capaz de almacenar o emitir el equivalente a varios años de emisiones de origen antrópico (Baumert et al., 2005). El tiempo de almacenamiento del carbono en los el suelo puede variar entre unas semanas hasta varios miles de años.

A escala regional o local el clima es bastante homogéneo, aunque hay situaciones, como por ejemplo las zonas montañosas o las islas, en las que puede haber importantes variaciones climáticas a pequeña escala. Por otra parte, las prácticas agrícolas pueden tener una gran influencia sobre el microclima (ej.: presencia de setos, mantenimiento de los restos agrícolas sobre el suelo), lo cual afecta a los procesos biofísicos implicados en las emisiones de GEI, como por ejemplo la volatilización. Las calculadoras y los factores de emisión existentes no tienen suficiente precisión como para tener en cuenta el impacto del microclima en las emisiones del suelo.

También es importante considerar la posible heterogeneidad de los suelos a pequeña escala, especialmente el contenido en carbono, ya que está muy condicionado por las prácticas agrícolas. Por tanto, para reducir las incertidumbres del cálculo de las emisiones del suelo, el enfoque a nivel de la parcela es probablemente más apropiado que el enfoque a nivel de explotación o de región.

Para integrar adecuadamente los parámetros del suelo y del clima en el cálculo de las emisiones las calculadoras pueden emplear datos de diferente origen:

- datos específicos definidos por el usuario
- datos promedio regionales o nacionales
- bases de datos vinculadas a Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los datos más precisos se obtienen cuando el usuario describe el suelo y el clima en base a parámetros clave como la temperatura, precipitaciones, contenido de carbono del suelo, densidad aparente, textura, etc. Para que las cifras sean representativas, estos datos tienen que ser obtenidos mediante muestreos específicos de cada parámetro, diseñados en base a literatura científica (Post et al., 2001). Cuando el objetivo es evaluar la tasa de secuestro de carbono de una práctica concreta a escala de explotación, deben considerarse diferentes escalas temporales y espaciales (Bernoux et al., 2006). La cuantificación en laboratorio del carbono del suelo es complicada, lenta y cara. Sin embargo, los parámetros citados anteriormente (temperatura, precipitación, textura, etc.) se pueden medir fácilmente en campo y permiten utilizar modelos biofísicos (si están calibrados para esas condiciones) capaces de hacer una estimación fiable de las emisiones y del almacenamiento de carbono del suelo. Los principales modelos identificados para los cálculos de GEI en suelos son: Century-Daycent (Parton and Rasmussen, 1994; Del Grosso et al., 2001),

CERES-EGC (Gabrielle and Lehuger, 2009), RothC (Coleman and Jenkinson, 1999), DNDC (Giltrap et al., 2010), EPIC 5125 (Williams et al., 1984) y Socrates (Grace et al., 2006). Estos modelos funcionan considerando la dinámica de distintos reservorios de materia orgánica, que tienen una estabilidad variable. Estos modelos funcionan a escala de parcela, pero si están vinculados con bases de datos espaciales (SIG) también pueden utilizarse para cálculos a escala de paisaje como en los proyectos actuales de tipo GEFSOC y APEX. El VCS (Verify Carbon Standard, institución que valida los proyectos relacionados con los créditos de carbono) ha aprobado recientemente una metodología para evaluar la sostenibilidad de prácticas agrícolas (SALM), en la cual se utiliza el modelo Roth-C para estimar la evolución del contenido de carbono del suelo (VCS, 2012).

Para describir los suelos y el clima a nivel nacional las calculadoras suelen utilizar valores promedio, de acuerdo con el enfoque Tiers1 del IPCC. Sin embargo, estos promedios no contemplan la gran heterogeneidad que puede existir, por ejemplo, entre las regiones Mediterránea, Alpina y central en Francia. Por tanto, el uso de datos nacionales, cuando se trabaja a escala de una explotación, trae consigo grandes incertidumbres en los resultados.

Los SIG permiten crear mapas detallados de climas y suelos, así como de otros datos de base espacial de diferentes regiones del mundo. Al seleccionar una zona, el usuario accede a la base de datos correspondiente de clima y suelo, cuya precisión dependerá de su resolución (generalmente, la resolución para variables de suelo suele ser muy baja). Este enfoque es el más sencillo para el usuario, aunque la escala de trabajo no permite tener en cuenta las prácticas agrícolas pasadas. Actualmente, existen pocos mapas que contengan datos sobre el carbono del suelo y que puedan utilizarse para estimar su potencial de almacenamiento adicional. Sin embargo, la mayoría de los mapas suelen incluir parámetros del suelo que permiten calcular las emisiones de N₂O o de CO₂ mediante modelos. Las técnicas de proxy-detección (ej.: NIRS-MIRS) podrían permitir en el futuro realizar estimaciones del contenido de carbono de suelos y biomasa a gran escala con un bajo coste (Post et al., 2001; Gomez et al., 2008). El seguimiento de estos parámetros a lo largo del tiempo permitirá realizar estimaciones directas y precisas sobre las emisiones. Al contrario de la proxy-detección, las técnicas de teledetección con procesado de imágenes aéreas y satelitales tiene grandes limitaciones en zonas con vegetación permanente. Igualmente, a corto plazo, parece más complicado obtener herramientas de medida directa y de bajo coste de los flujos de N₂O y de CH₄ a escala de paisaje que en el caso del carbono.

Una metodología para la planificación y la verificación de la evolución del carbono del suelo a la escala regional fue descrita por Post et al. (2001). Por su parte, Saby et al. (2008) evalúan los requisitos para la contabilidad del carbono en cada país europeo, en base al mínimo cambio detectable relativo al secuestro de carbono. Estos estudios

describen en detalle la metodología para la toma de muestras del suelo, su análisis para cuantificar el carbono y cómo extrapolar hasta el nivel regional, para conseguir el mínimo de incertidumbre posible. Aún está pendiente que la mayoría de países establezcan sistemas de seguimiento capaces de evaluar de manera precisa la evolución del contenido de carbono del suelo anualmente, si bien se ha conseguido una fiabilidad aceptable para intervalos de 10 años (Saby et al., 2008).

Un aspecto importante relativo al almacenamiento de carbono en los suelos es la profundidad considerada. Actualmente el IPCC exige que los inventarios nacionales consideren un mínimo de 30 cm de profundidad, si bien menciona que en determinadas condiciones, como por ejemplo en suelos tropicales profundos, puede haber grandes cambios a profundidades de 30-50 cm (IPCC, 2006). Este límite de 30 cm está definido por cuestiones prácticas (toma de muestras), siendo además la profundidad de laboreo más común. Dado que las raíces de los cereales pueden llegar a más de un metro de profundidad, y que las de los árboles alcanzan varios metros, es evidente que, incluso en áreas templadas, existen procesos relacionados con la dinámica de nutrientes y con el almacenamiento de carbono que ocurren por debajo de 30 cm de profundidad (Guo and Gifford, 2002). Por ejemplo, algunos autores han medido grandes cantidades de carbono hasta 3 m de profundidad, sugiriendo que hasta un 50% del carbono del suelo podría estar por debajo de 30 cm de profundidad (Jobbágy and Jackson, 2000; Salomé et al., 2010). Esto ocurre de manera significativa, por ejemplo, en los sistemas agroforestales, en los que las raíces de los árboles crecen por debajo de las del cultivo agrícola, así como en las praderas con alta tasa de reposición de raíces profundas (Ramachandran Nair et al., 2009). Parece necesario mejorar en el futuro el cálculo del carbono existente en los horizontes profundos del suelo, especialmente si se tiene en cuenta que este carbono puede quedar almacenado por más tiempo que en el caso de los horizontes superficiales, debido a la menor actividad biológica en profundidad. Se cree que los mecanismos relacionados con la dinámica del carbono son distintos en los horizontes profundos y en las capas superficiales. Por ejemplo, algunos estudios recientes observan que, en horizontes profundos, los aportes de materia orgánica fresca dan lugar a una disminución del contenido de carbono estable, debido probablemente al aumento resultante en la actividad biológica, que degrada tanto la materia fresca como el reservorio de carbono estable (Fontaine et al., 2007). Este fenómeno se conoce como "priming effect" y por el momento no está contemplado en los modelos actuales. En general, hay que interpretar con precaución los modelos relacionados con la materia orgánica del suelo, ya que pueden ser aplicados para profundidades mayores o menores de 30 cm (Post et al., 2001). El incremento de la precisión que se conseguirá en las futuras calculadoras al integrar estas dinámicas (carbono profundo, "priming effect" etc.) debe ponderarse con el mayor coste de obtención de los datos. Por tanto, su consideración dependerá del objetivo de cada calculadora.

Los suelos saturados de agua (principalmente, humedales), también llamados suelos orgánicos, merecen una atención especial. Por un lado, contienen una gran cantidad de carbono, pero también son una fuente importante de emisiones de CH₄, debido a las condiciones anaeróbicas. Las emisiones de los suelos saturados de agua son el resultado de complejos equilibrios entre los procesos de metanización y oxidación, que dependen de las comunidades bacterianas del suelo, de la vegetación y de las propiedades físicas del suelo. El drenaje de suelos para ser destinados a la producción agrícola suele comportar una disminución de las emisiones de CH₄ y un aumento de las emisiones de N₂O y CO₂, mientras que la recuperación de humedales resulta en procesos opuestos (Le Mer and Roger, 2001; Couwenberg, 2009; Couwenberg and Fritz, 2012). Estos fenómenos deben ser contemplados por las calculadoras utilizadas en áreas con suelos saturados de agua (Tabla 5). Los valores proporcionados por el IPCC tienen una gran incertidumbre y han sido cuestionados (Couwenberg, 2009). Hasta el momento no se ha identificado ninguna calculadora que integre modelos biofísicos para estas condiciones, lo que incrementaría la precisión de las estimaciones. La otra gran fuente de CH₄ es la producción de arroz, un cultivo muy estudiado y del cual muchas calculadoras incluyen un módulo específico, dada su importancia económica. (Tabla 6).

Los procesos de urbanización con la consecuente pérdida de terreno agrícola es común a una gran parte de las regiones del mundo. Sin embargo, se dispone de poca información relacionada con la dinámica del carbono tras un proceso de urbanización (Pouyat et al., 2002). Ninguna de las calculadoras actuales tiene en cuenta este proceso, aunque en algunas de ellas se puede asimilar los terrenos urbanizados a los suelos degradados.

La comunidad científica aún no se ha puesto de acuerdo sobre las principales causas de emisión de carbono del suelo. El impacto de las prácticas agronómicas sobre el carbono acumulado en el suelo parece evidente y está incluido en varias calculadoras (ej.: EX-ACT). Sin embargo, el incremento del carbono del suelo debido a cambios de técnicas agronómicas, tal como técnicas sin laboreo, depende de las condiciones locales (especialmente pH y disponibilidad de oxígeno), y podría ser compensado parcialmente o totalmente por un aumento de las emisiones de N₂O o de CH₄ (Rochette, 2008; Labreuche et al., 2011). Ninguna calculadora considera este aspecto. Estudios recientes también sugieren que el potencial de almacenamiento de carbono en el suelo ha podido ser sobre-estimado, especialmente en Europa y para técnicas sin laboreo o de siembra directa (Powlson et al., 2011). Los terrenos con más potencial de secuestro de carbono serían los suelos degradados, presentes especialmente en el Hemisferio Sur. Smith et al. (2008) estiman que el 75% del potencial de secuestro terrestre de carbono se encuentra en los países en vías de desarrollo. Lo que es claro y muy importante es que el aumento de materia orgánica de los suelos permite una mayor retención de agua y nutrientes, y mejora la

fertilidad global de los sistemas (Hunt et al., 1996; Rawls et al., 2003; Lal, 2006). Estas retroalimentaciones positivas no se incluyen de momento en las calculadoras de GEI. Los desarrolladores de EX-ACT están trabajando en un módulo para el agua y el carbono con este objetivo, pero todavía faltan referencias cuantitativas para relacionar el aumento de carbono en el suelo con el aumento de la productividad en cada ecosistema (Bernoux 2012, comunicación personal).

Por último, algunos estudios sugieren que, a nivel global, la causa principal de pérdida de carbono del suelo sería el cambio climático (Bellamy et al., 2005). Por tanto, sería interesante que las calculadoras consideraran no solo el clima actual para las estimaciones de GEI relacionadas con el suelo, sino también el clima futuro y su impacto sobre de la actividad biológica de los suelos. Con este objetivo, podrían emplearse modelos climáticos globales (Cubasch et al., 2001; Ruosteenoja et al., 2003; Marti et al., 2005; Wang, 2005).

11 Parámetros considerados por las calculadoras

Un aspecto fundamental destacado por este estudio es la falta de homogeneidad en cuanto a los parámetros considerados por las diferentes calculadoras: energía, infraestructuras y transportes, especies fijadoras de nitrógeno, carbono del suelo, etc. Esto impide la comparación directa de estudios realizados por distintas calculadoras. Para facilitar la interpretación de los resultados los usuarios necesitan disponer de valores de referencia (ej.: emisiones media por hectárea de cereales en Europa), que no suelen ser proporcionadas por las guías de usuario. Estas referencias no estarán disponibles hasta que no se realice una estandarización de las metodologías.

Estas diferencias en cuanto a los parámetros considerados puede tener una gran incidencia sobre el resultado final, especialmente si algunas calculadoras tienen en cuenta el carbono secuestrado en el suelo y otras no (Soil Association Producer Support, undated). Sin embargo, en general las calculadoras suelen tener en cuenta las principales fuentes de GEI, por lo que las variaciones metodológicas tienen un impacto limitado según los estudios comparativos de un mismo proyecto con distintas calculadoras (Soil Association Producer Support; FAO, 2010). Los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) indican que la fase agrícola es la que da lugar a mayores emisiones de GEI en la mayoría de los productos alimentarios (Weber and Matthews, 2008; Roy et al., 2009; Virtanen et al., 2010) en comparación con el transporte (excepto si es aéreo), la transformación y el envasado (excepto si el recipiente es metálico o de vidrio).

El aspecto más importante que no tienen en cuenta muchas de las calculadoras son las emisiones y el secuestro de CO₂ en el suelo y la biomasa cuando se produce un cambio de uso del suelo, debido a cuestiones prácticas, complejidad metodológica o

aspectos de permanencia (cambio de uso reversible). El cambio de uso del suelo puede tener un gran impacto en los resultados, especialmente cuando ocurre entre bosque/praderas y cultivos/urbanización. A escala global, la deforestación representa el 11% de las emisiones de GEI antrópicas (Van der Werf et al., 2009). En condiciones europeas y para un marco temporal de 20 años, las emisiones de carbono del suelo y la biomasa después de un cambio de uso de pradera a cultivo son similares a las generadas por la producción posterior de trigo, incluyendo el uso de carburantes, fertilizantes, etc. (Figura 1). Pasados estos 20 años, el suelo alcanza un nuevo equilibrio y solo tienen lugar las emisiones debidas a la producción (Arrouays et al., 2002; Guo and Gifford, 2002).

Un cambio directo de uso del suelo (dLUC) puede contabilizarse de manera bastante objetiva: si un proyecto supone un cambio de uso para un territorio concreto, se puede evaluar la evolución del contenido de carbono resultante. Sin embargo, este cambio de uso también puede afectar a otros territorios, si se tiene en cuenta que la demanda de alimentos no es flexible. Por otro lado, los cambios de usos del suelo no solo dependen del equilibrio entre oferta y demanda, sino también de múltiples parámetros socio-económicos. La producción puede ser incrementada mediante el aumento del rendimiento por hectárea (cambio de la gestión) o bien mediante la ampliación de la superficie cultivada. Frecuentemente los factores que determinan en mayor medida los cambios de usos del suelo pueden ser el acceso a la propiedad, la capacidad productiva y de inversión o las regulaciones, más que la demanda de alimentos a nivel global o local. De esta manera, es muy difícil establecer una relación causal clara entre los cambios de usos del suelo en un territorio y las consecuencias resultantes en otro, que en ocasiones está situado a miles de kilómetros (ej.: bioenergía, producción de soja para la ganadería europea). Estos cambios de usos del suelo, llamados indirectos (iLUC) pueden ser calculados mediante modelos económicos o por evaluación consecucional, en los que las hipótesis se basan en conocimiento experto. Aunque se puedan trazar claramente las interacciones, es muy difícil cuantificarlas, lo cual supone un gran desafío para la evaluación ambiental (Lambin et al., 2001; Veldkamp and Lambin, 2001; Lapola et al., 2010; Plevin et al., 2010; De Cara et al., 2012). Hasta el momento las calculadoras solo tienen en cuenta los cambios de usos del suelo directos.

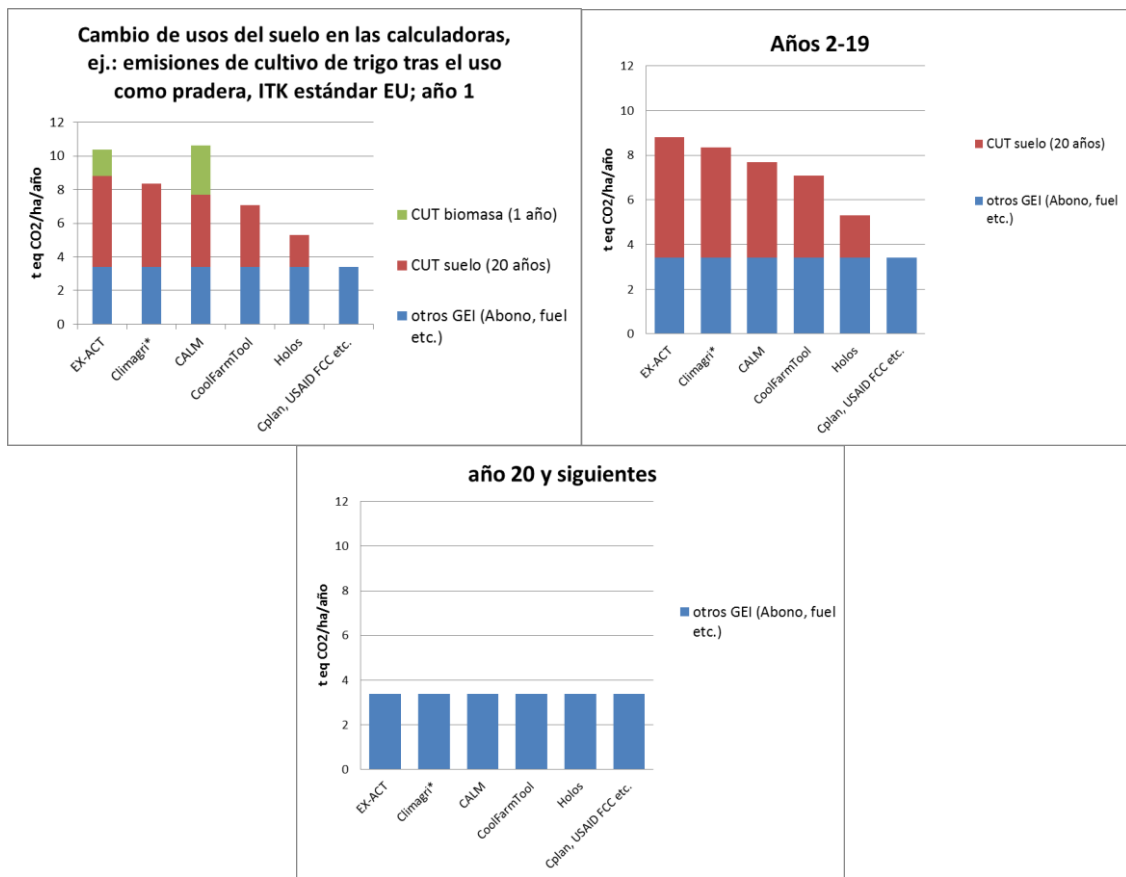


Figura 1 Fuentes de emisión de cultivo de trigo tras el cambio de uso de suelo

La manera de calcular las emisiones de N_2O es diferente en función de las calculadoras utilizadas, pudiendo impactar significativamente en los resultados. El IPCC recomienda que todas las emisiones de N_2O que resultan de la modificación antrópica del ciclo del nitrógeno se tengan en cuenta. Los aportes de N antrópicos son los abonos sintéticos, las deyecciones animales y otros abonos orgánicos, la fijación biológica del N por parte de cultivos leguminosas, el depósito de N y la mineralización de residuos de cultivos dejados en el campo. Las cantidades de N_2O emitidas dependen de las condiciones edafoclimáticas locales que influyen en los procesos de nitrificación-denitrificación (IPCC, 2006). En relación a la fijación de N biológica, el IPCC considera que no existen evidencias de emisión de N_2O , por lo que esta fuente puede ser ignorada. En lo que se refiere a las calculadoras, algunas consideran todas las fuentes de N mencionadas, mientras que otros solo calculan los abonos minerales y/o orgánicos. De este modo, es muy importante comprobar qué fuentes de N se consideran en las calculadoras, e indicarlo claramente en los resultados.

La otra gran diferencia en el cálculo de las emisiones de N_2O edáfico es la diferenciación entre emisiones directas e indirectas. Las emisiones directas son las que ocurren en el terreno debidas al aporte de nitrógeno, mientras que las emisiones indirectas resultan del desplazamiento de parte de esos aportes de N hacia las capas

profundas del suelo y las aguas superficiales. Los procesos responsables de las emisiones indirectas son el lavado, la escorrentía superficial, la volatilización de amoníaco u óxidos de nitrógeno y la deposición del N en otros lugares. Al final, las emisiones indirectas pueden llegar a ser tan importantes como las emisiones directas en los sistemas intensivos (Hénault et al., 1998; Mosier et al., 1998). Hay que tener especial cuidado cuando se diferencian las emisiones directas e indirectas para evitar contar dos veces las fuentes de N. Algunas calculadoras hacen esta diferencia y otras no. Por el momento es posible identificar cada proceso en el ciclo del N pero aún falta identificar los factores de emisión específicos para cada uno de ellos, de modo que esta separación no impacta significativamente en los resultados. El hecho de tener en cuenta de manera diferenciada las emisiones directas e indirectas mejora la precisión, pero es principalmente la consideración de todas las fuentes de N lo que más influye en el resultado final. También aquí, la manera más adecuada de mejorar la precisión de las estimaciones de emisiones de N₂O es probablemente a través de modelos de procesos. Estos modelos podrían proporcionar factores de emisión más exactos, o estar integrados en las calculadoras para estimar los flujos de N₂O.

Los sistemas agroforestales son especialmente difíciles de analizar con la mayoría de las calculadoras. El IPCC no proporciona factores de emisión o metodologías específicas para estos sistemas. De hecho, la mayoría de las calculadoras consideran un sistema de cultivo de tipo anual yuxtapuesto a un sistema perenne o forestal. Este método no tiene en cuenta las interacciones entre los cultivos y los árboles, con un impacto importante en la evolución de la reserva de carbono y de los ciclos de nutrientes. En este estudio, las calculadoras definidas como "incluyendo sistemas agroforestales" son aquellas en las que los usuarios pueden definir claramente el sistema agroforestal.

Las calculadoras incluyen a menudo la transformación en la explotación después de la cosecha, pero frecuentemente se encuentra mal identificada. En efecto, los mayores procesos de transformación en la explotación son: secado, calentamiento o enfriamiento y a veces otras formas de elaboración para su consumo. Estos procesos se pueden calcular a través de módulos de consumo de energía de gas y electricidad. Las emisiones derivadas del uso de materiales y máquinas asociadas no se registran. En las calculadoras podría mejorarse el cálculo de estos aspectos relacionados con la transformación, ya que podrían permitir reducciones de GEI significativas, por ejemplo mejorando el funcionamiento de los sistemas de enfriamiento de los tanques de leche, o recurriendo a energía renovable para proceder al secado del heno. El potencial de reducción de GEI en actividades de transformación dependerá a menudo del impacto de los GEI provenientes de la mezcla eléctrica local (por ejemplo, será muy emisiva si procede enteramente del carbón).

Tabla 6a Actividades consideradas en las calculadoras

Herramienta	Cultivos templados	Cultivos tropicales	Arroz	Praderas	Producción lechera (bovinos)	Otros animales	Árboles aislados, setos, producción agroforestal	Producción perenne (huertos, viña)	Horticultura y producción de invernaderos	Bosque
AFD calculator	x	x	no	x	x	x	no	no	no	no
ALU	x	x	x	x	x	x	x	x	no	x
CALM	x	no	no	x	x	x	no	x	no	x
Carbon benefit project CPB	x	x	x	x	x	x	x	x	no	x
Carbon Calculator for NZ	x	no	no	x	x	x	no	x	no	no
Carbon Fming Group Calc.	x	no	no	x	x	x	no	no	no	x
CFF Carbon Calculator	x	no	no	x	x	x	x	x	x	x
Climagri®	x	no	no	x	x	x	x	x	x	x
CoolFarmTool	x	x	x	x	x	x	no	x	x	x
CPLAN v2	x	no	no	x	x	x	no	x	no	x
Dia'terre®	x	no	no	x	x	x	x	x	no	no
EX-ACT	x	x	x	x	x	x	no realmente	x	x	x
FarmGAS	x	no	no	x	no	x	x	x	parcialment	no
Farming Enterprise	x	x	no	x	x	bovinos + ovinos	no	no	no	no
FullCAM	x	x	no	x	no	no	no	no	no	x
Holos	x	no	no	x	x	x	x	x	no	no
IFSC	x	no	no	x	x	x	no	no	parcialment	no
USAID FCC	x	x	no	x	x	X menos aves	x	x	no	x

Tabla 6b Fuentes de GEI consideradas

Calculadoras	Infraestructuras CO ₂	CO ₂ de carburantes fósiles y electricidad	Emisiones de N ₂ O edáfico tras aplicación de abonos minerales u orgánicos	Emisiones de CH ₄ entérico	CH ₄ derivado de deyecciones	N ₂ O debido a la fijación biológica por parte de las leguminosas.	N ₂ O debido al N de los residuos	Emisiones incorporadas (abonos, forrajes y concentrados, etc.)
AFD calculator	x	x	x	x	x	no	no	x
ALU	no	no	x	x	x	no	x	no
CALM	no	x	x	x	x	x	x	solo abonos
Carbon benefit project CPB	no	no	x	x	x	no	x	no
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	no	X	x	x	x	no	no	x
Carbon Farming Group Calculator	no	x (calc. asociado)	x (no abonos orgánicos)	x	x	no	no	no
CFF Carbon Calculator	x (la más detallada)	x	x	x	x	x	x	x
Climagri®	máquinas, no edificios	x	x	x	x	no	x	x
CoolFarmTool	no	x	x	x	x	x	x	x
CPLAN v2	no	x	x	x	x	x	x	no
Dia'terre®	x	x	x	x	x	no	x	x
EX-ACT	x	x	x	x	x	no	no	sí: abonos no: forrajes
FarmGAS	no	no	x	x	x	x	x	no
Farming Enterprise Calculator	no	x (carburante, no electricidad)	x	x	x	no	no	no
FullCAM	no	no	no	no	no	no	no	no
Holos	no	x	x	x	x	no	x	x
IFSC	no	x	x	x	x	no	no	si: abonos no: forrajes
USAID FCC	no	no	no	no	no	no	no	no

Calculadoras	Emisiones de GEI de quema de biomasa excepto CO ₂	CH ₄ proveniente del cultivo de arroz	Evolución de C edáfico tras cambio de uso de tierra (CUT)	Evolución de C en biomasa aérea y subterránea tras CUT	Evolución de C edáfico tras cambio de gestión (laboreo, residuos)	CH ₄ proveniente de humedales	Transformación fuera de la explotación (CO ₂ principalmente, pero también HFC, PFC etc.)	CO ₂ proveniente del transporte	Producción de energía renovable (solar, eólica, biocarburantes, etc.)
AFD calculator	no	no	no	Solo deforestación	no	no	no	x	no
ALU	x	x	x	x	x	x	no	no	no
CALM	no	no	x	X (bosque)	no	x	no	no	x
Carbon benefit project CPB	x	x	x	x	x	x	no	no	no
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	no	no	no	no	no	no	no	no	no
Carbon Farming Group Calculator	no	no	no	x (bosque)	no	no	no	no	no
CFF Carbon Calculator	no	no	x	x	x	x	x	x	x (sin detalles)
Climagri®	no	no	no, posibilidad de cálculo indirecto	x	no	no	no	no	no (solo biodiésel + biogas)
CoolFarmTool	x	x	x	x	x	no	x	x	x
CPLAN v2	no	no	x	x	no	no	no	no	no
Dia'terre®	no	no	x	no	no	no	no	no	x
EX-ACT	x	x	x	x	x	x	no	no	no
FarmGAS	x	no	no	x (biom.aérea)	no	no	no	no	no
Farming Enterprise Calculator	no	no	no	no	x solo residuos (modelo "Socrate")	x	no	no	no
FullCAM	no	no	x	x	x	no	no	no	no
Holos	no	no	Solo suelos agrícolas : cultivo/pradera/barbecho ; no deforestación	x (biom.aérea)	x (modelo Century)	x	no	no	no
IFSC	no	no	x (solo de praderas a cultivos anuales, modelo COMET-VR)	parcialmente	x (modelo cf COMET-VR)	x	no	x	x
USAID FCC	x	x	no	x	x	X	no	no	no

12 Resultados

Los resultados se expresan en distintas unidades tonelada equivalente CO₂ (t-CO₂eq).año⁻¹; t-CO₂eq.proyecto⁻¹ (varios años); t-CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹; t-CO₂eq.kg de producto⁻¹, etc. (Tabla 7). También se pueden expresar los resultados en valor neto (Emisión – Captación) o bien con los dos valores. El usuario debe prestar atención y no confundir toneladas de carbono con toneladas de CO₂ (factor 44/12). Algunas calculadoras proporcionan resultados solo para una situación, mientras que otras comparan la situación actual con otra “con proyecto” y otra “sin proyecto” (también llamada “*business as usual*”). La unidad utilizada en el resultado influye en la interpretación del cálculo de GEI..

Teniendo en cuenta el contexto global, en el que se aprecia una demanda en aumento y posibles riesgos de transferencias de polución, parece pertinente distinguir la “agricultura industrial” de la “agricultura de subsistencia”.

Se considera que la agricultura industrial está orientada hacia los mercados, es muy productiva y proporciona una parte importante de la alimentación mundial. El reto principal para esta agricultura es utilizar de manera más eficaz los aportes y reducir la huella de carbono por kg de producto. Así, los resultados de las evaluaciones ambientales para los sistemas agrícolas deberían estar siempre relacionadas de algún modo con el nivel de productividad, es decir con indicadores del tipo t-CO₂eq. Kg de producto⁻¹; t-CO₂eq. Kg MS⁻¹ (materia seca); t-CO₂eq.caloría⁻¹; t-CO₂eq. proteínas⁻¹ etc. Varias calculadoras desarrollan este enfoque: las herramientas de ACV (Análisis de Ciclo de Vida), las calculadoras de GEI por kg de producto, Climagri[®] con un “Indicador del Potencial Alimentario del Territorio”, etc. Estas metodologías necesitan “reglas de asignación de carga” o indicadores de productividad muy generales (por ejemplo, materia seca) para las explotaciones con más de una producción: por ejemplo leche y carne, bioenergías con subproductos (Hospido et al., 2003; Schau and Fet, 2008; Cherubini et al., 2009), etc. Estos resultados indican la eficiencia de la producción. El hecho de no considerar los niveles de productividad resulta en un gran riesgo de transferencia de impactos. De hecho, los proyectos que disminuyan las emisiones de GEI proporcionalmente a la productividad inducirán un aumento de las emisiones en otros territorios, y pueden incluso llegar a degradar el balance global si como consecuencia de esto ocurre un cambio de uso de suelo.

Una de las maneras más eficaces para reducir el impacto ambiental de la agricultura es reducir las pérdidas. En los países en desarrollo las pérdidas después de la cosecha y la comercialización continúan siendo muy elevadas. Mejorar la capacidad de almacenamiento, optimizar las cadenas logísticas y conseguir una gestión bien planificada constituyen opciones eficientes y ambientalmente responsables para disminuir el impacto de la agricultura. Aunque ninguna de las calculadoras incluye este aspecto de momento, podría integrarse estimando el rendimiento a nivel del consumidor en vez de hacerlo a nivel del campo o de explotación.

Por el contrario, en los proyectos orientados hacia el desarrollo rural, la productividad agrícola no es una preocupación global sino más un reto socioeconómico local, pues el objetivo principal es mejorar el bienestar y las condiciones de vida de las poblaciones. Por ello, el indicador t-CO₂eq. Kg de producto⁻¹ no es el más apropiado en este caso, siendo otros indicadores más orientados hacia criterios socioeconómicos más adecuados, tales como t-CO₂eq.\$⁻¹; t-CO₂eq.empleos creados⁻¹; t-CO₂eq.punto de IDH (Índice de Desarrollo Humano), etc. Por otro lado, sería interesante establecer vínculos con las metodologías utilizadas en ACV social (Feschet et al., 2010). Estos indicadores permitirían promover la senda hacia el desarrollo de bajo impacto de carbono para los países con bajo nivel de ingresos. No se ha identificado ninguna calculadora de GEI que presente este enfoque. Por el momento, las calculadoras para los pequeños productores de países en vías de desarrollo se dedican principalmente a proyectos de créditos de carbono y a estudiar opciones para obtener beneficios económicos a cambio de reducción de emisiones en función del escenario "línea de base".

También es posible articular las calculadoras de GEI con herramientas económicas. Así, EX-ACT ha sido utilizada con "curvas de costes marginales de reducción", que proporcionan información sobre el coste de las medidas de mitigación en función de las opciones escogidas. Estos estudios permiten indicar qué acciones son favorables a nivel económico, cuáles tienen un coste aceptable y cuáles son inadecuadas. Los estudios económicos indican que el secuestro de carbono y la reducción de la deforestación se encuentran entre las opciones más eficaces para luchar contra el cambio climático (Smith et al., 2008). Algunos estudios estiman el potencial de mitigación de GEI para diferentes precios del carbono, mostrando el efecto que podrían tener los impuestos sobre el carbono o un mercado de carbono. Así Smith et al. (2008) encontraron un potencial de reducción de 0,64; 2,24 y 16 Gt CO₂-eq.año⁻¹ a un precio de 20, 50 o 100 US\$.tCO₂⁻¹. Dado que las emisiones mundiales de 2004 llegaron a 49 Gt CO₂-eq.año, esos valores indican una reducción teórica del 30% de las emisiones anuales para un precio de 100\$ por tonelada de carbono.

Finalmente, las calculadoras de GEI son herramientas de evaluación ambiental mono-criterio. Cuando se analizan los resultados de GEI y se consideran acciones de mitigación, hay que tener presentes los posibles efectos colaterales negativos (C-AGG, 2010). En efecto, algunas soluciones que reducen la huella carbono pueden afectar a la biodiversidad (ej.: grandes plantaciones para biocarburantes), aumentar el consumo de agua o inducir riesgos sanitarios (ej.: hormonas de crecimiento). El desarrollo de actividades agrícolas y forestales más sostenibles implica la utilización de modelos de gestión que reduzcan la huella ambiental global de los productos. Se están desarrollando además otros métodos multi-criterio, como los ACV o los análisis de evaluación de impactos, que se pueden combinar con el cálculo de carbono.

Tabla 7: Tipos de resultados proporcionados por las calculadoras

Calculadoras	GEI/ha	GEI/producto ej.: GEI/ kg trigo, GEI/1000 l leche)	GEI/proyecto, comparación de escenarios	Otros resultados (únicamente GEI por granja/territorio)
ALU				X
Calculateur AFD			X	X
CALM				X
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	X	X		
Carbon Farming Calculator				X
CBP; carbon benefit project	X		X	
CFF Carbon Calculator				X
Climagri®	X			
CoolFarmTool	X	X		
CPLAN v2				X
Dia'terre®	X	X		
EX-ACT	X		X	
FarmGAS	X	X	X	
Farming Enterprise Calculator				X
Full CAM				X
Holos	X		X	
IFSC				X
USAID FCC			X	

*Las calculadoras se clasifican según el tipo de resultado mostrado. La mayoría de las calculadoras presenta cierta flexibilidad, y en ocasiones es posible comparar proyectos, explotaciones o calcular resultados en GEI.kg de producto⁻¹. Para ello puede ser necesario exportar los datos y hacer cálculos adicionales. Algunas calculadoras como Climagri® proporcionan indicadores de productividad alternativos al GEI.kg de producto-1, como indicadores sobre la productividad del territorio ("Potencial Alimentario").

13 Incertidumbres

La incertidumbre es un amplio campo de investigación; de hecho, se están desarrollando varios trabajos en este sentido, basados en estadísticas y técnicas de clasificación avanzada (Rypdal and Winiwarter, 2001; Winiwarter and Rypdal, 2001; Gibbons et al., 2006; Ramírez et al., 2008; C-AGG, 2010). La idea de este capítulo no es proporcionar una información detallada sobre el cálculo de las incertidumbres sino cómo se utilizan en las calculadoras y cómo deben mencionarse los usuarios finales.

La incertidumbre global resulta de tres tipos de incertidumbres: las incertidumbres sobre los datos de actividad (derivados del inventario o toma de datos de entrada), las incertidumbres debidas a la variabilidad interanual (clima y prácticas agronómicas) y las incertidumbres sobre los factores de emisión (caracterización) (Gibbons et al., 2006). Las incertidumbres pueden resultar muy altas en el sector agrícola, por encima de 100% según la fuente de emisión considerada. Lo cierto es que solo algunas calculadoras mencionan estas incertidumbres.

A escala de la explotación, hay pocas incertidumbres en los datos de entrada porque se consiguen directamente del agricultor. A escala territorial o regional, los datos provienen de medias estadísticas o de conocimiento experto, por lo que las incertidumbres pueden ser bastante elevadas. Las calculadoras nunca estiman las incertidumbres sobre los datos de actividad, sino que es el usuario el que tiene que conocerlas. No siempre es fácil estimar el impacto de estas incertidumbres en el resultado final. Una manera de reducirlo es realizar un proceso iterativo, asegurándose de que la calidad de los datos de actividades con gran impacto en el resultado es máxima, como por ejemplo en el número de animales o las cantidades de abonos nitrogenados.

La incertidumbre interanual se puede reducir usando datos climáticos y prácticas de gestión que representen la media de un período de varios años. La variación climática intra-anual (por ejemplo, la distribución de las precipitaciones) que interfiere con las prácticas agronómicas también genera incertidumbre, pero como las calculadoras trabajan con períodos anuales, no es posible tenerlas en cuenta. Por ejemplo, debido a diferentes condiciones climáticas, para la misma cantidad de nitrógeno, las tasas de nitrificación-denitrificación pueden variar de un año a otro. Solo los modelos biofísicos que trabajen con intervalos diarios o mensuales podrían tenerlo en cuenta — mientras que las calculadoras que funcionan a escala anual no pueden hacerlo.

Por último, las calculadoras mencionan a menudo las incertidumbres de los factores de emisión. El IPCC proporciona, para cada factor de emisión, valores de incertidumbre que pueden ser muy elevados, como en el caso del N₂O emitido después del aporte de abono nitrogenado (IPCC, 2006) (Figura 2). Pasar de un enfoque Tiers 1 a Tiers 3 permite reducir estas incertidumbres.

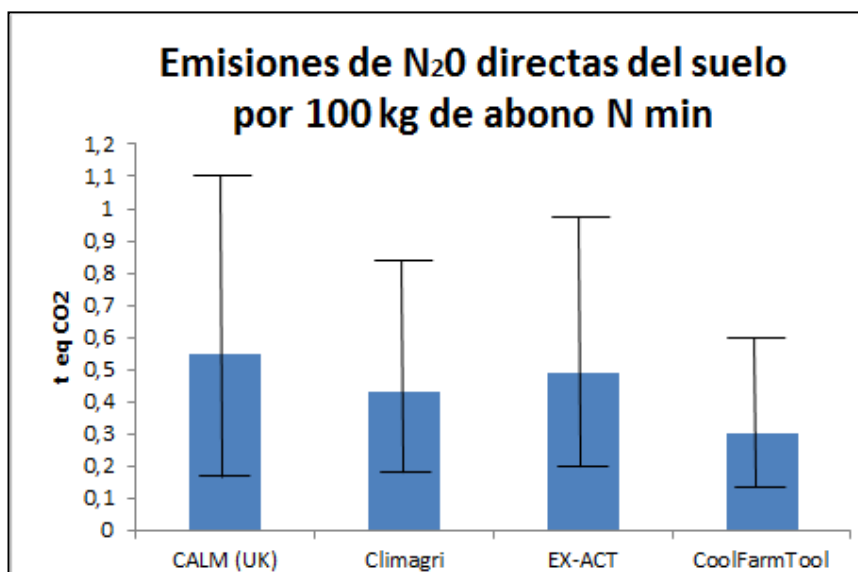


Figura 2 Incertidumbres en las emisiones de N₂O después del aporte de N.

Dado el alto nivel de incertidumbre en el sector agrícola y forestal, ésta debe ser mencionada, especialmente cuando se comparan dos proyectos o dos territorios (Tabla 8). No obstante, para permitir una adecuada interpretación, los usuarios deben conocer las causas de las incertidumbres y cómo interpretarlas. El nivel aceptable de incertidumbre depende de la pregunta que se formule; a escala territorial las preguntas suelen ser más generales que las que se formulan a escala de explotación, por lo que se puede aceptar un mayor nivel de incertidumbre.

Tabla 8 Las incertidumbres en las calculadoras

Calculadoras*	Ningún valor proporcionado	Estimación cuantitativa de las incertidumbres
ALU	x	
Calculateur AFD	x	
CALM	x	
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	x	
Carbon Farming Calculator	x	
CBP; carbon benefit project		x
CFF Carbon Calculator	x	
Climagri®	x	
CoolFarmTool	x	
CPLAN v2		x
Dia'terre®	x	
EX-ACT		x
FarmGAS		x
Farming Enterprise Calculator		x
Full CAM	x	
Holos	x	
IFSC	x	
USAID FCC	x	

* Varios desarrolladores incluirán la incertidumbre en las próximas versiones de sus herramientas (por ejemplo, ALU, a mediados del 2012).

14 Contexto económico y político sobre las calculadoras de GEI

Este estudio destaca el alto nivel de incertidumbre asociado a los resultados y las variaciones metodológicas significativas existentes entre las calculadoras. Sin embargo, todas las calculadoras proporcionan órdenes de magnitud coherentes y permiten identificar las principales fuentes de emisión, con la única excepción del cambio de uso del suelo. Este nivel de detalle se puede considerar como suficiente por el momento, dado que las reducciones de emisiones y el secuestro de carbono son principalmente de carácter voluntario, con escaso impacto económico, incluso teniendo en cuenta los créditos de carbono. Así, las calculadoras son sobre todo herramientas de sensibilización, con una precisión suficiente teniendo en cuenta la trascendencia moderada de los resultados, y teniendo en cuenta que las opciones de mitigación ya son conocidas por los expertos.

Esto podría cambiar si:

- Los responsables de la elección de proyectos de desarrollo integrasen fuertes criterios de emisión de CO₂ para su financiación.
- El mercado de carbono integrase los sectores agrícola y forestal, con costes y beneficios significativos asociados a sus emisiones y secuestro de carbono.
- Se desarrollase el etiquetado ambiental y fuese obligatorio en grandes mercados, proporcionando así ventajas comerciales comparativas.
- Se implementasen impuestos ecológicos y barreras comerciales en grandes mercados.

Si una o varias de estas opciones políticas fuesen implementadas, las metodologías utilizadas en las calculadoras, los desplazamientos de impactos y especialmente las incertidumbres se convertirían en retos de gran magnitud.

Los proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) han sido criticados por su complejidad y sus elevados costes de transacción. Al mismo tiempo, se desarrolló un sistema de créditos de carbono voluntario con metodologías simplificadas. Esto demuestra lo importante que es encontrar un balance entre exactitud y complejidad. Una metodología estandarizada con elevadas incertidumbres puede ser temporalmente aceptable, pero impide comparar distintos sectores; además penaliza las inversiones para la mitigación en el sector agrícola y las deriva hacia sectores con mayor potencial de ahorro de energía y menores incertidumbres, como el caso del transporte o de la construcción (Driver et al., 2010b). Para comprobar las acciones de mitigación, se puede comprobar la evolución real del balance de GEI, o solo comprobar las buenas prácticas. Por ejemplo, en Estados Unidos, la bolsa de créditos de carbono de Chicago prefirió pagar a los agricultores para que realizasen prácticas

de cultivo responsables en relación a los GEI, en vez de medir los ahorros de carbono realmente obtenidos.

La implementación de regulaciones para frenar el cambio climático es un proceso de doble sentido. Siempre que la voluntad política sea débil, habrá poco interés en desarrollar herramientas detalladas y complejas; pero, por otro lado, si las metodologías y herramientas fiables no están disponibles, los responsables no pueden obligar a los actores económicos a orientar sus decisiones hacia la reducción de la huella de carbono. Así, ambas medidas — una legislación más firme y el desarrollo de herramientas fiables — son necesariamente complementarias.

También existe una fuerte complementariedad entre el cambio climático y la seguridad alimentaria. A largo plazo, frenar el cambio climático protege las zonas agrícolas más vulnerables, especialmente los agrosistemas de zonas semiáridas. Esta situación se revela como un reto global, no solo de la responsabilidad de los países más afectados, que no siempre son los que más emiten. Por otro lado, el secuestro de carbono en los suelos es un método local muy eficaz de aumentar la resiliencia de los agrosistemas más vulnerables, y justifica plenamente la inversión en una agricultura poco emisora en los países en vías de desarrollo.

15 Disponibilidad de las calculadoras y sus guías de usuario

La mayoría de las calculadoras están disponibles y se pueden conseguir directamente en el sitio web (Tabla 9) o escribiendo a los desarrolladores (Tabla 1 y Anejo 2 para contactos). Generalmente se proporciona la descripción de las calculadoras en el sitio web, a veces con estudios de caso, que para algunas calculadoras ya han sido publicadas en artículos científicos evaluados por revisores especializados — lo que demuestra la calidad de su metodología (Hillier et al. (2011) para Cool Farm Tool, Bernoux et al. (2010) y Branca et al. (2012) para EX-ACT).

Tabla 9: Lista de calculadoras y páginas web

Calculadora	Sitio web
AFD calculator	http://www.nrel.colostate.edu/projects/ALUsoftware/software_description.html
ALU	http://www.nrel.colostate.edu/projects/ALUsoftware/software_description.html
CALM	http://www.cla.org.uk/Policy_Work/CALM_Calculator/
Carbon benefit project CPB	http://www.unep.org/ClimateChange/carbon-benefits/cbp_pim/
Carbon Calculator for NZ Agr. and Horti.	http://www2.lincoln.ac.nz/carboncalculator/
Carbon Farming Group Calculator	http://www.carbonfarming.org.nz/calculators.php
CFF Carbon Calculator	http://www.cffcarboncalculator.org.uk/carboncalc
Climagri®	http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24979
CoolFarmTool	http://www.unilever.com/aboutus/supplier/sustainablesourcing/tools/
CPLAN v2	http://www2.cplan.org.uk/index.php?_load=page&_pageid=3
Dia'terre®	http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24390
EX-ACT	http://www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/fr/
FarmGAS	http://www.farminstitute.org.au/calculators/farm-gas-calculator
Farming Enterprise Calculator	http://www.isr.qut.edu.au/greenhouse/index.jsp
FullCAM	http://www.climatechange.gov.au/government/initiatives/ncat.aspx
Holos	http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1226606460726&lang=eng
IFSC	http://web.extension.illinois.edu/dsi/projectdetail.cfm?NodeID=4035&type=Research
USAID FCC	http://winrock.stage.datarg.net/CarbonReporting/Project/Index/

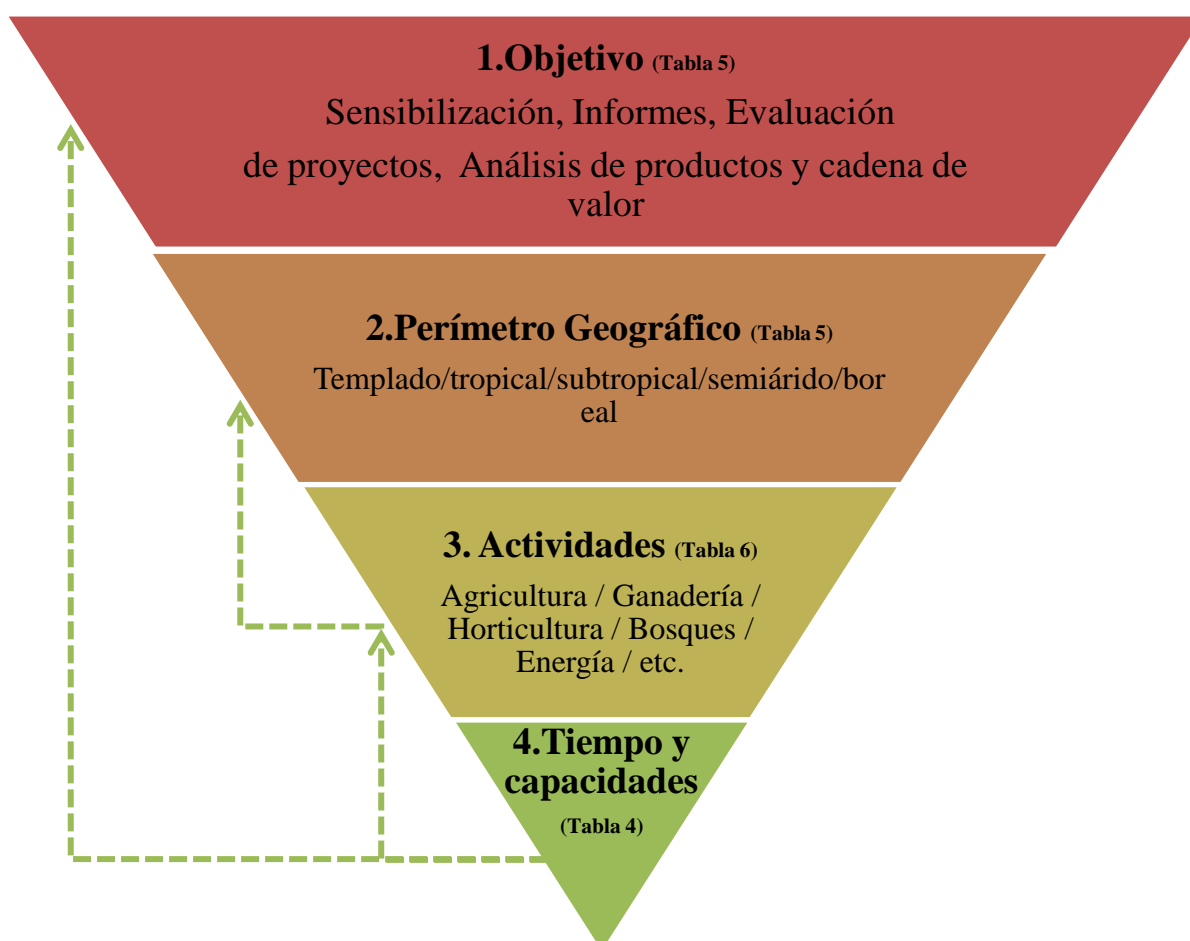
16 Observaciones generales y conclusiones

Esta amplia revisión de las calculadoras de GEI indica que todas las herramientas evaluadas calculan las principales fuentes de emisiones de GEI derivadas de la agricultura (con atención especial a las zonas con cambio de usos de suelo). Sin embargo, las metodologías carecen de homogeneidad, de modo que no es posible realizar comparaciones directas entre diferentes estudios realizados con distintas calculadoras. De hecho, aunque todas las calculadoras funcionan según el IPCC, no se asegura un enfoque homogéneo, pues el IPCC proporciona apenas un marco general, que incluye diversas metodologías con diferentes niveles de detalle. Solo los estudios comparativos sobre un mismo caso utilizando distintas calculadoras permiten evaluar con precisión el impacto de las variaciones en el resultado final, en función de la calculadora utilizada. Estos estudios se encuentran a veces disponibles y confirman la capacidad de las calculadoras evaluadas para proporcionar órdenes de magnitud coherentes (Soil Association Producer Support; FAO, 2010). Para una interpretación adecuada de los resultados es imprescindible conocer el ámbito de trabajo, y para comparar proyectos es necesario tener en cuenta las incertidumbres.

De este estudio se desprende que ya están disponibles calculadoras para evaluar la mayoría de actividades agrícolas y forestales en todas las zonas del mundo. El nivel de detalle sigue siendo limitado en muchas zonas, pero los desarrolladores trabajan activamente para mejorar las calculadoras. La tendencia es que las calculadoras ofrezcan un mayor alcance (incluyendo más opciones de gestión, más tipos de terreno, itinerarios técnicos, cambios de uso de suelo etc.) y una mayor adecuación geográfica. Para obtener una mayor precisión se necesitan más datos de entrada y estudios que requieren más tiempo. De este modo, se debe encontrar un equilibrio entre eficiencia y precisión. La reciente multiplicación de herramientas es indicativa de la búsqueda de este equilibrio. No se espera que una calculadora prevalezca sobre las demás, pues cada una tiene objetivos distintos. Sin embargo, sí hay competencia entre calculadoras con objetivos y zonas geográficas similares. Esto puede provocar alguna confusión entre los usuarios no especialistas, por lo que cabe esperar que el presente estudio esclarezca algunos de estos puntos. Para más detalles sobre las calculadoras y sus metodologías se puede leer también el trabajo de la "Coalition on Agricultural Greenhouse Gases"(C-AGG), que se enfoca en los mecanismos del mercado de GEI aplicados a la agricultura (C-AGG, 2010; Driver et al., 2010a) y otras revisiones recientes (Denef et al., 2012; Milne et al., 2012). Sería de la mayor utilidad para los gestores de proyectos y consultores agrícolas una página web con la lista de las calculadoras existentes y sus principales características.

Cómo escoger su calculadora GEI en 4 etapas:

1. Definir el objetivo principal de su evaluación e identificar el grupo de calculadoras más adecuado (Tabla 5).
2. Definir su zona geográfica y comprobar las calculadoras específicas que están disponibles (Tabla 5).
3. Comprobar que los parámetros considerados por la calculadora (bosque, suelo, cambio de usos del suelo, etc.) está adaptado a sus objetivo (Tabla 6). Si la calculadora local no está adaptada, hay que escoger entre calculadoras de mayor ámbito geográfico.
4. Considerar el tiempo de que dispone y su capacidad técnica (Tabla 4, Anexo 2).



17 Lista de acrónimos

ACV : Análisis de Ciclo de Vida
ADEME: Agencia del Medio Ambiente y de la Gestión de la Energía
C-AAG: *Coalition on Agricultural Greenhouse Gases*
CUT/CUS: Cambio de Uso de Tierra, Cambio de Uso de Suelos
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FE: Factor de Emisión
GEI: Gas de Efecto Invernadero
IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IDH: Índice de Desarrollo Humano
IRD: Instituto francés de Investigación para el Desarrollo
ITK: Itinerario Técnico
MDL : Mecanismo de Desarrollo Limpio
MIRS: Espectroscopía de Infrarrojo Medio (*Medium Infra-Red Spectroscopy*)
N: Nitrógeno
NIRS: Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (*Near Infra-Red Spectroscopy*)
PCG: Potencial de Calentamiento Climático
SIG : Sistema de Información Geográfica
tC: Tonelada de Carbono
tCO₂ eq : Tonelada de CO₂ equivalente
VCS: *Verified Carbon Standard*

18 Bibliografía

- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J., Jayet, P., Soussana, J., Stengel, P., and Bureau, D. 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France?
- Baumert, K. A., Herzog, T., and Pershing, J. 2005. "Navigating the numbers: Greenhouse gas data and international climate policy," World Resources Inst.
- Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M., and Kirk, G. J. D. 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature* **437**, 245-248.
- Bernoux, M., Branca, G., Carro, A., Lipper, L., Smith, G., and Bockel, L. 2010. Ex-ante greenhouse gas balance of agriculture and forestry development programs. *Scientia Agricola* **67**, 31-40.
- Bernoux, M., Feller, C., Cerri, C., Eschenbrenner, V., Cerri, C., Roose, E., Lal, R., Barthès, B., and Stewart, B. 2006. Soil carbon sequestration. *Soil erosion and carbon dynamics*, 13-22.
- Branca, G., Hissa, H., Benez, M. C., Medeiros, K., Lipper, L., Tinlot, M., Bockel, L., and Bernoux, M. 2012. Capturing synergies between rural development and agricultural mitigation in Brazil. . *Land Use Policy* **in press**.
- C-AGG 2010. "Carbon and Agriculture: Getting Measurable Results," http://www.cagg.org/docs/CAGMR_complete.pdf.
- Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., and Woess-Gallasch, S. 2009. Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* **53**, 434-447.
- Coleman, K., and Jenkinson, D. 1999. "ROTHC-26.3; A model for the turnover of carbon in soil," http://www.rothamsted.ac.uk/aen/carbon/mod26_3_dos.pdf.
- Couwenberg, J. 2009. Emission factors for managed peat soils: an analysis of IPCC default values. *Emission factors for managed peat soils: an analysis of IPCC default values*.
- Couwenberg, J., and Fritz, C. 2012. Towards developing IPCC methane 'emission factors' for peatlands (organic soils). *Mires and Peat* **10**.
- Cubasch, U., Meehl, G., Boer, G., Stouffer, R., Dix, M., Noda, A., Senior, C., Raper, S., and Yap, K. 2001. Projections of future climate change. , in: *JT Houghton, Y. Ding, DJ Griggs, M. Noguer, PJ Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and CA Johnson (eds.): Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel*, 526-582.
- De Cara, S., Goussebaïle, A., Grateau, R., Levert, F., Quemener, J., Vermont, B., Bureau, J. C., Gabrielle, B., Gohin, A., and Bispo, A. 2012. Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants.
- Del Grosso, S., Parton, W., Mosier, A., Hartman, M., Brenner, J., Ojima, D., and Schimel, D. 2001. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model. *Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management*, 303-332.
- Denef, K., Paustian, K., Archibeque, S., Biggar, S., and Pape, D. 2012. Report of Greenhouse Gas Accounting Tools for Agriculture and Forestry Sectors. *Interim report to USDA under Contract No. GS23F8182H*.
- Driver, K., Haugen-Kozyra, K., and Janzen, R. 2010a. Agriculture Sector Greenhouse Gas Practices and Quantification Review.
- Driver, K., Haugen-Kozyra, K., and Janzen, R. 2010b. Agriculture Sector Greenhouse Gas Quantification Protocol Benchmarking.

- FAO 2010. "Comparing results of Carbon balance appraisal using on-going Bio-Carbon fund projects," <http://www.fao.org/tc/exact/validation-des-resultats/projets-du-fond-biocarbon/en/>.
- Feschet, P., Loeillet, D., Macombe, C., and Garrabé, M. 2010. Fruits and vegetables supply chains specificities and stakes as element of discussion on Social-LCA.
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., and Rumpel, C. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* **450**, 277-280.
- Gabrielle, B., and Lehuger, S. 2009. "CERES-EGC documentation," http://www-egc.grignon.inra.fr/applis/ceres_mais/cerca/html/doc_ceres.html.
- Gibbons, J. M., Ramsden, S. J., and Blake, A. 2006. Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. *Agriculture, ecosystems & environment* **112**, 347-355.
- Giltrap, D. L., Li, C., and Sagar, S. 2010. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, ecosystems & environment* **136**, 292-300.
- Gomez, C., Viscarra Rossel, R. A., and McBratney, A. B. 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma* **146**, 403-411.
- Grace, P. R., Ladd, J. N., Robertson, G. P., and Gage, S. H. 2006. SOCRATES--A simple model for predicting long-term changes in soil organic carbon in terrestrial ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* **38**, 1172-1176.
- Guo, L., and Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* **8**, 345-360.
- Hénault, C., Devis, X., Lucas, J., and Germon, J. 1998. Influence of different agricultural practices (type of crop, form of N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions. *Biology and Fertility of Soils* **27**, 299-306.
- Hillier, J., Walter, C., Malin, D., Garcia-Suarez, T., Mila-i-Canals, L., and Smith, P. 2011. A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. *Environmental Modelling & Software*.
- Hospido, A., Moreira, M. T., and Feijoo, G. 2003. Simplified life cycle assessment of galician milk production. *International Dairy Journal* **13**, 783-796.
- Hunt, P., Karlen, D., Matheny, T., and Quisenberry, V. 1996. Changes in carbon content of a Norfolk loamy sand after 14 years of conservation or conventional tillage. *Journal of soil and water conservation* **51**, 255-258.
- IPCC, I. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry, and Other Landuse. *OECD Press, Paris (2006)* **475**, 505.
- Jobbágy, E. G., and Jackson, R. B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications* **10**, 423-436.
- Labreuche, J., Lellahi, A., Malaval, C., and Germon, J. C. 2011. Impact of no-tillage agricultural methods on the energy balance and the greenhouse gas balance of cropping systems. *Impact des techniques culturales sans labour TCSL sur le bilan energetique et le bilan des gaz a effet de serre des systemes de culture* **20**, 204-215.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development* **17**, 197-209.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C., and

- Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* **11**, 261-269.
- Lapola, D. M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., and Priess, J. A. 2010. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the national Academy of Sciences* **107**, 3388-3393.
- Le Mer, J., and Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology* **37**, 25-50.
- Marti, O., Braconnot, P., Bellier, J., Benshila, R., Bony, S., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Denvil, S., and Dufresne, J. 2005. The new IPSL climate system model: IPSL-CM4.
- Milne, E., Neufeldt, H., Smalligan, M., Rosenstock, T., Malin, D., Easter, M., Bernoux, M., Ogle, S., Casarim, F., Pearson, T., Bird, N., Steglich, E., Ostwald, M., Deneuf, K., and Paustian, K. 2012. "Methods for the quantification of net emissions at the landscape level for developing countries in smallholder contexts.."
- Mosier, A., Duxbury, J., Freney, J., Heinemeyer, O., and Minami, K. 1998. Assessing and mitigating N₂O emissions from agricultural soils. *Climatic change* **40**, 7-38.
- Parton, W. J., and Rasmussen, P. 1994. Long-term effects of crop management in wheat-fallow. II. Century model simulations. *Soil Science Society of America Journal* **58**.
- Plevin, R. J., Jones, A. D., Torn, M. S., and Gibbs, H. K. 2010. Greenhouse gas emissions from biofuels' indirect land use change are uncertain but may be much greater than previously estimated. *Environmental Science & Technology*.
- Post, W. M., Izaurralde, R. C., Mann, L. K., and Bliss, N. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climatic change* **51**, 73-99.
- Pouyat, R., Groffman, P., Yesilonis, I., and Hernandez, L. 2002. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution* **116**, Supplement 1, S107-S118.
- Powlson, D., Whitmore, A., and Goulding, K. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re - examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science* **62**, 42-55.
- Ramachandran Nair, P., Mohan Kumar, B., and Nair, V. D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**, 10-23.
- Ramírez, A., de Keizer, C., Van der Sluijs, J. P., Olivier, J., and Brandes, L. 2008. Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990–2004. *Atmospheric Environment* **42**, 8263-8272.
- Rawls, W., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J., Sobecki, T., and Bloodworth, H. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* **116**, 61-76.
- Rochette, P. 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research* **101**, 97-100.
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., and Shiina, T. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* **90**, 1-10.
- Ruosteenoja, K., Carter, T. R., Jylhä, K., and Tuomenvirta, H. 2003. Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Vol. 644. Finnish Environment Institute Helsinki.
- Rypdal, K., and Winiwarer, W. 2001. Uncertainties in greenhouse gas emission inventories--evaluation, comparability and implications. *Environmental Science & Policy* **4**, 107-116.
- Saby, N., Bellamy, P. H., Morvan, X., Arrouays, D., Jones, R. J. A., Verheijen, F. G. A., Kibblewhite, M. G., Verdoodt, A., Üveges, J. B., and FREUDENSCHUB, A. 2008. Will European soil - monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? *Global Change Biology* **14**, 2432-2442.

- Salomé, C., Nunan, N., Pouteau, V., Lerch, T. Z., and Chenu, C. 2010. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology* **16**, 416-426.
- Schau, E., and Fet, A. 2008. LCA studies of food products as background for environmental product declarations. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **13**, 255-264.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., and Rice, C. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **363**, 789-813.
- Soil Association Producer Support Carbon footprint calculators – a case study comparison review,"http://www.swarmhub.co.uk/downloads/pdf/carbon_project/footprint_calculators.pdf.
- Van der Werf, G., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., Collatz, G., and Randerson, J. 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience* **2**, 737-738.
- VCS 2012. "Approved VCS Methodology VM0017,"<http://www.v-c-s.org/sites/v-c-s.org/files/VM0011%20IFM-LtpF%20Carbon%20Planet%20FINAL%2021%20MAR%202011.pdf>.
- Veldkamp, A., and Lambin, E. F. 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **85**, 1-6.
- Virtanen, Y., Kurppa, S., Saarinen, M., Mäenpää, I., Mäkelä, J., and Grönroos, J. 2010. Carbon footprint of food-an approach from national level and from a food portion.
- Wang, G. 2005. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics* **25**, 739-753.
- Weber, C. L., and Matthews, H. S. 2008. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environmental Science & Technology* **42**, 3508-3513.
- Williams, J., Jones, C., and Dyke, P. T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. AsAE* **27**, 129-144.
- Winiwarter, W., and Rypdal, K. 2001. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories:: a case study for Austria. *Atmospheric Environment* **35**, 5425-5440.