

CAPÍTULO 4
ACV DEL INVERNADERO
INDUSTRIAL
MEDITERRÁNEO

CAPÍTULO 4. ACV DEL INVERNADERO INDUSTRIAL MEDITERRÁNEO

Dice la razón: Busquemos la verdad.

Y el corazón: Vanidad. la verdad ya la tenemos.

La razón: ¡Ay, quién alcanza la verdad!

El corazón: Vanidad. La verdad es la esperanza

ANTONIO MACHADO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, siguiendo la metodología propia de un estudio de ACV, se analizan las cargas ambientales asociadas al cultivo de tomate en invernadero mediterráneo. En la sección 4.2 se definen los objetivos, la unidad funcional y el alcance del estudio. En la siguiente sección se exponen los límites, criterios y datos utilizados en la elaboración del inventario siguiendo las pautas de los inventarios del ciclo de vida (ICV), (sección 4.3). El análisis de los impactos (AICV), permitirá evaluar la importancia de los daños ambientales potenciales. El análisis de los resultados se ha estructurado en dos partes: una primera parte en la que se analizan las cargas ambientales asociadas a las diferentes categoría de impacto seleccionadas del cultivo hidropónico con recirculación de drenaje (sección 4.4); y una segunda parte en la que se analizan diferentes alternativas de manejo de técnicas de cultivo (sección 4.5). Todo ello da lugar a una interpretación y a la elaboración de unas recomendaciones destinadas a la mejora desde el punto de vista ambiental del cultivo en invernadero.

4.2 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

4.2.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es la evaluación de los daños ambientales atribuibles al proceso de cultivo de tomate bajo invernadero a lo largo de su ciclo de vida, es decir, desde los orígenes de las materias primas utilizadas hasta el final de los residuos generados (figura 4.1).

Cuando se aplica este procedimiento a un producto agrícola cultivado en invernadero, no solamente se considerarán los efectos ambientales adversos derivados del mismo proceso de producción (eutrofización, contaminación por uso de plaguicidas, generación de residuos,...) sino que deberán tenerse en cuenta también otros aspectos como los daños ambientales generados por la manufactura y transporte de materias primas, por la energía utilizada, por la fabricación de los materiales de construcción del invernadero, por la generación de residuos cuando las instalaciones quedan fuera de uso y en general por todos los aspectos capaces de producir daños al entorno que formen parte del ciclo de vida del producto considerado. Todos ellos deberán contabilizarse atribuyendo distintos daños ambientales a cada unidad de masa de producto.

El conocimiento de qué aspectos resultan más negativos permitirá la adopción de técnicas que intenten mejorar ambientalmente el proceso de cultivo de tomate en invernadero. Para ello se procederá:

1. Al estudio desde un punto de vista de impacto ambiental del cultivo de tomate en invernadero en ciclo de primavera-verano.
2. A la cuantificación de las cargas ambientales que representa el cultivo en suelo frente al cultivo hidropónico con drenaje libre y con recirculación de los drenajes.
3. A la evaluación de la gestión dada a los residuos.
4. A la comparación de diferentes estructuras de invernadero, con material de cubierta de distinta duración.
5. Al estudio de la variabilidad que representa sobre el impacto las diferentes prácticas de fertilización en cultivo en suelo.
6. Al estudio de la influencia de la distancia de la fábrica de los materiales al invernadero.

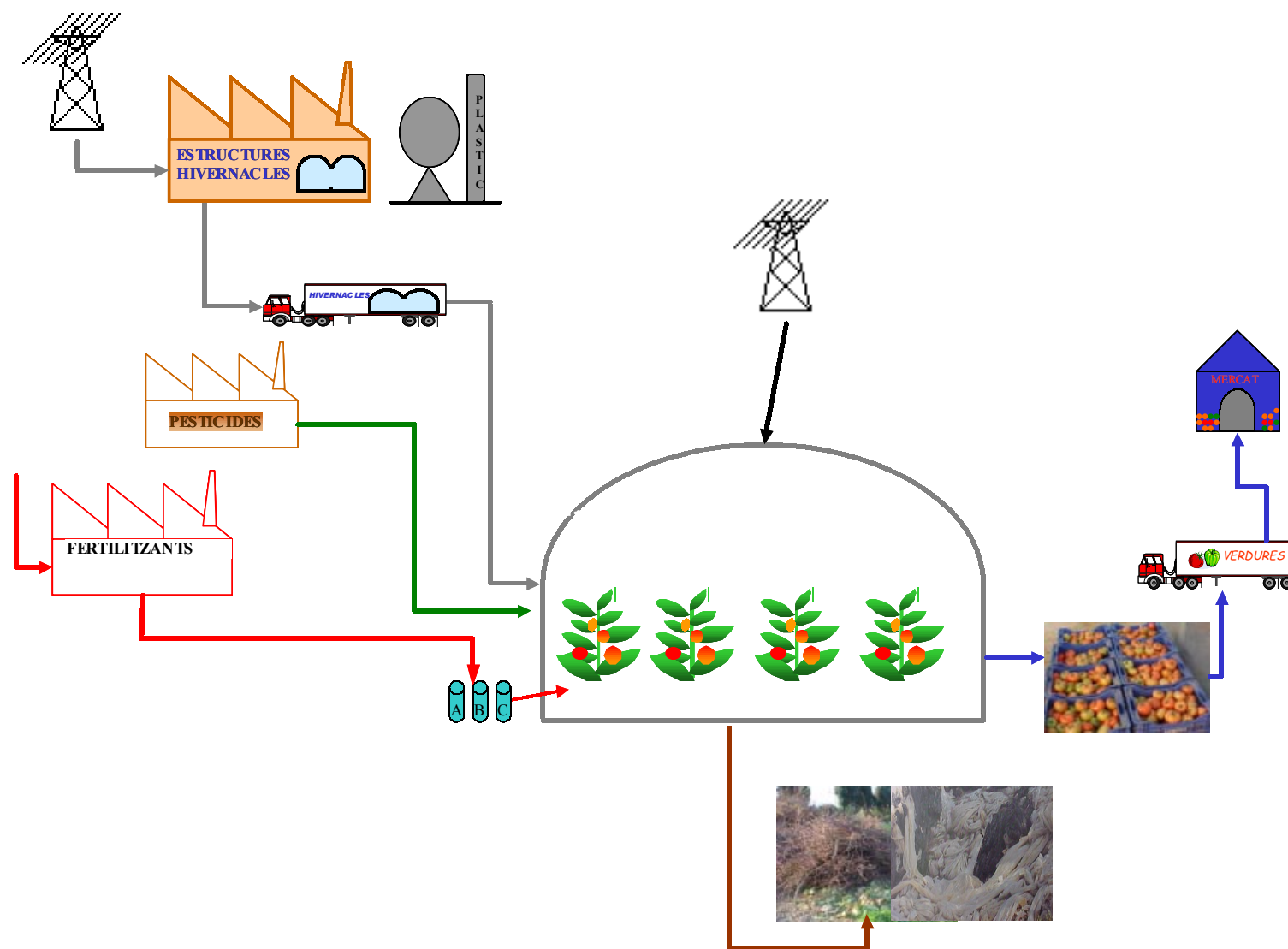


Figura 4.1 Proceso de producción de tomate bajo invernadero

4.2.2 Alcance del estudio

Aunque la definición de un ACV es desde “la cuna a la tumba”, a efectos de analizar un sistema de producción agrícola, el límite del estudio se considerará como el área de producción, teniendo en cuenta los flujos de materia y energía de entrada y salida de esta área.

La comercialización del producto se realiza en mercado local que es el destino principal del tomate cultivado en el Maresme.

Los datos correspondientes al cultivo en suelo corresponden a diversas explotaciones de cultivo de tomate agrupadas en las Asociaciones de Defensa Vegetal, ADV, de l'Alt i Baix Maresme. Estas fincas son gestionadas por técnicos y por tanto se rigen por criterios consensuados. Sin embargo, la recogida de datos en invernadero presenta una variabilidad muy alta entre las diferentes explotaciones e incluso entre temporadas. En este caso se tomarán datos de una explotación de referencia para posteriormente realizar un análisis de sensibilidad entre diferentes prácticas de abonado, puesto que éstas variarán en función de los análisis de suelo y del agua.

En el caso de cultivos hidropónico tanto para sistemas de recirculación como de drenaje libre se partirá de los datos de las experiencias realizadas en el IRTA con cultivo de tomate. Este sistema resulta mucho más uniforme puesto que al cultivarse en sustrato el contenido de nutrientes en el suelo no se tiene en cuenta. La causa de variabilidad más alta vendrá dada por la calidad del agua. En este estudio se considerará que se dispone de agua de buena calidad, conductividad eléctrica, CE, alrededor de $1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. En el marco de un proyecto de la UE para la utilización de aguas salinas se analiza mediante el ACV el manejo de la fertirrigación en el caso de disponer de aguas de elevada CE (Antón y col., 2003).

Otra gran causa de variabilidad en el sistema hortícola es el control de plagas y enfermedades. Por su importancia, se le dedica un capítulo aparte en esta tesis (ver capítulo 5).

4.2.3 Unidad Funcional

La unidad funcional, UF, viene definida como la principal función del sistema a analizar (ISO-14040, 1997). La principal función de un invernadero es producir, por tanto se tomará como unidad funcional la producción de tomates.

Ciertos sistemas agrícolas pueden tener más interés por el área que ocupan, como podría ser el caso en el que se pretenden comparar el comportamiento ambiental de distintas opciones de productos en un invernadero; en estos casos la superficie ocupada sería la unidad funcional.

4.3 ANÁLISIS DEL INVENTARIO

Por su complejidad y para facilitar el estudio de diferentes alternativas de la producción de tomate en invernadero, el sistema principal PRODUCCIÓN TOMATES se ha subdividido en varios subsistemas (figura 4.2), estos son:

- Manejo del invernadero durante la producción de tomates (**ME**)
- Producción de fertilizantes (**F**)
- Fertirrigación (**FR**)
- Producción de plaguicidas (**P**)
- Control fitosanitario (**CF**)

Por extensión se analizará el sistema de producción de la infraestructura. Este sistema comprende a su vez el subsistema correspondiente a la fabricación, transporte del material necesario para crear la estructura y construcción del invernadero (**E**) y la fabricación de los materiales propios del sistema de distribución del riego y los fertilizantes (**R**)

Un tercer sistema deberá incluirse por extensión que es el que incluye la gestión de residuos (**RES**) generados a causa del proceso de producción de tomate en invernadero

La figura 4.2 esquematiza el diagrama de los sistemas analizados

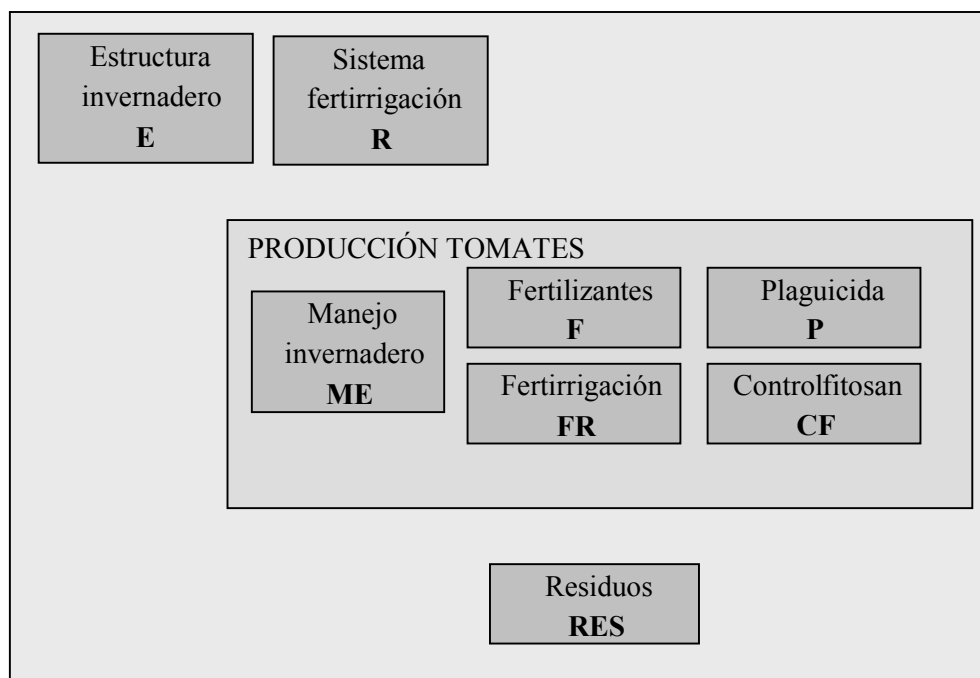


Figura 4.2 Diagrama de los procesos considerados para la evaluación del sistema productivo de cultivo de tomate en invernadero

4.3.1 Producción de la infraestructura

4.3.1.1 Estructura del invernadero

El tipo de estructura analizada es el invernadero comercial de estructura de acero galvanizado con techo semi-circular. La tabla 4.1 recoge las dimensiones del invernadero standard considerado. Se analizan dos tipos de material de cubierta: un film plástico, tricapa de polietileno de baja densidad con tratamiento UV y etilvinilacetato, con una duración de tres campañas y material de placa de policarbonato con una duración de 12 años.

Tabla 4.1 Dimensiones del invernadero utilizado

Concepto	valor	unidades
Nº naves	6	
Nº ventanas	6	
Nº puertas	2	
Anchura nave	8	m
Longitud	40	m
Arco	8,7	m
Altura canal	3	m
Altura cumbrera	4,5	m
Superficie cubierta de suelo	1.920	m ²
Volumen	7.200	m ³
Superficie de material de cubierta	2.829	m ²

La tabla 4.2 detalla el material inventariado en peso de los diferentes materiales utilizados en la estructura del invernadero, material de cubierta y anejos como canales de desagüe del agua de lluvia o alambres de entutorado. Igualmente se detalla la vida útil en años considerada para cada material. Deberá tenerse en cuenta que en un año natural se realizan dos ciclos de cultivo por tanto en el ICV todos los datos deberán dividirse por la vida útil y por dos.

Tabla 4.2 Material utilizado en la construcción de la estructura del invernadero

concepto	material	peso kg	densidad kg·m ⁻³	vida útil años
Estructura de invernadero				
Pilares, curvas, tirantes, omegas,...	acero	11.255,0	7.900	20
Estructura ventanas laterales	acero	300,6	7.900	20
Estructura ventanas cenitales	acero	1.512,2	7.900	20
Canal recogida aguas	acero	2.765,0	7.900	20
Tubería conducción agua de lluvia	Cloruro polivinilo	188,3	1.400	10
Cimentaciones	hormigón	110,0	2.870	20
Material de cubierta				
(1) Plástico de la cubierta, film	LDPE	531,6	920	3
(2) Plástico de la cubierta, placa	Policarbonato	2.829	1.000	12
Puertas	Policarbonato	12,0	1.000	12
Barras sujeción plástico	Polietileno	362,3	1.450	5
Material entutorado				
Cable sujeción + tensores	acero	104,4	7.900	20
Cuerda	rafia	11,1	900	0,5
Pinzas	Polietileno	75,3	920	0,5

Los datos de fabricación de los diferentes materiales se han tomado de la base de datos DEAM[®] de (Ecobilan, 1999).

En la realización del inventario se han considerado las siguientes hipótesis de cálculo:

- No se han tenido en cuenta los diferentes galvanizados uniformándose todo en el mismo concepto de acero.
- Por no disponerse de datos de los materiales tricapa se han utilizado los datos correspondientes a polietileno de baja densidad (LDPE).
- Para el transporte de los materiales a la finca se ha considerado una carga total de 17.000 kg y una distancia de 400 km (Barcelona-Valencia, 349 Km) en camión de 24 t, ida con carga y vuelta vacío. Las cargas ambientales se han distribuido entre el peso y la vida útil de los diferentes materiales que componen la estructura del invernadero
- En la construcción de un invernadero de 2.000 m², se ha considerado el consumo energético correspondiente al funcionamiento de la hormigonera y al uso de la taladradora, (tabla 4.3). Igualmente se ha tenido en cuenta la parte proporcional de la energía requerida para su fabricación y mantenimiento. En el caso de no disponerse de este dato se ha seguido el criterio establecido en Audsley (1997) siendo la energía de fabricación 15,8 MJ·kg⁻¹ y la destinada al mantenimiento un 55% de la energía de

fabricación de la maquinaria más la producción de la materia prima, generalmente acero, $33 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tabla 4.3 Datos de la maquinaria utilizada en la construcción del invernadero

Maquinaria	Peso kg	energía fabricación MJ ⁽¹⁾	energía mantenimiento MJ ⁽¹⁾	energía funcionamiento MJ ⁽²⁾	horas funcionamiento h ⁽²⁾	Vida útil h ⁽²⁾
Hormigonera 550 W	66,5	6,1	3,4	69,3	35	6.000
Taladradora 700 W	5,0	0,92	0,51	176,4	70	6.000

⁽¹⁾ (Audsley, 1997)

⁽²⁾ estimación propia

4.3.1.2 Materiales sistema fertirrigación

En este subsistema se ha considerado la fabricación de los materiales necesarios para el sistema de distribución de agua y fertilizantes. En el invernadero de cultivo en suelo y el hidropónico con drenaje libre se considerarán los materiales necesarios para la distribución de la fertirrigación, y en el cultivo hidropónico con recirculación (figura 2.7) se tendrá en cuenta, además, el material necesario para proceder a la recirculación (tabla 4.4).

Los datos correspondientes a los diferentes materiales plásticos se han obtenido de la base de datos DEAM[®] (Ecobilan, 1999), a excepción de la fibra de vidrio que proviene de la base de datos de Simapro[®] (PRéConsultants, 2003). El módulo de fabricación de perlita es de elaboración propia a partir de los datos de USEPA (1995).

Tabla 4.4 Material utilizado en el sistema de distribución de fertirrigación

concepto	material	peso kg	densidad kg·m ⁻³	vida útil años
Distribución riego ⁽¹⁾				
tuberías	PE	955,9	950	10
goteros, spaguettis, piquetas, grifos, tapones	PE	18,7	950	3
5 depósitos 500 L abonos concentrados	PE	212,4	950	10
1 depósito 500 L ácido concentrado	PE	42,5	950	10
1 depósito 500 L abastecimiento agua	PE	42,5	950	10
bomba riego 2,2 kW	acero	24,6	7.900	10
Sistema de recirculación				
1 depósito 30 L para achique drenaje	PVC	13,6	1.340	10
2 depósitos 3000 L solución desinfectada	Fibra vidrio	407,8	1.770	10
2 depósitos 3000 L almacenaje drenaje	Fibra vidrio	407,8	1.770	10
banquetas Poliestireno expandido	poliestireno	526,9	20	3
plástico cubrir banquetas	LDPE	96,9	920	3
Plástico cubrir suelo	LDPE	370,9	920	3
canalizaciones	PVC	4,06	1.340	10
bomba agua 1,5 kW	acero	14,2	7.900	10
bomba lixiviados 1,1 kW	acero	14,2	7.900	10
bomba impulsión drenajes 0,37 kW	acero	5,2	7.900	10
bomba desinfección 0,37 kW	acero	5,2	7.900	10

⁽¹⁾ común a los tres sistema, suelo, drenaje libre y recirculación

En la tabla 4.5 se ilustran los datos correspondientes a la energía de fabricación y mantenimiento de las respectivas bombas utilizadas en los tres tipos de cultivo de tomate. Para este cálculo se siguen los mismos criterios establecidos para la maquinaria de construcción del invernadero (ver sección 4.3.1.1). El esquema de la figura 4.3 muestra la disposición de las diferentes bombas.

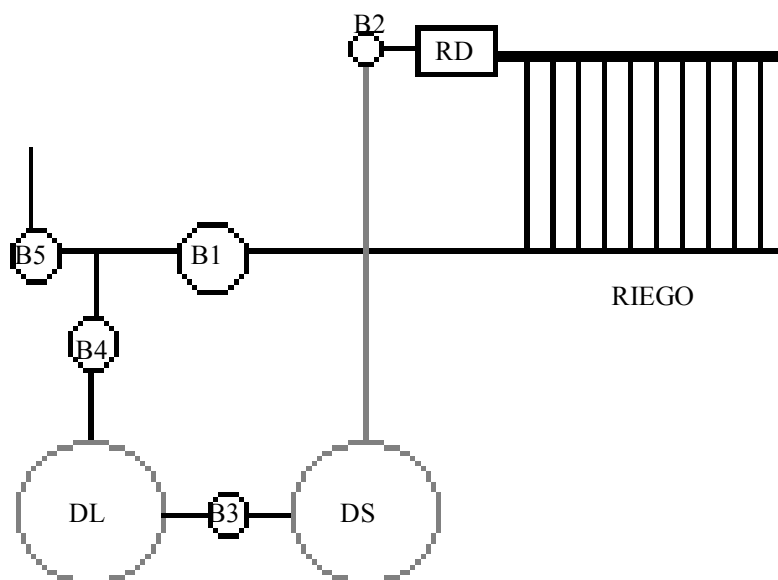


Figura 4.3 Esquema de las bombas en el circuito de recirculación. RD: recogida de lixiviados, DS: lixiviado sucio; DL: lixiviado limpio; B1: solución nutritiva; B2: impulsión lixiviado; B3: bombeo desinfección; B4: bombeo lixiviados; B5: agua

Tabla 4.5 Datos correspondientes a la energía de fabricación y mantenimiento de las diferentes bombas utilizadas en el cultivo en suelo, hidropónico con drenaje libre y recirculación

bomba	Peso kg	energía fabricación MJ ⁽¹⁾	energía mantenimiento MJ ⁽¹⁾	horas funcionamiento h	Vida útil h ⁽²⁾
riego suelo	24,6	13,6	7,50	70,2	2.000
riego drenaje libre	24,6	9,0	4,95	46,4	2.000
recirculación					
B1: solución nutritiva	24,6	10,8	5,95	55,6	2.000
B2: impulsión drenajes	5,2	1,5	0,82	36,3	2.000
B3: bombeo recirculación	5,2	5,6	3,07	136,0	2.000
B4: lixiviados	14,2	3,7	2,01	32,6	2.000
B5: agua	14,2	4,4	2,40	38,9	2.000

⁽¹⁾ (Audsley, 1997)

⁽²⁾ estimación propia

En el cultivo en suelo se ha procedido a la desinfección del terreno por solarización añadiéndose por tanto al inventario 139 kg de plástico LDPE y un riego con funcionamiento de la bomba de 22,5 MJ y un consumo de agua de 25 L·m⁻².

La tabla 4.6 recoge los materiales que componen el sustrato, comunes a ambos modos de cultivo hidropónico con o sin recirculación.

Tabla 4.6 Material utilizado como sustrato

concepto	material	peso kg	densidad kg·m ⁻³	vida útil años
Sustrato				
saco PE	LDPE	223,3	920	3
perlita B12	perlita	7610,8	160	3
taco lana de roca	lana de roca	103,8	80	0,5

En la construcción del invernadero con un sistema de recirculación se debe aplanar el terreno y dar la pendiente adecuada para la recogida de drenajes. Se ha considerado por tanto la maquinaria necesaria para dichas operaciones, compactadora de 12 kW y rulo 7 t con una potencia nominal de 35.3 kW (tabla 4.7). Para el cálculo de los datos de energía de fabricación y mantenimiento se ha seguido el mismo procedimiento comentado en 4.3.1.1 (Audsley, 1997).

Tabla 4.7 Datos de la maquinaria utilizada en la preparación del terreno para un sistema hidropónico con recirculación

Maquinaria	peso kg	energía fabricación MJ ⁽¹⁾	energía mantenimiento MJ ⁽¹⁾	energía funcionamiento MJ ⁽²⁾	horas funcionamiento h ⁽²⁾	Vida útil h ⁽²⁾
Compactadora 12 kW	975	29,9	16,5	24,5	35	3.600
Rulo 353 kW	800	24,5	13,5	889,6	70	3.600

⁽¹⁾ (Audsley, 1997)

⁽²⁾ estimación propia

4.3.2 Producción de tomate

4.3.2.1 Manejo del invernadero

En este subsistema se considerarán todos los factores que intervienen en la producción del cultivo. Se incluyen aquellos que afectan al crecimiento de la planta y al manejo del invernadero. Se excluyen por su importancia en subsistemas aparte la fertirrigación y los fitosanitarios, dividiéndose, éstos a su vez, en producción y uso.

A partir de la composición de la biomasa C₂₇H₃₈O₁₆N (Haug, 1993) se ha calculado el CO₂ fijado por el cultivo. Para formar un mol de C₂₇H₃₈O₁₆N (632 g) serán necesarios 27 moles de CO₂ (44 g). La biomasa producida por el cultivo es de 296,8 g planta⁻¹ (peso seco) por tanto cada planta habrá fijado 557,9 g CO₂.

En este subsistema se incluye la producción del plantel en invernadero con calefacción a una temperatura de 15 °C durante los meses de diciembre y mitad de enero. A partir del cálculo de las necesidades de calefacción (Matallana y col., 1995) se ha estimado el consumo de energía eléctrica en 0,195 MJ y el de gasóleo en 0,035 L por planta. La densidad del plantel en taco de lana de roca es de 177,8 plántulas por m².

Las operaciones de manejo de la estructura incluyen la apertura y cierre de las ventanas manual. La apertura y cierre se realiza diariamente durante 10 minutos, se abren 6 ventanas cada una de ellas equipadas con motores de 0,56 kW.

La cosecha se realiza manualmente en cajas de polietileno de alta densidad, HDPE, de 1,125 kg de peso y con capacidad para 25 kg. La comercialización se realiza mayoritariamente en el mercado local (30-50 km).

Audsley (1997) propone los datos correspondientes a las necesidades energéticas empleadas en la construcción y reparación de la maquinaria utilizada en los trabajos agrícolas. En su trabajo compara diferentes fuentes observando ciertas discrepancias. En este trabajo se opta por utilizar los datos procedentes del estudio de Stanhill (1980) por ser específicos de la producción de tomate en invernadero (tabla 4.8).

Tabla 4.8 Datos de la energía requerida en el manejo del tractor

Maquinaria	peso kg	energía fabricación + mantenimiento MJ·m ⁻²	energía funcionamiento MJ·m ⁻²	Vida útil h
Tractor 2400 17,9 kW	1.700	1,71	0,428	7.200

4.3.2.2 Producción de fertilizantes

Para los datos de fabricación de fertilizantes se han tomado los módulos existentes de ácido nítrico, nitrato amónico y sulfato potásico en la base de datos de Ecobilan[®] (1999). El módulo de fabricación de nitrato potásico se ha elaborado basándose en los datos de Davis y col (1999). Y para el resto de fertilizantes, de los cuales no se disponen datos de fabricación se ha estimado siguiendo los criterios de estos autores (Davis y col., 1999), considerándose las siguientes hipótesis:

- El sulfato magnésico se obtiene de la kieserita procedente de la minería juntamente con las sales de potasio. Se considerará como un subproducto sin adjudicarle un consumo de recurso mineral. En su procesado se consume energía en forma de gas natural de 1.1 MJ·kg⁻¹ MgSO₄·H₂O (Davis y col., 1999).

- Para la producción de fosfato monopotásico se han considerado los valores de fabricación del fosfato monoamónico al que se le añaden sales de potasio. (Davis y col., 1999).
- El nitrato cálcico puede ser obtenido mediante acidulación de piedra calcárea (CaO) mediante ácido nítrico o como subproducto de la producción de fertilizantes NPK. En este estudio se ha considerado el primer proceso. Como dato de energía de fabricación se ha tomado el recomendado para la producción de abonados potásicos $5,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. (Audsley, 1997)
- Para el nitrato magnésico se ha considerado un proceso semejante al del nitrato cálcico.
- Los fertilizantes que aportan los microelementos no se han considerado, por falta de datos y por ser muy pequeñas las cantidades aportadas.

4.3.2.3 Producción de plaguicidas

En su tesis, Cowell (1998) calculó las emisiones durante la producción de plaguicidas dividiendo la liberación total de las diferentes sustancias de los plaguicidas producidos en Inglaterra y Gales por la producción total anual de plaguicidas en la Gran Bretaña para dar la media de emisiones por tonelada de ingrediente activo. Los resultados indicaron que estas emisiones son probablemente despreciables comparadas con las emisiones de los plaguicidas en el campo.

En la fabricación de plaguicidas interviene energía directa (electricidad, gas, petróleo) utilizada en los procesos de fabricación y energía indirecta que es la suma de las energías intrínsecas de todos los materiales derivados del petróleo que se utilizan en los procesos de fabricación. La cantidad de energía indirecta se mide como la energía en J que se produciría si estas cantidades de petróleo o gas fueran completamente quemadas.

La energía directa es más complicada puesto que debe conocerse el proceso de fabricación, procesos que en muchos casos forman parte del secreto de patente de la empresa. A dichos procesos habrá que añadir entradas energéticas asociadas como construcción y mantenimiento de fábricas, transporte, ...)

Green (1987) desarrolló modelos para calcular las entradas de energía para un plaguicida específico. En primer lugar suma las cantidades de etileno, propileno o metano requeridas para producir 1 tonelada de plaguicida y seguidamente calcula la cantidad de petróleo o gas natural que se necesitan para producir estas cantidades de etileno, polipropileno o metano.

Green (1987) también establece la energía necesaria para la producción de plaguicidas distinguiendo entre el tipo de presentación: aceites emulsionables, polvos mojables o gránulos.

- Aceites emulsionables: soluciones de plaguicidas junto con emulsionantes solubles en un disolvente, generalmente un hidrocarburo. Este se dispersa como una fina emulsión cuando es vertido en agua. La cantidad de energía directa requerida es muy pequeña. La energía indirecta es despreciable puesto que la cantidad de emulsionante es pequeña < 5% de la cantidad total del plaguicida. La energía extra a añadir por el hecho de este tipo de presentación será para aceite emulsionable < 20 MJ·kg⁻¹ de plaguicida
- Polvos Mojables: es una mezcla de plaguicida con un mineral inerte, generalmente arcilla, y agentes mojantes y suspensivos. Una formulación de este tipo de plaguicidas puede añadir 30 MJ·kg⁻¹ de plaguicida a las entradas de energía total.
- Gránulos: partículas gruesas de material inerte como caliza, cáscaras de nuez, mazorcas... revestidas con el plaguicida. La energía extra considerada es de 10 MJ·kg⁻¹ de plaguicida. Si se trata de microgránulos, diámetro entre 100 y 30 μ la energía indirecta considerada es de 20 MJ·kg⁻¹ de plaguicida.

Además en la producción de plaguicida habrá que añadir la energía consumida en el empaquetado 2 MJ·kg⁻¹ y el transporte 1 MJ·kg⁻¹.

El trabajo realizado por (Green, 1987) es aún hoy en día el método recomendado para establecer la energía de producción de plaguicidas (Audsley, 1997).

Siguiendo estos criterios la tabla 4.9 refleja el total de la energía consumida en la producción de los plaguicidas utilizados en la muestra de control integrado que se analizará en este capítulo.

Tabla 4.9 Energía consumida en la fabricación de los plaguicidas utilizados, MJ kg⁻¹

Materia activa	CAS N°	Familia	Presentación (1)	Total Materia	Resto
				activa	Producto
				MJ kg ⁻¹	MJ kg ⁻¹
Azoxistrobin	131860-33-8	Antibiótico	SC	173	23
Benomilo	17804-35-2	Carbamato	WP	397	33
Bromopropilato	41483-43-6	Difenol	EC	241	23
Captan	133-06-2	Dicarboximida	WP	115	33
Ciromazina	60168-88-9	Regulador	WP	241	33
Fenarimol	36734-19-7	Pirimidina	SC	255,6	23
Iprodiona	143390-89-0	Dicarboximida	SC	115	23
Kresoxim-metil	8018-01-7	Antibiótico	WG	176	18

(1) EC: concentrado emulsionable; SC: suspensión concentrada; WP: polvo mojable; WG: granulado dispersable en agua

4.3.2.4 Fertirrigación

Se consideran, en el manejo de la fertirrigación, los procesos de consumo de energía en el funcionamiento de las bombas, el consumo de agua y las emisiones producidas.

4.3.2.4.1 Consumo de agua

En la tabla 4.10 se reflejan las condiciones de transpiración calculadas siguiendo los criterios expresados en el capítulo 2 sección 2.3.6.2 y el riego aportado para los tres tipos de cultivo de tomate en suelo, sustrato y recirculación para las condiciones del Maresme.

Tabla 4.10 Riego aplicado en los diferentes sistemas, suelo, drenaje libre y recirculación

DDT	S_0 MJ m ⁻² d ⁻¹	DPV kPa	LAI	ET total Lm ⁻²	Suelo Lm ⁻² (1)	Drenaje libre Lm ⁻²	Recirculación Lm ⁻²
28	5,3	0,7	1,3	12,36	4,4	15,5	12,36
56	7,3	0,8	2,9	27,36	19,8	34,2	27,36
86	10,3	1,1	3,4	45,19	33,0	56,5	45,19
116	12,9	1,7	3,8	65,75	66,0	82,2	65,75
180	15,1	2	4,3	175,66	225,3	219,6	175,66
Total				326,32	348,5	407,90	326,32

(1) Datos de riego recomendados por ADV en tomate en suelo.

La energía consumida en el funcionamiento de la bomba se muestra en la tabla 4.11. En ella se reflejan los tiempos de funcionamiento en las diferentes etapas del cultivo y el consumo energético expresado en MJ.

Tabla 4.11 Funcionamiento de la bomba de riego en cultivo de tomate en suelo bajo invernadero (ADV, 2001)

Riego	tiempo minutos	Nº riegos semana ⁻¹	tiempo total min	funcionamiento bomba 2,2 kW, MJ
Plantación- Inicio flor	15	1	60	8,0
4º ramillete	20	3	240	32,2
6º ramillete	30	3,5	450	60,3
Inicio cosecha	30	7	900	120,6
Cosecha	40	7	2.560	343,0
TOTAL			4.210	564,1

En cultivo de tomate hidropónico con drenaje libre el sistema de riego es semejante al de cultivo en suelo. En el sistema analizado existe una única bomba de distribución de la solución nutritiva. El sistema de recirculación es más complejo (ver esquema en figura 4.3). Además de la bomba común en todos los sistemas que aporta la solución nutritiva, **B1**, serán necesarias otra serie de bombas para proceder al recirculado. En el punto de recogida de drenajes existe una bomba, **B2**,

encargada de impulsar el lixiviado hacia la cabecera de riego. Una bomba, **B3**, que impulsa el drenaje hacia las operaciones de filtrado. Otra bomba, **B4** que suministra agua limpia para proceder a la mezcla con el agua procedente de los lixiviados y que precisará a su vez de una quinta bomba, **B5**. El caudal gestionado por **B1** corresponde al total de agua aportada teniendo en cuenta una fracción de drenaje del 50%. De este caudal total el 30% proviene de la fracción lixiviada, bomba **B5** y el 70% restante es agua limpia, bomba **B4**. El caudal impulsado por las bombas **B2** y **B3** corresponde a la fracción drenada del 50%.

Tabla 4.12 Funcionamiento de las bombas de riego en cultivo hidropónico con y sin recirculación

Funcionamiento bomba	Potencia kW	Drenaje libre MJ	Recirculación MJ
B1: solución nutritiva	2,2	373,6	440,5
B2: sumergible impulsión drenajes	0,37		181,1
B3: bombeo recirculación	0,37		48,3
B4: lixiviados	1,1		129,2
B5: agua	1,5		210,3
TOTAL		373,6	1.009,4

4.3.2.4.2 Consumo de fertilizantes

Para el cálculo de los fertilizantes aplicados en cultivo de tomate en suelo se toman diferentes muestras procedentes de diferentes fincas (ADV, 2001). Como la utilización de fertilizantes aplicados depende del análisis de agua y suelo, las dosis variarán entre fincas. Para el cálculo se tomará una finca como referencia realizándose posteriormente un análisis de sensibilidad entre los diferentes datos.

Tabla 4.13 Fertilizantes aportados en cultivo de tomate en suelo. Finca 1 se ha tomado como muestra representativa más tres ejemplos procedentes de diferentes fincas.

Fertilizante	Finca 1 g·m ⁻²	Finca 2 g·m ⁻²	Finca 3 g·m ⁻²	Finca 4 g·m ⁻²
Acido nítrico	101,6	29,0	207,3	207,3
Fosfato monopotásico	72,1	72,1	91,0	91,0
Nitrato potásico	248,0	187,8	107,1	267,8
Nitrato amónico	0,0	0,0	0,0	0,0
Nitrato cálcico	15,2	206,7	0,0	15,5
Nitrato magnésico	11,0	12,7	0,0	7,3
Sulfato de magnesio	17,0	68,2	0,0	0,0
Sulfato de potasa	8,5	58,1	118,5	29,1

En el cultivo hidropónico, a partir de las necesidades conocidas de nutrientes (capítulo 2, tabla 2.8) y agua (tabla 4.10) se determina el consumo de fertilizantes para los diferentes períodos reflejándose éste en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Consumo total de fertilizantes durante todo el período de cultivo

Fertilizante	Recirculación g m ⁻²	Drenaje libre g m ⁻²
Acido nítrico	193,6	250,0
Fosfato monopotásico	134,3	224,6
Nitrato potásico	80,4	97,6
Nitrato amónico	27,7	0,0
Nitrato cálcico	13,4	0,0
Nitrato magnésico	12,1	39,8
microelementos	6,6	8,2

4.3.2.4.3 Emisión de nutrientes

El cálculo de las emisiones en el cultivo hidropónico con drenaje libre se ha realizado mediante una experiencia en IRTA, en donde se han medido semanalmente la concentración iónica de la solución nutritiva y del drenaje y siguiendo el método propuesto por Pardossi (2002) (ec 2.6, sección 2.3.6.3) se ha calculado la absorción de nutrientes por el cultivo. En la figura 4.4 se representa la cantidad de N acumulado en la planta a lo largo del cultivo. En la tabla 4.15 se refleja la concentración total para los diferentes nutrientes, en g·m⁻², de la solución nutritiva aportada durante todo el ciclo de cultivo, así como de la absorción por parte del cultivo y del drenaje calculada a partir del riego aportado y los drenajes recogidos.

Tabla 4.15 Concentración iónica en la solución nutritiva, absorbida por el cultivo y en el drenaje

	N g m ⁻²	P g m ⁻²	K g m ⁻²	Ca g m ⁻²	Mg g m ⁻²	SO ₄ g m ⁻²	Cl g m ⁻²	Na g m ⁻²
Sol. Nut.	54,9	50,0	99,4	157,0	24,8	150,1	51,7	19,9
Absorción	49,3	35,2	80,1	126,9	20,4	116,0	38,5	14,1
Drenaje	5,7	14,8	19,3	30,0	4,4	34,1	13,2	5,8

A efectos de análisis de los impactos, la emisión de nutrientes a causa de los fertilizantes tendrá importancia en las categorías en que se contabilizan las emisiones de NH₃, N₂O, NO_x al aire y NO₃ al agua, emisión de P en el suelo y al agua y emisión de metales pesados. Para el cálculo de la eutrofización se consideran el N y el P siempre que uno de estos no sea limitante, por tanto no se tienen en cuenta otros elementos (vease capt 3, sección 3.5.2.7).

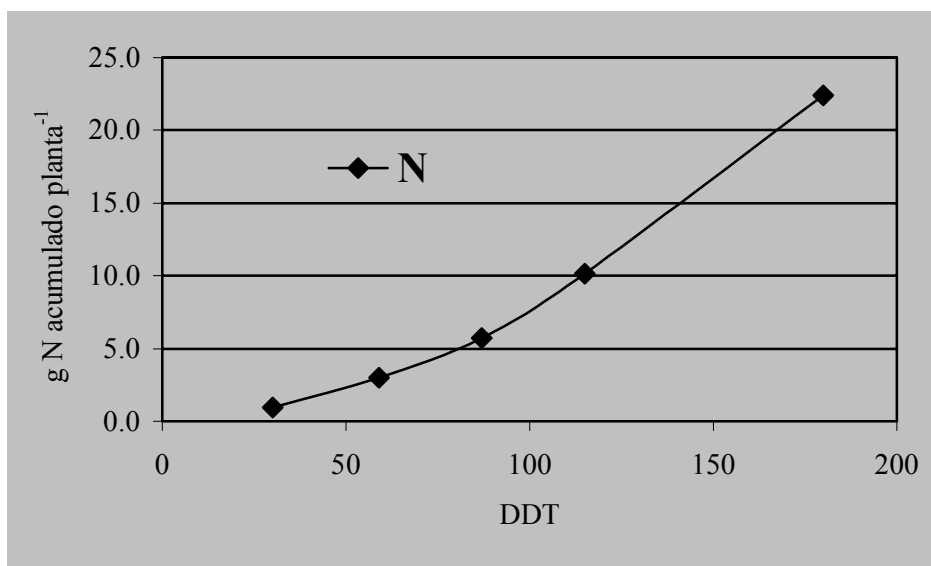


Figura 4.4 N acumulado en planta a lo largo del ciclo de cultivo. DDT: días después del transplante.

En el caso de un sistema de recirculación cerrado (ver sección 2.5.3.1) el drenaje es recogido y reutilizado, por tanto no se pierden nutrientes por lixiviación ni por acumulación en el suelo, en consecuencia a efectos de inventario en este sistema no se considerarán emisiones.

Para el cálculo de la absorción de nutrientes en cultivo en suelo se toma como referencia la evaluada en el cultivo hidropónico haciéndose la correspondiente corrección en función de la producción.

El cálculo de las de las diferentes emisiones (tabla 4.16) en cultivo en suelo e hidropónico se ha realizado teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- La emisión de amonio de los fertilizantes químicos varía de 0 a 2% dependiendo del pH del suelo. Para el cálculo de las emisiones de amonio Audsley (1997) recomienda un valor promedio de 2,0% de los fertilizantes sintéticos aplicados.
- Para el cálculo de las emisiones de N₂O en la bibliografía se recogen diferentes métodos. Las conclusiones del grupo de trabajo del ciclo de nitrógeno en LCI (Bentrup y col., 2000, Weidema y col., 2000) basándose en la guía publicada por Climate Change Indicator Panel, (IPCC, 1997) aconsejan la utilización del factor 1,25% del N.
- Del total de emisiones de N₂O, se considerará que un 10% serán emisiones de NO_x (Audsley 1997).
- El cálculo de la fracción de NO₃ que se pierde por lixiviación resulta muy complejo por los numerosos factores que intervienen (época del año, gestión del riego, características del suelo,...). En la bibliografía existen numerosos estudios que cuantifican la pérdida de

lixiviados en diferentes cultivos hortícolas (Castilla, 1986, Serrano y col., 1993, Guimerà y col., 1995, Bruckler y col., 1997, Vázquez y col., 2002). En estos trabajos se presentan valores que oscilan entre el 2 y el 63% en función del cultivo y la técnica de riego aplicada. Los datos procedentes de Castilla (1986) a pesar de haberse medido en un cultivo en invernadero de tomate resultan muy bajos (2% N aplicado se pierde por lixiviación) debido a las características de los cultivos en enarenado. En el Maresme y para un cultivo de fresón en invernadero Guimerà y col. (1995), midieron la lixiviación de nitratos; sin embargo la pendiente más pronunciada en que se acostumbran a realizar estos cultivos da un valor más alto propio de un suelo más arenoso (15% N aplicado se pierde por lixiviación). Para el cálculo de la lixiviación Audsley (1997) y siguiendo la metodología holandesa propone diferenciar entre suelo arcilloso y suelo arenoso. Del nitrógeno que se aporta con la fertilización, y una vez descontado el que se pierde por emisión de amonio, parte es asimilado por el cultivo y parte es retenido en el suelo. De esta porción retenida en el suelo el 10% en caso de suelo arenoso se desnitrificará mientras que del 90% restante, el 45% será lixiviado y el resto 55% también se pierde por desnitrificación. En suelos arcillosos de este 90% restante el 20% será lixiviado y el 80% se desnitrificará. Por las características del suelo del Maresme se toma un valor intermedio de 33 y 55% respectivamente. Esto da un valor de 9% de nitrógeno lixiviado respecto al aplicado.

- El contenido alto de calcio en nuestras aguas y suelo así como un pH relativamente alto produce la inmovilización del fósforo, no considerándose por tanto pérdidas de este elemento por lixiviación.

Tabla 4.16 Emisiones de N y P para cultivo en suelo e hidropónico con drenaje libre

	Cultivo en suelo	Cultivo hidropónico
NO ₃ -N ⁽¹⁾	3,0 (0-7,8)	1,4
NH ₃ -N ⁽¹⁾	1,0 (0,8-1,3)	1,1
N ₂ O-N ⁽²⁾	0,62 (0,5-0,8)	0,67
NO _x -N ⁽¹⁾	0,062 (0,05-0,08)	0,07
P	0	0

⁽¹⁾ Audsley 1997

⁽²⁾ IPCC 1997

4.3.3 Control fitosanitario

Este subsistema es sin duda uno de los que va a presentar más variabilidad espacial y temporal. Dependiendo de la explotación y de la campaña, los tratamientos variarán en función de las enfermedades y plagas presentes. Asimismo, hoy en día, aún no existe entre la comunidad

científica consenso de cuales son los indicadores a utilizar para las categorías de toxicidad humana y de los ecosistemas. En este capítulo, a modo de ejemplo y para observar la importancia de este subsistema dentro del proceso global de producción de tomate, se ha procedido a la aplicación del método CST 95 (Joliet y col., 1996) para el análisis de los potenciales de toxicidad humana, terrestre y acuática. La comparación entre control químico y control integrado se realizará en el capítulo 5. Para el cálculo del peso que el uso de plaguicidas tiene en el cultivo de tomate en invernadero se han seleccionado los tratamientos realizados en un invernadero situado en el Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària, Cabrils (Barcelona). En este ensayo se cultivó tomate de la variedad "Bond" en ciclo de primavera-verano. El cultivo se llevó a cabo en sacos de perlita y riego localizado realizándose control integrado. La densidad de plantación fue de 2,2 m² y la producción de 15 kg m⁻².

La tabla 4.17 lista las materias activas de los plaguicidas empleados en el invernadero donde se ha utilizado control integrado.

Tabla 4.17 Plaguicidas y dosis utilizadas durante una campaña de tomate en invernadero utilizando control integrado

Materia activa	Familia	Tipo	Dosis (kg _{ai} ·UF ⁻¹)
Azoxistrobin	Antibiótico	Fungicida	3,4E-06
Benomilo	Carbamato	Fungicida	3,3E-06
Bromopropilato	Difenol	Acaricida	5,0E-06
Captan	Dicarboximida	Fungicida	1,7E-05
Ciromazina	Regulador	Insecticida	3,0E-06
Fenarimol	Pirimidina	Fungicida	4,0E-07
Iprodiona	Dicarboximida	Fungicida	1,3E-07
Kresoxim-metil	Antibiótico	Fungicida	1,7E-06

Se ha cuantificado el consumo energético de la maquinaria utilizada en los tratamientos, tractor y atomizadora a razón de 60 minutos para 1000 m² y tratamiento. La bomba utilizada es de 1,1kW. Igualmente en este caso se ha tenido en cuenta los datos de consumo proporcional de energía de fabricación y mantenimiento (tabla 4.18) considerándose que la mitad de la atomizadora es de acero y la cuba de PE.

Tabla 4.18 Datos de la energía requerida en el manejo del tractor

Maquinaria	peso kg	energía fabricación + mantenimiento MJ	horas funcionamiento h	Vida útil h ⁽¹⁾
Atomizadora 1,1 kW	100	0,077	24	500

4.3.4 Gestión de los residuos

Los residuos plásticos proceden principalmente del final de vida del material de cubierta del invernadero y del material de distribución de riego. Se han estimado en $900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ los residuos plásticos procedentes de la renovación del material de cubierta. A éstos, se pueden añadir otros $700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de material plástico diverso procedente del sistema de riego, cantidad que puede llegar a doblarse en caso de recirculación y $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ procedente de material diverso como sacos de sustrato, containers, material para entutorar, etc. El criterio seguido para el cálculo de los residuos ha sido la adjudicación para una campaña del correspondiente al material utilizado dividido por la vida útil (ver tablas 4.2 y 4.4). El destino que comúnmente se da a estos residuos es en vertedero o incineración. Los datos del inventario para diferentes materiales plásticos se han obtenido de la base de datos DEAM® (Ecobilan, 1999).

El mismo criterio se ha seguido para el cálculo del acero que compone la estructura.

Para el cálculo del residuo verde generado se ha evaluado la producción de biomasa de un cultivo de tomate, midiéndose el peso seco y fresco de la planta al final del cultivo. El valor del peso seco de la biomasa no productiva es de $297 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$. El contenido en humedad de la planta se ha cuantificado en 87%, por lo tanto en un cultivo de tomate se genera un residuo en fresco de $5.000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (tabla 4.19).

Para el cálculo de la fracción de biomasa producida en cultivo en suelo se han estimado estos mismos valores con relación a la producción (tabla 4.19).

Se comparan las cargas ambientales producidas por el depósito de este residuo en vertedero, con su tratamiento en planta de compostaje o en incineradora.

Tabla 4.19 Distribución peso seco de fruto y planta

	Producción kg m^{-2}	peso seco planta g m^{-2}	peso fresco planta g m^{-2}
cultivo hidropónico	15	653	5.023
cultivo en suelo	12	522	4.018

En todos los casos se considera que el transporte se realiza en container de capacidad máxima 5 m^3 y camión de 16 ton. Se estima un recorrido medio de 30 km desde una finca en el Maresme a la planta de tratamiento de los residuos, ya sea de compostaje, incineradora o vertedero. El módulo de transporte en camión se obtiene de la base de datos DEAM® (Ecobilan, 1999).

Por falta de datos de las emisiones generadas específicamente por la biomasa de la planta de tomate se equiparará a la gestión en vertedero o en incineradora de la madera de la base de datos DEAM de Ecobilan® teniendo en cuenta las siguientes hipótesis de cálculo:

- La composición de la madera es $C_{295}H_{420}O_{186}N$ mientras que la de la biomasa $C_{27}H_{38}O_{16}N$ (Haug, 1993), por tanto la relación entre C/N para la primera es de 252,8 mientras que para la segunda la relación C/N es de 23,2.
- La descomposición en vertedero vendrá afectada por esta distinta composición en biopolímeros, el distinto contenido de humedad y la inferior relación C/N.
- Dado que esta relación C/N es unas 10 veces más alta en la madera que en la biomasa se corregirán los datos del inventario de la descomposición de la madera multiplicando por un factor de 10 las emisiones de los compuestos nitrogenados.
- Los residuos agrícolas son más biodegradables con una vida media de 2,8 años frente a los 10,5 años de la madera (ECON, 2000). Este hecho conjuntamente con su elevada humedad favorecerá la aparición de condiciones anaerobias y un mayor desprendimiento de metano.
- Se aplicará la proporción de descomposición anaerobia de la glucosa según la cual un mol de $C_6H_{12}O_6$ produce tres moles de CO_2 y tres de CH_4 , esto es 132 g de CO_2 y 48 g de CH_4 . Siguiendo este mismo criterio la descomposición anaeróbica de un mol de residuo verde producirá 594 g de CO_2 y 189 g de CH_4 .

En el cálculo de las cargas ambientales producidas por el compostaje del residuo verde se han asumido las siguientes consideraciones:

- La planta de compostaje más cercana al área del Maresme es la de Granollers (Mataró-Granollers 17,7 km). Esta es una instalación dedicada al compostaje de materia orgánica municipal cuya primera fase del compostaje se realiza en túnel.
- A efectos de inventario se utilizarán los datos de funcionamiento extraídos del trabajo de la planta de compostaje de San Cugat (AGA, 2002). Esta instalación funciona igualmente mediante túnel.
- Como composición del compost resultante se ha tomado la analítica procedente de la planta de Sant Cugat (tabla 4.20).

La utilización del compost producido evitará el uso de otros fertilizantes. Con el fin de calcular la carga ambiental evitada por el uso de ellos, así como la asociada a la utilización de dicho compost se considerarán las siguientes hipótesis:

- El ahorro de fertilizantes minerales causado por la utilización del compost va a depender del cultivo en que se aplique, condiciones del suelo, etc.... En algunos caso una aplicación de compost al inicio de una rotación puede ser suficiente y en otros deberá complementarse con fertilizantes minerales. La dosis de aplicación de compost se realiza en función del contenido de Nitrógeno o materia orgánica (Soliva, 1998), en este sentido

las dosis de otros elementos, P, K,...., pueden ser excesivas o insuficientes y deberán ser corregidas. Para el cálculo de la dosis evitada utilizaremos la opción propuesta en (AGA, 2002) en que la utilización del compost representa un 50% de ahorro de fertilizantes minerales.

- La pérdida de nitrógeno por lixiviación va a depender del tipo de suelo, y de los procesos de descomposición y mineralización del nitrógeno. Siguiendo los criterios establecido por Audsley (1997) a efectos de cálculo de lixiviación se estimará un 10% del nitrógeno aportado.
- El fósforo contenido en el compost se halla mayoritariamente en forma insoluble (Rovira, 1997). Esto es debido al alto contenido de Ca y a un pH ligeramente básico del compost. Su aplicación en nuestros suelos generalmente con un alto contenido de Ca no provocara pérdida de P por lixiviación pero se estimará en un 2% su pérdida por erosión o escorrentía.

Tabla 4.20 Composición compost de referencia, datos expresados como materia seca (AGA, 2002)

	valor	unidades
Compost obtenido	390	kg·t ⁻¹ residuo
Metales pesados (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn)	422	mg·kg ⁻¹ compost
Calcio	71.000	mg·kg ⁻¹ compost
Nitrógeno	28.000	mg·kg ⁻¹ compost
Potasio	15.000	mg·kg ⁻¹ compost
Magnesio	6.000	mg kg ⁻¹ compost
Fósforo	7.000	mg·kg ⁻¹ compost
Hierro	11.000	mg·kg ⁻¹ compost
Microcontaminantes		
Dioxinas	29,38	ng ITEQ·kg ⁻¹ compost
PCB	14,2	µg·kg ⁻¹ compost
PAH	9.020	µg·kg ⁻¹ compost
Clorobenzenos	53,5	µg·kg ⁻¹ compost
Clorofenoles	27	µg·kg ⁻¹ compost

4.4 ANÁLISIS DEL IMPACTO.

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3 se ha procedido a analizar las cargas ambientales asociadas al cultivo de tomate bajo invernadero.

En esta sección se evalúa la producción de tomate en invernadero con cubierta de film plástico, cultivo en sustrato con recirculación, control fitosanitario integrado, compostaje del residuo verde y el resto de residuos se deposita en vertedero. En secciones posteriores se compararán estos resultados con diferentes propuestas de técnicas de cultivo.

El análisis se realiza en primer lugar para los tres sistemas considerados. Estos son fabricación de la infraestructura, **FAB**, producción del tomate, **USO**, y gestión de los residuos, **RES**. La figura 4.5 muestra como la contribución del sistema **FAB** es la más alta para las categorías CCI, 90%, AR, 82%, POI, 72% y AI, 52%. El impacto en las categorías de toxicidad se da en el sistema **USO**, debido a la utilización de los plaguicidas. Asimismo este subsistema presenta la contribución más alta, 98% en el consumo de agua y en la categoría ODI, 83%. El sistema **RES** contribuye mayoritariamente en las categorías EI y CCI, 21% en ambas y un 5% en ATI.

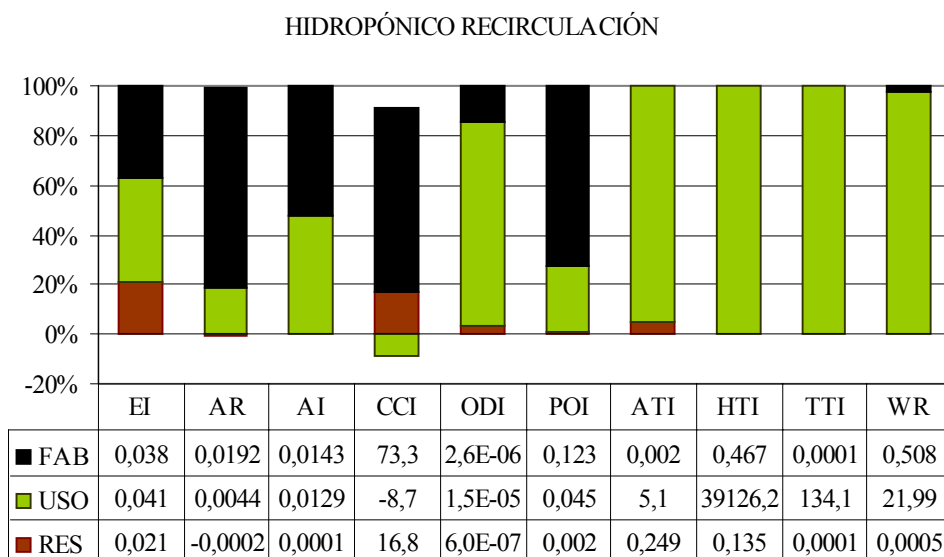
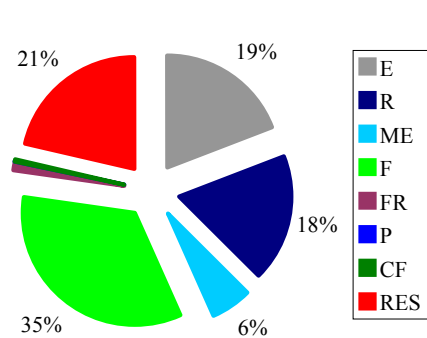
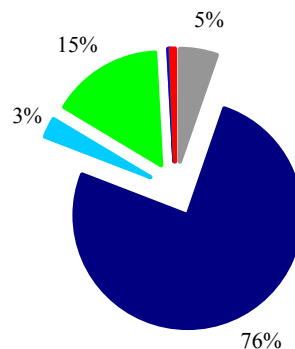


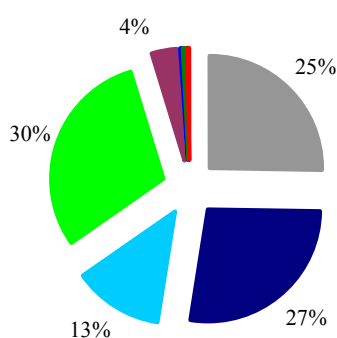
Figura 4.5 Valores y porcentaje de contribución para cada una de las categorías consideradas de los tres sistemas del cultivo hidropónico con recirculación de tomate. Sistema de fabricación de la infraestructura del invernadero, FAB, de la producción del cultivo, USO y del depósito de los residuos en vertedero, RES



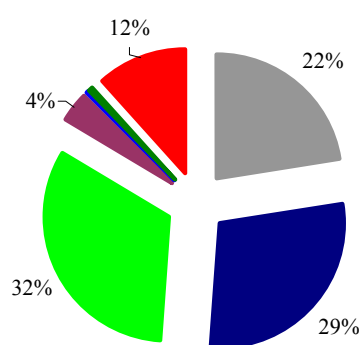
a) Eutrofización, EI



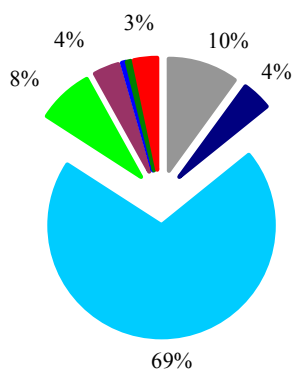
b) Agotamiento recursos no renovables, AR



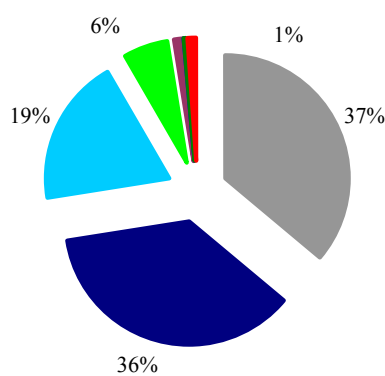
c) Acidificación, AI



d) Cambio climático, CCI



e) Agotamiento capa de ozono, ODI



f) Formación fotooxidantes, POI

Figura 4.6 Comparación Indicadores ambientales de cultivo hidropónico con recirculación para diferentes subsistemas: Fabricación materiales de la estructura del invernadero (E), Producción de materiales para el sistema de fertirrigación (R), Manejo del invernadero durante la producción de tomates (ME), Producción de fertilizantes (F), Fertirrigación (FR), Producción de plaguicidas (P), Control fitosanitario (CF), Gestión de residuos (RES). El material de cubierta es PE y el control fitosanitario es integrado, los residuos se depositan en vertedero excepto el residuo verde que se lleva a compostar.

NOTA: contribuciones $\leq 1\%$ no rotuladas y contribuciones negativas no representadas.

La tabla 4.21 presenta los valores absolutos de impacto potencial para cada una de las categorías y cada uno de los subsistemas.

Tabla 4.21 Valores de cada una de las categorías de impacto para el total y cada uno de los subsistemas en los cultivos hidropónicos con recirculación

			FAB		USO					RES
TOTAL			E	R	ME	F	FR	P	CF	RES
EI	g eq. PO4	0,100	0,0191	0,0184	0,0059	0,0339	0,0012	0,0001	0,0002	0,0214
AR	año-1	0,023	0,0013	0,0180	0,0007	0,0037	0,0001	0,0000	0,0000	-0,0002
AI	g eq. H+	0,027	0,0069	0,0074	0,0035	0,0082	0,0010	0,0001	0,0002	0,0001
CCI	g eq. CO2	81,4	32,1	41,1	-63	46,5	5,6	0,34	0,86	16,8
ODI	g eq. CFC11	0,00002	1,8E-06	7,8E-07	1,3E-05	1,4E-06	6,5E-07	1,2E-07	9,9E-08	6,0E-07
POI	g eq. etileno	0,170	0,0612	0,0616	0,0326	0,0099	0,0020	0,0002	0,0003	0,0018
ATI	eq. Zn agua	5,32	0,0016	0,0006	0,0014	0,0004	0,0001	0,0000	5,07	0,249
HTI	eq. Pb aire	39127	0,345	0,121	0,241	0,184	0,0939	0,0052	39126	0,135
TTI	eq. Zn aire	134,1	3,7E-05	1,4E-05	1,9E-05	2,0E-05	6,9E-06	4,1E-07	134,1	0,0001
WR	litros	22,49	0,33	0,17	0,07	0,07	21,77	0,00	0,08	4,0E-04

Los resultados del análisis del impacto para los diferentes subsistemas analizados se muestran en la figura 4.6 en forma de porcentaje. De manera global se observa que los subsistemas de producción de los diferentes materiales, **E** y **R**, y de fabricación de los fertilizantes, **F**, resultan las fases con mayor impacto ambiental en las categorías EI, AR, AI, CCI y POI. De la fabricación de materiales destaca **R** por encima de **E** especialmente para la categoría AR. **F** produce el impacto más alto en EI, AI y CCI. **ME** genera el valor más alto de impacto en la categoría ODI, igualmente importante es su contribución en POI. El capítulo **RES** grava especialmente las categorías EI y CCI.

En esta figura no se han incluido las categorías de toxicidad que se generan prácticamente en su totalidad en **CF**, por el uso de plaguicidas. Tampoco se incluye el consumo de agua producido mediante la fertirrigación, **FR**, debido al agua utilizada en el riego.

Un análisis más profundo de la contribución de la fabricación de los diferentes materiales permite determinar cuales de ellos contribuyen mayoritariamente y en que categoría (fig. 4.7 a-f). En estas figuras se presentan desglosados los diferentes materiales que componen **FAB**. Los valores expresan el impacto generado por la fabricación del material que corresponde a la producción de un kilo de tomate.

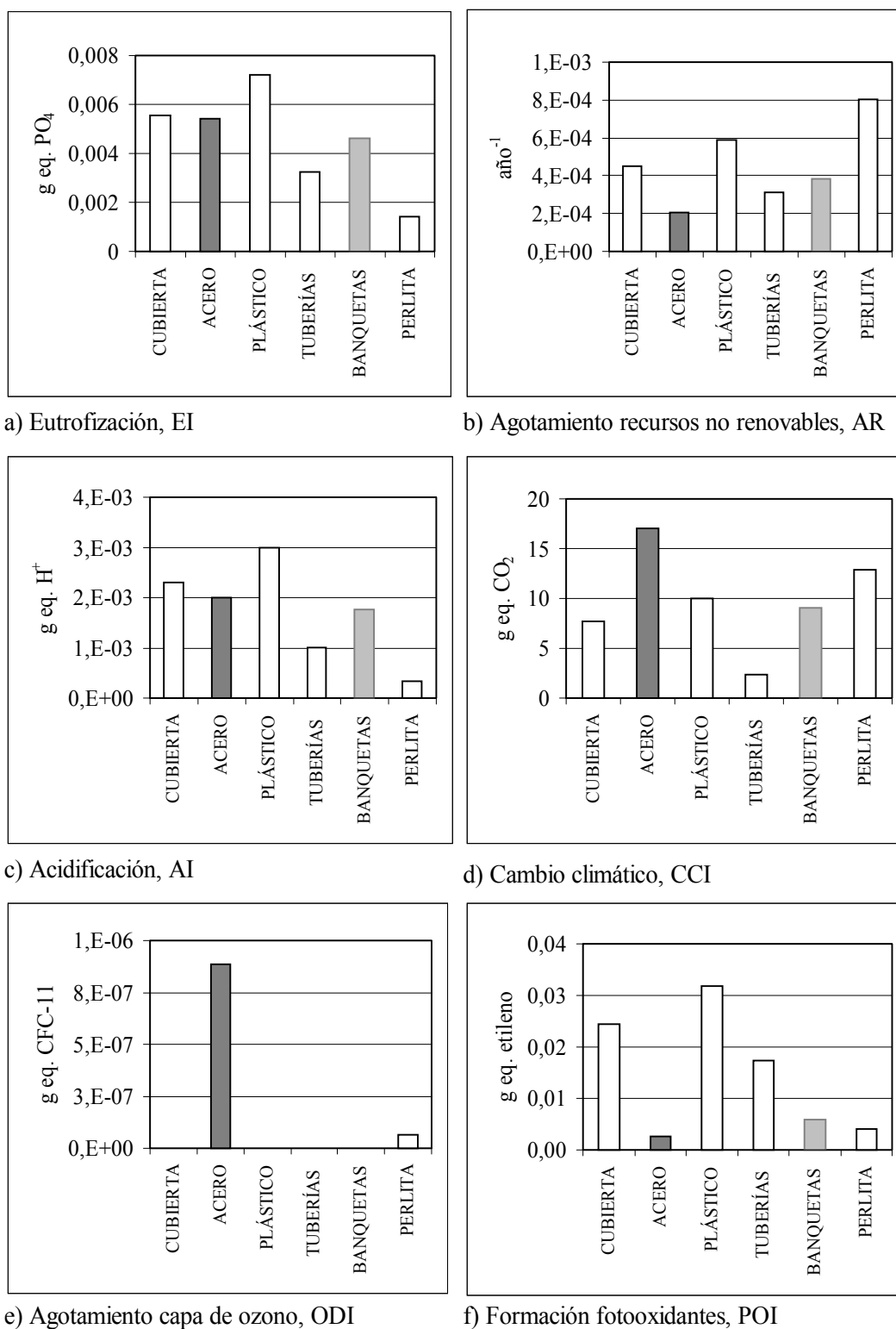


Figura 4.7 Contribución a las diferentes categorías de la fabricación de los diferentes materiales que componen la estructura del invernadero y material de riego y sustrato. Los resultados están expresados en el indicador de la categoría por unidad de masa del material utilizado para la producción de un kilo de tomate, UF.

En relación con el subsistema **E** se muestran los datos correspondientes al material de cubierta, LDPE y al acero que constituye la estructura. El subsistema **R** está constituido por plástico, LDPE para cubrir suelo, banquetas y los sacos del cultivo; las tuberías y depósitos de PE utilizados en la distribución del riego, las banquetas de poliestireno y el sustrato perlita.

La cantidad de film plástico utilizado en **R**, que es incluso algo superior al utilizado para la cubierta del invernadero, **E**, contribuye junto con éste a incrementar el impacto para las categorías de EI, AI y POI. La fabricación del acero reciclado causa los principales impactos en ODI y CCI. Por su parte la utilización de la perlita contribuye al AR y al CCI en el primer caso por el consumo del recurso mineral perlita y el gas natural utilizado para la expansión de éste. No despreciable a su vez es la contribución de las banquetas de poliestireno, un 11% al total de la categoría CCI, un 7% en AI y un 5% a EI.

A continuación se analizarán cada una de las categorías en particular. Posteriormente, se analizará la influencia que sobre el AICV pueden ejercer diferentes factores como son el tipo de material de cubierta, el transporte de los materiales desde la fábrica a la explotación, tipo de control fitosanitario, fertilizantes aplicados y metodología para el cálculo emisiones y gestión dada a los residuos.

4.4.1 Eutrofización, EI.

El subsistema de fabricación de los fertilizantes presenta la contribución más alta, 33,9%, para esta categoría seguido por el subsistema de gestión de residuos, 21,4%, la fabricación del material de la estructura 19,1% y la fabricación del material para la distribución del riego y recogida de drenajes, 18,3%.

Las sustancias que más han contribuido al impacto en dicha categoría son las emisiones al aire de NO_x 52,3%, las emisiones de N al agua, 20,3% y emisiones al aire de NH_3 , 18,6%. La emisión de NO_x tiene su origen, principalmente en la fabricación de **E**, 34,2% y **R** 34,3%, principalmente emisiones causadas en la fabricación del LDPE y en menor medida en **F**, 17,5%.

En el caso que se analiza no se generan pérdidas de NO_3 por lixiviación por tratarse de un sistema cerrado con recirculación de los drenajes, las emisiones de N al agua proceden de la extensión del sistema por la utilización del compost.

Las emisiones de NH_3 , al aire proceden en un 99,8% de la fabricación de los fertilizantes, principalmente el nitrato amónico. Este subsistema, **F**, aporta también la mayor parte de emisiones de N_2O , 97,7%, generadas principalmente en la fabricación de nitrato potásico.

Tabla 4.22 Porcentaje de las emisiones más importantes sobre el total de la categoría y contribución de cada subsistema en un cultivo hidropónico con recirculación, cubierta de LDPE, control fitosanitario integrado y depósito de residuos en vertedero a excepción del residuos verde que se destina a compostaje

	TOTAL	E	R	ME	F	FR	P	CF	RES
EI	100,0	19,1	18,3	5,9	33,9	1,2	0,1	0,2	21,4
(a) NH ₃	18,6	0,0	0,0	0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0
(a) NO _x	52,3	34,2	34,3	10,6	17,5	2,2	0,1	0,3	0,8
(a) N ₂ O	6,1	1,0	0,4	0,7	97,7	0,3	0,0	0,0	-0,1
(w) N _{s,e}	20,3	0,2	0,2	0,3	1,1	0,0	0,0	0,0	98,1
(w) P	7,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9
AR	100,0	5,4	76,6	2,8	15,6	0,2	0,0	0,0	-0,6
(r) Gas Natural	15,0	23,9	40,5	6,2	29,2	0,5	0,1	0,1	-0,5
(r) Petróleo	5,4	28,0	37,9	29,3	2,5	1,2	0,2	0,2	0,7
(r) Perlita (SiO ₂)	67,3	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(r) Fosfatos	6,0	0,0	0,0	0,0	109,3	0,0	0,0	0,0	-9,3
(r) KCl	3,2	0,0	0,0	0,0	101,8	0,0	0,0	0,0	-1,8
AI	100,0	25,2	27,2	12,7	30,0	3,7	0,2	0,6	0,3
(a) NH ₃	11,5	0,0	0,0	0,0	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0
(a) NO _x	32,2	34,2	34,3	10,6	17,5	2,2	0,1	0,3	0,8
(a) SO _x	55,0	25,1	29,0	16,3	23,2	5,3	0,3	0,8	-0,1
CCI	100,0	39,5	50,6	-76,3	57,2	6,9	0,4	1,1	20,6
(a) CO ₂	49,6	74,1	91,3	-165,3	81,5	10,7	0,6	1,6	5,3
(a) CH ₄	41,3	6,4	12,7	13,6	19,0	3,8	0,2	0,6	43,6
(a) N ₂ O	9,2	1,0	0,4	0,7	97,7	0,3	0,0	0,0	-0,1
ODI (Halon)	100,0	9,9	4,2	70,1	7,7	3,6	0,6	0,5	3,3
POI	100,0	36,1	36,3	19,2	5,8	1,2	0,1	0,2	1,1
(a) C ₂ H ₄	4,7	1,4	36,3	13,6	42,1	5,3	0,4	0,8	0,0
(a) C _x H _y (-CH ₄)	16,6	14,6	8,1	54,8	17,1	3,9	0,6	0,6	0,4
(a) C _x H _y (s.e.)	74,1	45,0	43,5	11,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
HTI	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(f) Azoxistrobin	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(f) Bromopropilato	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(f) Captan	22,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(f) Ciromazina	18,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(f) Iprodiona	31,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
ATI	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,2	4,7
(w) Azoxistrobin	51,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(w) Benomilo	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(w) Ciromazina	27,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
TTI	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0
(s) Azoxistrobin	14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,1	0,0
(s) Ciromazina	83,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	83,2	0,0
WR	100,0	1,48	0,78	0,29	0,31	96,8	0,00	0,36	0,0

(a) emisiones aire; (f) residuo en alimento; (r) recurso no renovable; (s) emisiones suelo (w) emisiones agua.

4.4.2 Agotamiento recursos abióticos, AR

El subsistema que más impacto produce, 76,6%, en esta categoría es **R**. La instalación de un sistema de recirculación comporta una necesidad de material, sustrato, sacos, recogida de drenajes, material plástico, etc....causante del incremento de la utilización de recursos en este subsistema.

De entre las diferentes sustancias, la utilización de la perlita como sustrato es el recurso que se ve más afectado, 67,3%. Asociado a este sustrato está el consumo de gas natural utilizado en el proceso de expansión de este mineral. Este combustible junto con el petróleo también será utilizado en los materiales plásticos que componen **E**, 23,9% y 28% y **R**, 40,5% y 37,9% respectivamente para ambos recursos. En el subsistema **F**, es principalmente el gas natural necesario para la fabricación de fertilizantes 29,2% (tabla 4.22).

Otros recursos importantes son los fosfatos y el cloruro potásico utilizados como materias primas en los fertilizantes. Cabe destacar sin embargo el impacto negativo derivado de la carga evitada por el uso sustitutivo del compost generado a partir del residuo verde. El uso de compost evita la utilización de fertilizantes químicos, esto se refleja en aquellos recursos más necesarios en esta fabricación, gas natural, fosfatos y cloruro potásico.

4.4.3 Acidificación, AI

En esta categoría la contribución de los diferentes subsistemas al impacto total se reparte de manera muy similar entre tres subsistemas. El porcentaje más alto corresponde a la fabricación de los fertilizantes, 30%, seguido de la fabricación de material asociado a la distribución del riego, **R**, 27,2% y del material que compone la estructura, **E**, 25,2% (tabla 4.22).

Las principales sustancias contaminantes en esta categoría, son los óxidos de azufre, 55% (SO_x), derivados de la fabricación de los materiales, **R**, 29,0%, **E**, 25,1%, **F**, 23,2%, **ME**, 16,3% y en menor medida **FR**, 5,3%. A continuación le siguen las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), 32,2%, que como se ha visto en la categoría de eutrofización se generan principalmente en **E**, y **R**, 34,2 y 34,35% respectivamente, y en una proporción menor en **F**, 17,5% y **ME**, 10,6%. En tercer lugar las emisiones de amonio (NH_3), 11,5% proceden prácticamente en su totalidad 99,8% de la fabricación de los fertilizantes, especialmente nitrato amónico (tabla 4.22).

4.4.4 Cambio climático, CCI

En relación con la categoría de cambio climático cabe destacar, en primer lugar, el impacto negativo de la fijación de CO_2 , por parte del cultivo, estimada en 81,8 g de CO_2 por *UF*. Este valor representa un 50% sobre el total de las aportaciones positivas del proceso completo.

Los impactos positivos se producen especialmente en el subsistema de producción de fertilizantes, **F**, 57,2% y en la fabricación de los materiales empleados en la distribución del riego y los fertilizantes, **R**, 50,6%. La fabricación de los materiales que componen la estructura, **E** es el siguiente subsistema en importancia de contribución 39,5%. La gestión de residuos, **RES**, en el proceso analizado, en que el residuo verde se lleva a compostar y el resto se deposita en vertedero ha contribuido en un 20,6%. Pero como se verá más adelante (sección 4.5.2) este subsistema será uno de los que más influencia ejercerá en el impacto evaluado en esta categoría.

Por sustancias la emisión al aire de CO₂ y una vez descontado el aporte negativo de la fijación de CO₂ por el cultivo, aporta una contribución del 49,6% al total de la categoría considerada, el cual se genera principalmente en la producción del material de la infraestructura, **R**, 50,6, y **E**, 39,5 y en **F**, un 57,2%. La segunda sustancia en importancia es la emisión al aire de CH₄, que contribuye en un 41,3% al total de la categoría. De dicha emisión, el 43,6% procede del depósito de los residuos en vertedero, y el 19% la fabricación de fertilizantes. La emisión de N₂O contribuye en un 9,2% al total de la categoría, procedente prácticamente en su totalidad, 97,7% de la fabricación de fertilizantes (tabla 4.22).

4.4.5 Agotamiento del ozono estratosférico, ODI

Las fases que más importancia tienen son el manejo del invernadero, **ME**, 70,1% y en segundo lugar la producción de la estructura del invernadero, **E**, 9,9% de contribución. La fabricación de fertilizantes, **F**, 7,7% ocupa el tercer lugar (tabla 4.22).

Tan sólo se ha considerado como sustancia que contribuye el Halon 1301, CF₃Br. La emisión de esta sustancia ocurre principalmente a causa de la utilización de electricidad y diesel y en la fabricación del acero en la producción de la estructura.

4.4.6 Formación foto-oxidantes, POI

La fabricación de los diferentes materiales que componen **E**, 36,1% y **R** 36,3% y el manejo del invernadero, **ME**, 19,2% son los subsistemas que ejercen una mayor presión ambiental en la categoría de formación de oxidantes foto-químicos. En todos ellos es la emisión de los diferentes hidrocarburos la causante mayoritaria del impacto. También las emisiones de etileno tienen importancia especialmente en el subsistema **R** debido a la mayor cantidad de material de PE utilizado (tabla 4.22).

4.4.7 Toxicidad Humana, HTI

El potencial más alto de toxicidad se debe a la aplicación de plaguicidas, **CF**. Resultando Iprodiona, 31,6%, Captan, 22,7%, Ciromazina, 18,9%, Bromopropilato, 12,6% y Azoxistrobin 8,4% las sustancias más perjudiciales entre las diferentes materias activas de los plaguicidas utilizados (tabla 4.22).

Aspectos como la dosis empleada, estado de desarrollo del cultivo, toxicidad intrínseca, niveles máximos tolerables en fruto, ingesta diaria admisible, tiempos de residencia y otras propiedades físico-químicos intervienen en el cálculo. Los resultados expresados aquí deberán considerarse orientativos. La complejidad del tema aconseja dedicar un capítulo al cálculo de la toxicidad de los plaguicidas tanto para los seres humanos como los ecosistemas (ver capítulo 5).

El alto grado de toxicidad de los plaguicidas enmascara el efecto de las emisiones de metales pesados. De entre ellos cabe destacar: Pb procedente de **E**, Cr generado en **F**, Co, en **ME**, Ni a partes iguales producido en **ME** y **F** y Hg generado en **RES** serían los metales con más importancia a nivel de emisiones tóxicas.

4.4.8 Toxicidad Ecosistema Acuática, ATI

Azoxistrobin, 51,1% y a continuación Ciromazina, 27,5%, son las materias activas que presentan un más alto impacto sobre el ecosistema acuático. A pesar que la dosis total y el tiempo de residencia en agua es mayor en esta última la primera tiene una dosis sin efecto (NEC) para la fauna acuática más baja que la segunda. De ahí que tenga un impacto más alto Azoxistrobin.

Sin embargo en esta categoría será importante considerar sustancias que se producen con relación al tratamiento dado a los residuos, **RES**. Por sustancias la más importante es la emisión de Hg. Le sigue la emisión de Cd, Zn y Cu. Este aspecto se estudiará más detenidamente en la sección 4.5.2.

4.4.9 Toxicidad Ecosistema Terrestre, TTI

También en este caso la máxima toxicidad se debe a la aplicación de plaguicidas, **CF**. La principal materia activa que ha mostrado un impacto mayor es la emisión de Ciromazina al suelo, 83,2%. Esto se debe principalmente a que durante el cultivo estudiado ha habido tres tratamientos con esta materia activa y además esta sustancia tiene un tiempo de residencia en suelo bastante alto. El plaguicida elaborado con la materia activa Azoxistrobin presenta una contribución de 14,1% del total de la categoría. A diferencia del ecosistema acuático Ciromazina tiene un valor de toxicidad para la fauna terrestre, (PNEC) más bajo que Azoxistrobin.

4.4.10 Desecación, WR

El subsistema que más agua utiliza es la fertirrigación con un consumo de 21,8 L por kg de tomate. Este valor representa un 96,8% del total de agua utilizada en el total de la producción (tabla 4.22). En la actualidad no existen indicadores para evaluar la calidad de este consumo de agua. Por tanto en este trabajo y para la comparación con diferentes alternativas de cultivo se utilizará el agua consumida por kg producido, también conocida como eficiencia en el uso del agua, sin entrar en la valoración de la procedencia de ésta.

4.4.11 Uso del suelo

Teniendo en cuenta que la producción es de 15 kg·m⁻². En el sistema productivo analizado la ocupación del suelo ha sido de 0,06 m² en 0,5 años por UF. Sin embargo la mera cuantificación del espacio ocupado genera poca información sobre la calidad de esta ocupación. Dada la complejidad de la medida de esta calidad se ha dedicado un capítulo aparte para tratar el tema (capítulo 6).

4.5 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

El sistema de cultivo de tomate estudiado en la sección 4.4 representa un escenario altamente probable hacia el que tenderá el cultivo en invernadero. Se considera necesario comparar estos resultados con diferentes alternativas en las técnicas de cultivo. En primer lugar se comparan los resultados obtenidos a partir del sistema de cultivo con sistema de recirculación con el sistema hidropónico de drenaje libre y con cultivo en suelo, ambos más representativos del presente. También se presentan los resultados de la diferente gestión dada a los residuos. Se compara la utilización de un material de cubierta de placa rígida de duración más larga con el clásico film de LDPE. Se analiza la influencia que la distancia de la fábrica de los materiales de construcción del invernadero a la finca ejerce sobre el impacto ambiental. Y se estudia el efecto que diferentes pautas de fertilización, cuando el cultivo se realiza en suelo, tendrán sobre el impacto global. Se analizará cada alternativa en particular, y su influencia sobre el impacto global de la producción de tomate, especificándose los subsistemas más afectados. Se llevará a cabo un análisis de sensibilidad en los casos en que los valores comparados así lo requieran. Asimismo se procederá a un análisis de las emisiones más importantes.

4.5.1 Influencia del sistema de cultivo

En esta sección se comparan las cargas ambientales del sistema de cultivo hidropónico con recirculación de lixiviados, **RECIR**, con sistema hidropónico con drenaje libre, **ABIERTO**, y con cultivo directamente en suelo, **SUELO**.

La figura 4.8 muestra los cocientes del impacto ambiental del sistema **ABIERTO** frente a **RECIR** y del cultivo en **SUELO** respecto a **RECIR** para las diez categorías de impacto consideradas en este estudio. En primer lugar cabe destacar la mayor producción del sistema hidropónico, 25% más alta, tanto en **ABIERTO** como en **RECIR**, lo cual se refleja en un menor impacto potencial para todas las categorías y subsistemas respecto al cultivo **SUELO**. En aquellas categorías en que la ratio sea menor de 1,25 significará que el sistema de cultivo en suelo es ambientalmente menos perjudicial, es el caso, por ejemplo de AR, AI y POI. Por el contrario ratios **SUELO/RECIR** superiores a 1,25 implican que la práctica **RECIR**, resulta más beneficiosa ambientalmente. Dado que la producción considerada entre **ABIERTO** y **RECIR** es la misma, ratios superiores o inferiores a 1 (figura 4.8) obedecen a las diferentes técnicas empleadas e implican mayor impacto de **ABIERTO** o **RECIR**, respectivamente.

Comparando **SUELO** con **RECIR**, y atendiendo al conjunto del ciclo de vida de la producción de tomate, la diferencia más importantes se da en la categoría de EI, 2,69 (figura 4.8), en el consumo de agua, WR 1,45 y en la categoría CCI, 1,44. Estas mismas categorías con diferencias más pequeñas, 1,59, 1,24 y 1,12 respectivamente, resultan más perjudiciales para **ABIERTO**, respecto a **RECIR**. En sentido contrario la categoría POI resulta más perjudicada por el sistema de cultivo con recirculación, 0,85 y 1,01 en relación con **SUELO** y **ABIERTO** También la categoría AI resulta más beneficiada en **SUELO** o **ABIERTO** respecto a **RECIR**, siendo las ratios de 1,11 y 0,96 respectivamente. Debido a la no utilización de sustrato AR resulta especialmente beneficiada en **SUELO** con una ratio de 0,35.

Tabla 4.23 Promedio, coeficiente de variación y percentiles 5 y 95 de las principales categorías afectadas por el tipo de sistema de cultivo, RECIR, SUELO o ABIERTO

Global			
	avg	CV	[5% -95%]
EI	0,176	(0,487)	[0,1 - 0,269]
AR	0,0186	(0,488)	[0,08 - 0,024]
AI	0,0279	(0,072)	[0,0262 - 0,0301]
CCI	96,51	(0,191)	[81,35 - 116,97]
ODI	0,00002	(0,134)	[0,000018 - 0,000023]
POI	0,162	(0,097)	[0,144 - 0,172]
WR	24,9	(0,13)	[22,99 - 28,68]

El análisis de sensibilidad realizado muestra que las categorías AR con un coeficiente de variación del 48,8% y EI, con un CV de 48,7% muestran mayor sensibilidad a la técnica de cultivo utilizada. En menor medida CCI 19,1%, ODI 13,4%, POI 9,7% y AI 7,2% son los impactos más afectados por el tipo de cultivo realizado (tabla 4.23).

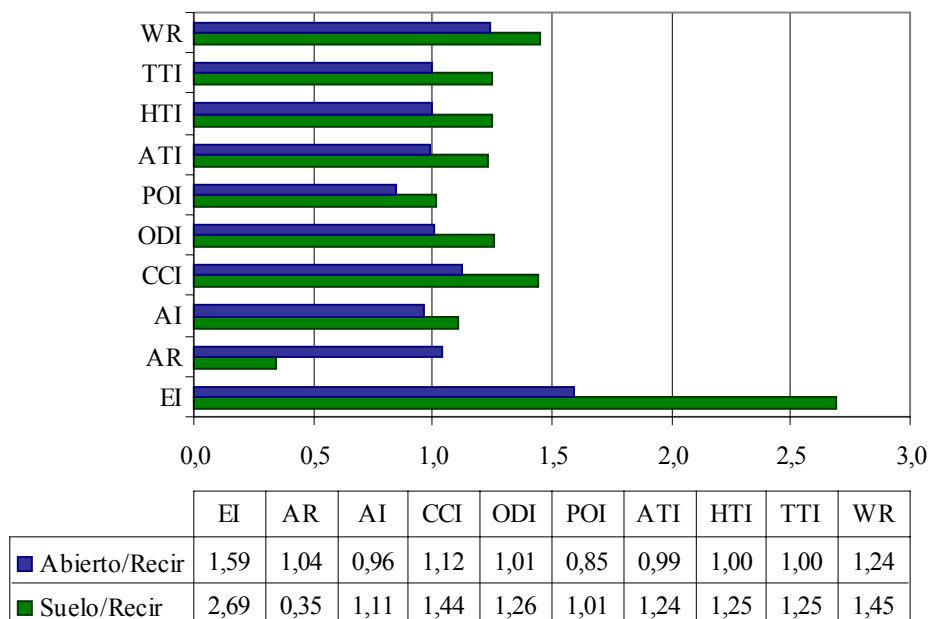
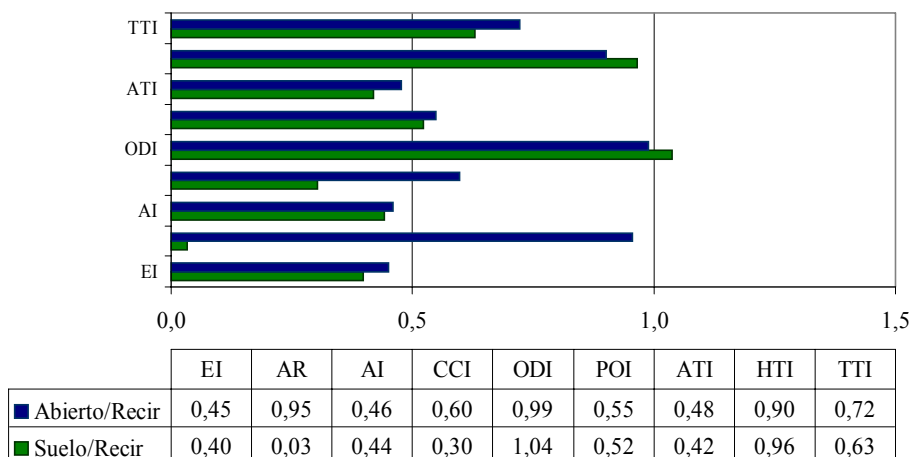


Figura 4.8 Influencia del sistema de cultivo: suelo, recirculación con drenaje libre y recirculación. Resultados expresados como ratios entre ABIERTO y RECIR y SUELO versus RECIR para las diferentes categoría en el proceso global de producción de tomate bajo invernadero.

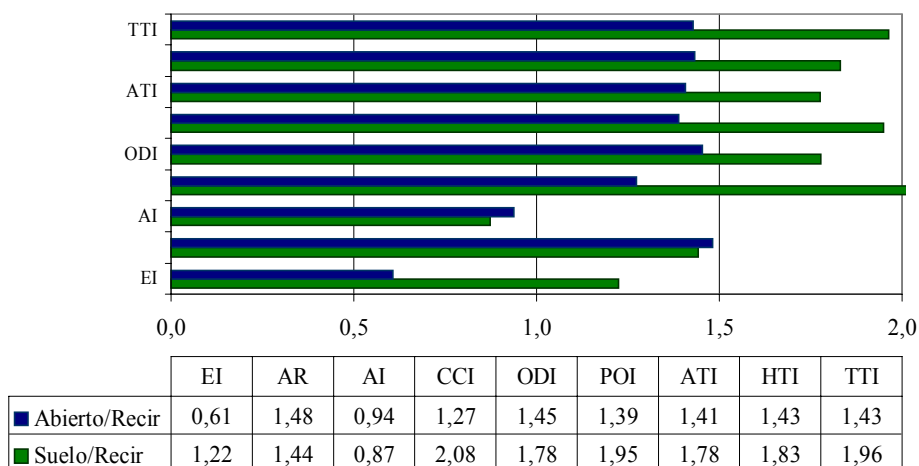
Si se analiza por subsistemas (figura 4.9) se observa que la fabricación del material de distribución del riego, **R**, la fabricación de fertilizantes, **F**, y la fertirrigación, **FR**, son los subsistemas que presentan diferencias más importantes. En el subsistema, **R**, (figura 4.9 a) el impacto es mayor en el sistema hidropónico con recirculación por su mayor necesidad de material auxiliar, cosa que repercute en todas las categorías debido a un aumento de las emisiones al aire, (hidrocarburos, NH_3 , NO_2 y SO_2) y al agua (aceites y fenoles) y al mayor consumo de gas natural producidas durante el proceso de fabricación (tabla 4.24).

En el proceso de fabricación de fertilizantes, **F**, (figura 4.9 b) la mayoría de las categorías se ven perjudicadas por una mayor necesidad de fertilizantes, especialmente nitrato potásico, en el caso de **SUELO**. Se observa, sin embargo, un incremento de emisión de NH_3 (tabla 4.26) que procede de la fabricación de nitrato amónico, utilizado en **RECIR** por su poder tampón.

a) Subsistema Fabricación materiales sistema fertirrigación



b) Subsistema Fertilizantes



c) Subsistema Fertirrigación

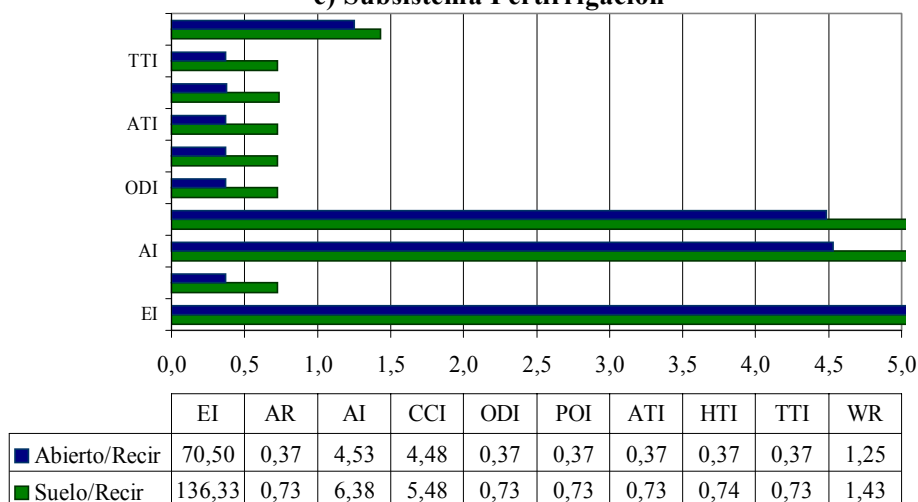


Figura 4.9 Influencia del sistema de cultivo en suelo e hidropónico con drenaje libre versus recirculación para las diferentes categorías en los subsistemas de a) fabricación de los materiales auxiliares de riego, **R**, b) fertilizantes, **F**, y c) manejo de la fertirrigación **FR**.

Tabla 4.24 Subsistemas y correspondientes valores de emisiones y recursos principales expresados por kg de tomate producido en los tres sistema de cultivos, RECIR, ABIERTO y SUELO y principales categorías afectadas

		RECIR	ABIERTO	SUELO	categorías
R					
(r) gas natural	kg	1,21E-02	8,00E-03	9,50E-03	AR
(a) etileno	g	2,87E-03	2,87E-03	3,59E-03	POI
(a) hidrocarburos (otros)	g	1,45E-01	7,34E-02	7,88E-02	POI
(a) NH ₃	g	2,12E-05	6,18E-06	7,73E-06	EI, AI
(a) N ₂ O	g	9,09E-05	9,00E-05	1,12E-04	EI, CCI
(a) NO ₂	g	1,38E-01	6,19E-02	6,92E-02	EI, AI, HTI
(a) SO ₂	g	1,39E-01	6,40E-02	7,12E-02	AI, HTI
(w) aceites	g	1,40E-03	7,05E-04	7,64E-04	ATI
(w) fenoles	g	2,15E-05	6,81E-06	8,52E-06	ATI, HTI
F					
(r) gas natural	kg	8,77E-03	1,10E-02	1,64E-02	AR
(r) KCl	kg	8,83E-03	1,30E-02	1,84E-02	AR
(r) fosfatos	kg	1,33E-02	2,23E-02	8,93E-03	AR
(a) Cadmium	g	1,07E-06	1,55E-06	2,11E-06	TTI, HTI, ATI
(a) CO ₂	g	3,29E+01	4,28E+01	6,08E+01	CCI
(a) Cobalto	g	1,88E-06	2,70E-06	3,63E-06	TTI, HTI
(a) Halon	g	1,18E-07	1,72E-07	2,10E-07	DOI, CCI
(a) NH ₃	g	5,31E-02	2,92E-03	1,36E-03	EI, AI
(a) Niquel	g	2,29E-05	3,32E-05	4,48E-05	TTI, HTI, ATI
(a) Plomo	g	6,90E-06	9,25E-06	1,11E-05	TTI, HTI, ATI
(a) Selenium	g	1,24E-06	1,79E-06	2,22E-06	HTI
(a) Zinc	g	6,61E-06	9,41E-06	1,26E-05	TTI, HTI, ATI
(w) aceites	g	6,65E-04	9,63E-04	1,29E-03	ATI
(w) fenoles	g	9,53E-06	1,30E-05	1,57E-05	ATI, HTI
FR					
(a) CO ₂	g	4,32E+00	1,28E+00	2,74E+00	CCI
(a) Halon	g	5,42E-08	1,61E-08	3,44E-08	ODI
(a) N ₂ O	g	6,07E-05	5,96E-02	7,53E-02	CCI, EI
(a) SO ₂	g	2,52E-02	7,46E-03	1,60E-02	AI, HTI
(w) NO ₃	g	0,00E+00	3,73E-01	1,09E+00	EI
(w) plomo	g	1,91E-06	5,67E-07	1,21E-06	TTI, HTI, ATI

En el manejo de la fertirrigación (figura 4.9 c) resulta especialmente perjudicada la categoría de EI por la emisión de nutrientes al suelo. También la categoría de CCI se ve afectada por una mayor emisión de N₂O. (tabla 4.24). El consumo de agua ha sido más alto en el sistema **SUELO** gastándose en el riego 31,1 L por kg de tomate, 27,2 L en el cultivo **ABIERTO** y 21,8 L en la producción de un kg de tomate en cultivo **RECIR** y, esto representa un 43% y un 25% más de consumo de agua por kilo de tomate respectivamente. El resto de las categorías presenta unos

valores más bajos en el cultivo en **SUELO** debido a un menor consumo de electricidad y una menor emisión de sustancias al aire como SO₂, Halon, o Plomo (figura 4.9 c y tabla 4.24).

4.5.2 Influencia de la gestión de los residuos

La comparación del impacto ambiental producido por los diferentes tratamientos de los residuos muestra la importancia de esta gestión. En la figura 4.10 se muestra, en porcentaje, la importancia que adquiere el sistema **RES** (gestión de los residuos). Cuando la biomasa se lleva a compostar, reutilizándose este compost y el resto de los residuos, plásticos y acero se llevan al vertedero (figura 4.10 a) se observa que el sistema **RES** causa alrededor de un 20% del impacto global del proceso de cultivo de tomate en invernadero para las categorías EI y CCI. Si todos los residuos se depositan en vertedero, el impacto causado por los residuos en el proceso total asciende a más del 90% en la categoría CCI, un 50% en la categoría de eutrofización y cerca del 40% en la categoría de formación de fotooxidantes (figura 4.10 b). En el caso de que todos los residuos se lleven a incineradora la gestión de los residuos afectará en un 60% en la categoría de cambio climático (figura 4.10 c).

En el análisis global, parte de los resultados quedan enmascarados por la importancia de otros sistemas, especialmente aquellos que se refieren a toxicidad. En estas categorías se ha visto la importancia del subsistema de los plaguicidas. Al observar el subsistema **RES** (figura 4.11) de manera específica se aprecia que el tratamiento de los residuos en incineradora genera 10 veces más impacto para la categoría de toxicidad humana que el depósito en vertedero. Esta relación es de 4,3 en el caso de toxicidad terrestre, mientras que por el contrario la toxicidad potencial de los ecosistemas acuáticos se reduce a la mitad. Las grandes ventajas de la incineración respecto al depósito en vertedero se dan para las categorías de formación de foto-oxidantes, eutrofización y cambio climático.

La comparación entre compostaje de la fracción verde o depósito en vertedero (figura 4.10 y 4.11) muestra que ésta es la causante de la mayor parte del impacto ambiental en vertedero para las categorías de formación de foto-oxidantes y cambio climático.

La generación de gases de efecto invernadero CH₄ y CO₂ por la biomasa es la causa del aumento de la categoría CCI. El primero se origina a partir de la descomposición de la biomasa en vertedero y el segundo se produce, tanto en dicha descomposición, como a causa de su combustión en incineradora.

En general, las emisiones de metales pesados al aire proceden principalmente de la incineración mientras que las emisiones al ecosistema acuático de los metales pesados provienen de

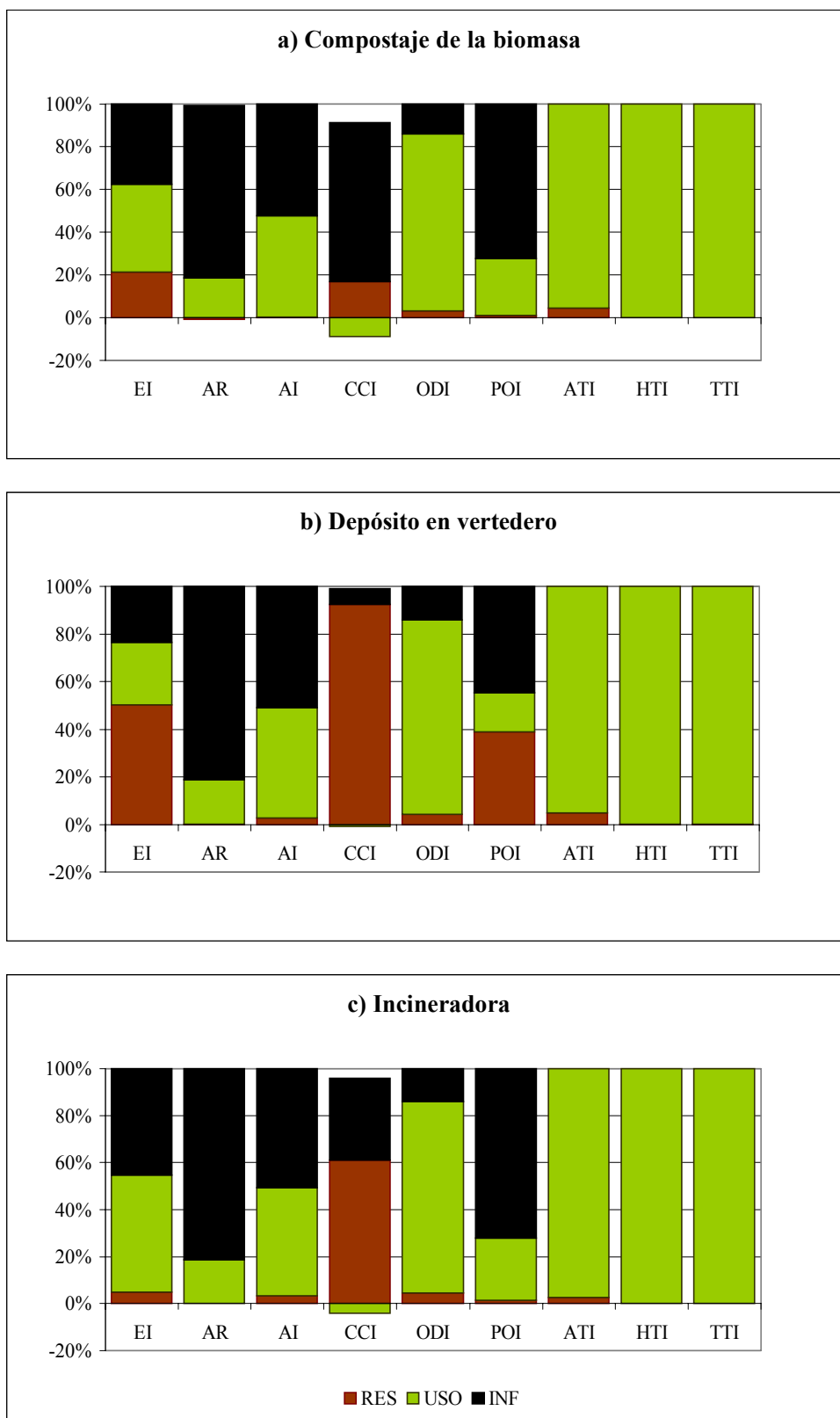


Figura 4.10 Porcentaje de contribución en el total del cultivo según el tipo de gestión del residuo. (FAB: fabricación infraestructura invernadero, USO, producción tomate y RES gestión de los residuos)

la descomposición de los materiales plásticos en vertedero. A destacar la importancia de las emisiones al aire de Hg y Pb procedente de la incineración de los plásticos. El Cd procede de la incineración de la biomasa y del poliestireno. Este último material también contribuye con las emisiones más altas de Zn. El ecosistema acuático se verá principalmente afectado por las emisiones de Pb generadas en la incineración de los polietilenos, y las emisiones de otros metales, Cd, Cu, Hg y Zn procedentes de la descomposición de estos materiales en vertedero (tabla 4.25). Estos últimos valores procedentes de los inventarios de las base de datos deberán, sin embargo, considerarse prudentemente puesto que existen grandes diferencias entre éstas.

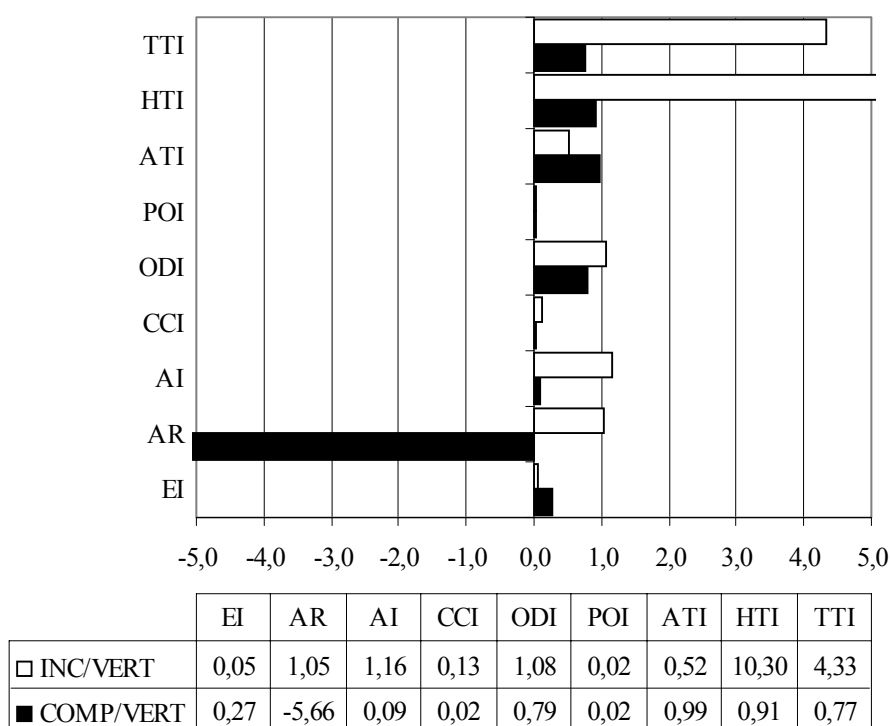


Figura 4.11 Influencia en las diferentes categorías del tratamiento dado a los residuos en el subsistema **RES**. Los valores se expresan como ratio entre incineración de todo el residuo respecto a depósito en vertedero de todo los residuos (INC/VERT) y compostaje de la biomasa, resto a vertedero respecto a todo el residuo depositado en vertedero (COM/VERT).

En la figura 4.12 y la tabla 4.25 se pueden observar las emisiones más importantes generadas por los residuos procedentes de los diferentes materiales utilizados, las unidades están expresadas en g de sustancias emitida por material utilizado por kilo de tomate producido

Si además de compostar la biomasa se reutiliza el acero, el subsistema **RES** se verá beneficiado en las categorías de AR en un 21%, AI en un 10% por la desaparición de emisiones de hidrocarburos, N₂O y en menor medida de SO_x. También ATI se ve beneficiada en un 9% por la menor emisión de Cd, Cu y Zn (Figura 4.12).

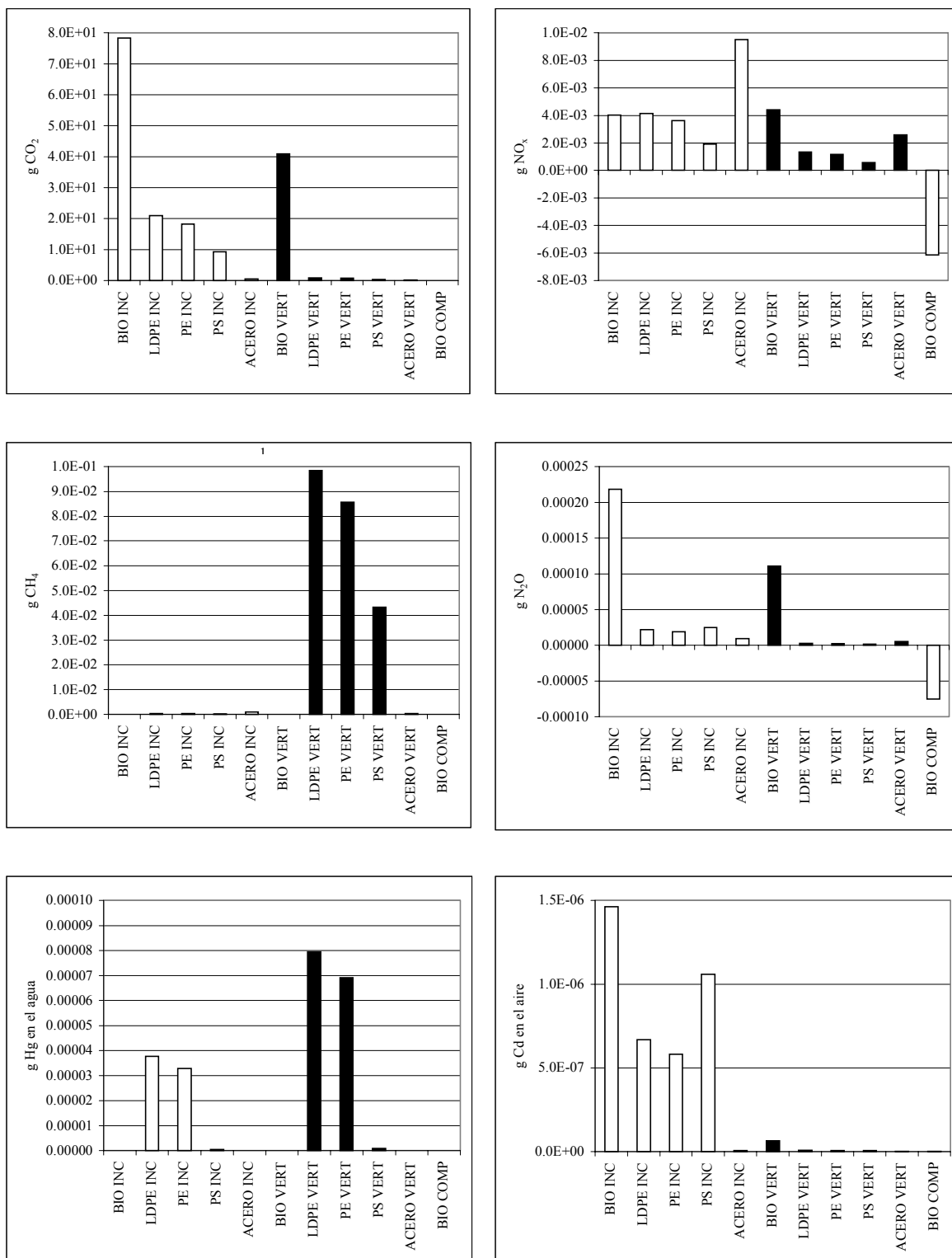


Figura 4.12 Emisiones principales de los diferentes materiales que intervienen en el cultivo según sea su gestión en incineradora, en vertedero o compostaje. BIO: biomasa, LDPE: polietileno baja densidad, PE polietileno, PS: poliestireno, INC: incineradora, VERT: vertedero, COMP: compostaje

Tabla 4.25 Emisiones de las principales sustancias en $\text{g}\cdot\text{kg}_{\text{tom}}^{-1}$ para diferentes materiales según depósito en vertedero, quema en incineradora o compostaje y categorías de impacto a las que afecta

	BIO INC	LDPE INC	PE INC	PS INC	ACERO INC	BIO VERT	LDPE VERT	PE VERT	PS VERT	ACERO VERT	BIO COMP	categorías
emisiones aire												
NH ₃	8,2E-08	1,7E-07	1,5E-07	8,3E-08	3,1E-07	9,8E-06	5,4E-09	4,7E-09	6,4E-09	1,8E-11	4,0E-08	AI
CO ₂	7,8E+01	2,1E+01	1,8E+01	9,3E+00	5,6E-01	4,1E+01	8,7E-01	7,6E-01	3,8E-01	1,8E-01	-3,7E-01	CCI
CxHy	0,0	7,3E-04	6,3E-04	3,1E-04	2,5E-03	6,9E-05	6,1E-04	5,3E-04	2,6E-04	1,2E-03	-3,4E-03	POI
Cu	4,4E-05	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1E-07	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6E-09	HTI, TTI
CH ₄	0,0	2,9E-04	2,5E-04	1,2E-04	1,0E-03	1,5E+01	9,8E-02	8,6E-02	4,3E-02	2,2E-04	-2,0E-03	CCI, POI
NOx	4,0E-03	4,2E-03	3,6E-03	1,9E-03	9,5E-03	4,4E-03	1,3E-03	1,2E-03	5,8E-04	2,6E-03	-6,1E-03	EI
N ₂ O	2,2E-04	2,2E-05	1,9E-05	2,5E-05	9,4E-06	1,1E-04	2,7E-06	2,3E-06	1,2E-06	5,0E-06	-7,5E-05	CCI
Cd	1,5E-06	6,7E-07	5,8E-07	1,1E-06	5,7E-09	6,5E-08	7,7E-09	6,7E-09	5,1E-09	2,5E-09	2,9E-09	ATI, HTI, TTI
Hg	0,0	1,5E-05	1,3E-05	2,0E-07	4,9E-09	0,0	1,5E-06	1,3E-06	1,6E-08	2,1E-10	2,9E-09	HTI, TTI
Pb	1,7E-05	1,0E-05	9,0E-06	1,1E-06	3,4E-08	3,3E-09	7,8E-09	6,8E-09	3,0E-09	1,3E-08	7,7E-08	HTI, TTI
Ni	8,5E-07	5,6E-08	4,8E-08	1,9E-08	2,9E-07	0,0	4,6E-08	4,0E-08	2,0E-08	8,8E-08	5,5E-08	HTI, TTI
Zn	7,1E-05	9,2E-05	8,0E-05	1,1E-04	4,3E-06	3,8E-07	1,3E-06	1,1E-06	5,5E-07	2,2E-06	1,4E-07	HTI, TTI
emisiones agua												
NH ₄	1,3E-05	3,5E-05	3,1E-05	1,3E-05	1,2E-05	1,7E-01	9,4E-05	8,2E-05	1,5E-04	4,7E-06	-6,0E-06	EI
Cd	1,0E-07	8,8E-06	7,6E-06	6,0E-06	1,3E-05	4,2E-06	1,3E-05	1,2E-05	9,5E-06	2,6E-05	1,3E-09	ATI
Cu	3,1E-05	1,6E-04	1,4E-04	3,0E-05	5,9E-04	5,5E-05	3,0E-04	2,6E-04	5,1E-05	1,2E-03	1,1E-07	ATI
Pb	6,3E-07	1,6E-04	1,4E-04	6,7E-06	2,5E-05	3,7E-07	1,3E-05	1,1E-05	5,6E-07	5,0E-05	1,2E-07	ATI
Hg	0,0E+00	3,8E-05	3,3E-05	3,9E-07	1,8E-10	0,0	7,9E-05	6,9E-05	8,5E-07	2,7E-11	1,8E-10	ATI
Zn	1,9E-06	2,6E-03	2,2E-03	1,2E-03	9,1E-04	3,3E-04	4,1E-03	3,6E-03	2,0E-03	1,8E-03	2,3E-07	ATI

4.5.3 Influencia del material de cubierta

La figura 4.13 compara el impacto potencial de un cultivo de tomate en hidropónico con recirculación y control fitosanitario integrado para cada una de las categorías en función del tipo de material de cubierta. Se analizan dos materiales de cubierta, película LDPE de duración tres años y placa de policarbonato, cubierta de duración 12 años.

El análisis de los resultados globales presenta un valor bastante semejante. La utilización de placas de policarbonato aumenta la carga ambiental en el indicador EI y AI en un 6% y 5%. Por otro lado disminuye la formación de foto-oxidantes en un 9% y CCI en un 4%. En las otras categorías los resultados quedan enmascarados por la importancia de otros subsistemas, por ejemplo la toxicidad humana y terrestre por el subsistema CF.

Si se analiza únicamente los dos subsistemas que afectan al cambio del material, esto es, la fabricación del material de la estructura, **E**, y la gestión de los residuos, **RES**, se observa que el impacto ambiental de fabricación del PC es más alto que el del LDPE mientras que en **RES** es inferior debido a una duración mayor (figura 4.14).

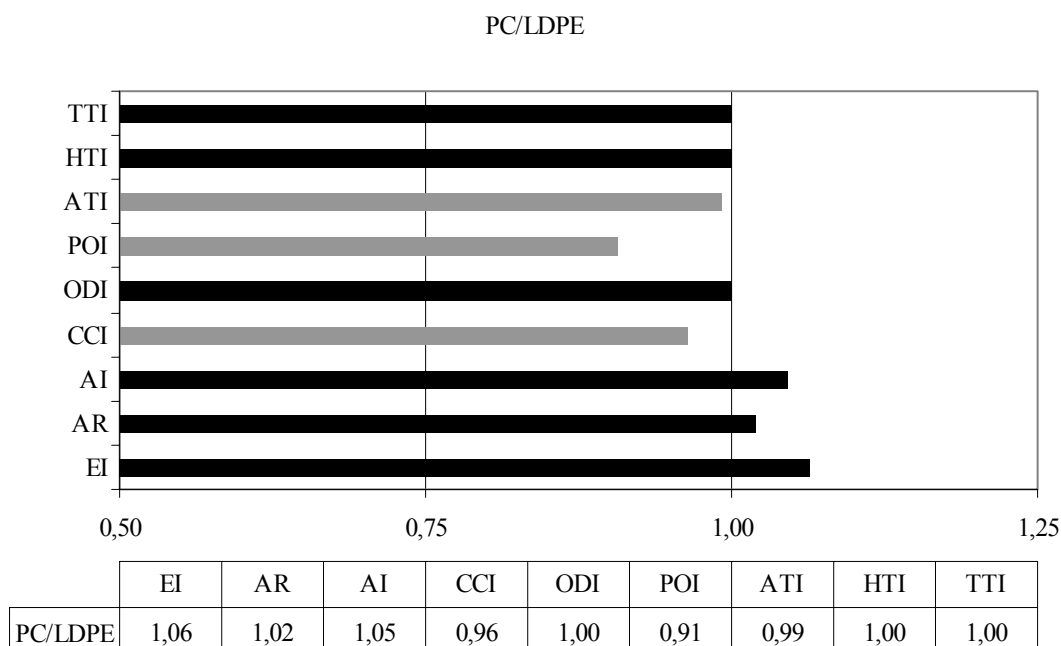
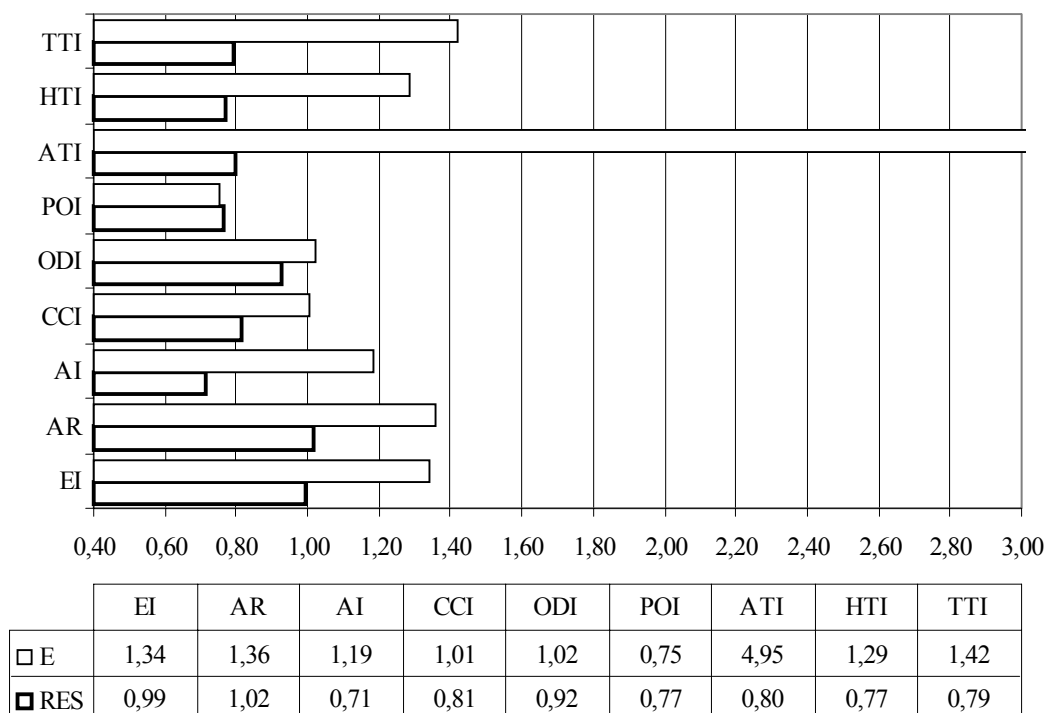


Figura 4.13 Influencia del material de cubierta PC versus film LDPE para las diferentes categorías en el proceso global de producción de tomate

Los resultados del subsistema **E** muestran que la fabricación de PC resulta más perjudicial ambientalmente que la de LDPE, en primer lugar por un mayor número de recursos utilizados (figura 4.14) especialmente gas natural y carbón, por el contrario la fabricación de LDPE consume

más petróleo (tabla 4.26). Las categorías de CCI, y ODI prácticamente no se ven afectadas por la utilización de este tipo de cubierta (figura 4.14). Las emisiones de CO₂ y CH₄ (tabla 4.26) contribuyen a un ligero impacto superior en la categoría CCI. POI se ve claramente beneficiada en el caso de PC por la menor emisión de hidrocarburos. Los valores más altos en EI (figura 4.14) vienen producidos principalmente por emisiones más altas de fosfatos en el agua y NO₂ en el aire. Los óxidos de Nitrógeno y compuestos azufrados más altos (tabla 4.26) que se producen en la fabricación del PC son los causantes del mayor impacto en la categoría AI (figura 4.14).

Igualmente en el análisis específico de este subsistema se observa un aumento de la toxicidad destacando la categoría de ecotoxicidad acuática (figura 4.14) que se ve afectada por las más altas emisiones de mercurio y fenoles en el agua (tabla 4.26).



*Figura 4.14 Influencia del material de cubierta Policarbonato versus film de polietileno para diferentes categorías en el subsistema de fabricación de la estructura **E** y en el de gestión de los residuos, **RES***

El subsistema **RES** reduce las cargas ambientales con el uso de PC. La mayor duración de este material produce una reducción próxima al 20% para la mayoría de las categorías (figura 4.14), mejora que destaca especialmente para la categoría AI (29%). De todas maneras estos valores deben considerarse indicativos porque no se dispone de datos específicos de degradación en vertedero e incineración para el policarbonato, habiéndose utilizado los datos procedentes de plásticos en general.

Tabla 4.26 Subsistemas y correspondientes valores de emisiones y recursos principales en los dos materiales de cubierta, ratio y principales categorías afectadas

E		LDPE	PC	categorías
(a) CO ₂	g	7,68	19,62	CCI
(a) Mercurio	g	0,0	1,96E-6	TTI, HTI,ATI
(a) NO ₂	g	0,041	0,083	EI, AI, HTI
(a) CH ₄	g	0,0	0,086	IPPC
(a) hidrocarburos	g	0,065	0,020	POI
(a) Plomo	g	0,0	7,8E-9	TTI, HTI,ATI
(a) SO ₂	g	0,0443	0,0503	AI, HTI
(r) gas natural	kg	0,0025	0,0054	AR
(w) fenoles	g	0,0	0,0002	ATI
(w) fosfatos	g	7,74E-6	2,05E-4	EI
(w) Mercurio	g	0,0	1,96E-6	ATI, HTI

Para conocer hasta que punto un error causado en los datos del inventario causarían un error en la globalidad del ACV se ha realizado un análisis de sensibilidad tomándose como ejemplo el módulo de fabricación del PC. Se ha variado un 10% las principales substancias que se diferencian de la fabricación del LDPE, éstas son emisiones al aire de CO₂, CH₄, Hg, NO₂, Pb y SO₂ y al agua de aceites y fenoles (tabla 4.27).

Tabla 4.27 Datos de las principales emisiones en la fabricación del policarbonato, variación del 10% para su aplicación en el análisis de sensibilidad

emisiones	Datos inventario	-10%	+ 10%
(r) Gas Natural	1461,4	1315,2	1607,0
(a) CO	3.690	3.321	4.059
(a) CO ₂	525.000	472.500	577.500
(a) CH ₄	23.100	20.790	25.410
(a) Hg	0,525	0,473	0,578
(a) N ₂ O	0,525	0,473	0,577
(a) NO ₂	22.050	19.845	24.255
(a) Pb	0,525	0,473	0,578
(a) SO ₂	13.650	12.285	15.015
(w) aceites	52,5	47,25	57,75
(w) fenoles	53,55	48,20	58,91

Los resultados de la tabla 4.28 muestran que la variación en los datos del inventario afectan como máximo en un 1,2% en el impacto global de la producción de tomate bajo invernadero. El subsistema muestra coeficientes de variación del 4,4%. Por lo tanto se podría admitir un error del 10% en los datos del inventario sin que se vieran afectados los resultados globales.

Tabla 4.28 Resultados globales y para el subsistema E de las principales categorías afectadas por una variación del 10% en las principales sustancias del inventario de fabricación del policarbonato

	Global			Subsistema E		
	avg	CV	[5% -95%]	avg	CV	[5% - 95%]
EI	0,107	(0,011)	[0,106 -0,108]	0,0258	(0,044)	[0,0246 -0,0269]
AR	0,0239	(0,003)	[0,0238 -0,0240]	0,0017	(0,039)	[0,0017 -0,0018]
AI	0,029	(0,012)	[0,028 -0,029]	0,0082	(0,044)	[0,0078 -0,0085]
CCI	78,69	(0,010)	[77,91 -79,48]	32,53	(0,024)	[31,74 -33,31]

4.5.4 Influencia del tipo de fertilización

Cuando el cultivo se realiza en suelo, la dosis y tipo de fertilizantes utilizadas dependerán de los análisis de suelo y agua. Estas diferentes prácticas de abonado condicionan el impacto producido. La tabla 4.29 muestra los resultados del análisis de sensibilidad realizado para los cuatro ejemplos de fertilización procedentes de cuatro fincas (tabla 4.13) en el impacto global, en el subsistema de fertilizantes y en el de fertirrigación.

En el impacto global la categoría más afectada será la de EI con un valor medio de 0,282 g eq. de PO_4^- y un CV del 45,9%. Le seguirá en importancia CCI con un valor medio de 106,42 g eq. y un CV de 23%. El agotamiento de recursos no renovables y la acidificación presentan unos valores medios de $7,42\text{E-}03$ años⁻¹ y $2,89\text{E-}02$ g eq. de H^+ con un CV de 8,7% y 6,1% respectivamente. El resto de las categorías se verán afectadas en menor medida $\text{CV} \leq 2\%$

El subsistema fabricación de fertilizantes se halla fuertemente influenciado en todas las categorías con CV que van desde valores del 14%, AR y AI, hasta el 27,4%, EI, (tabla 4.29). En este subsistema cabe destacar la importancia de la emisión de metales pesados con un CV de entre 17 y 21%, emisiones que repercuten principalmente en las categorías de toxicidad, HTI, ATI y TTI.

El subsistema fertirrigación presenta variaciones muy importantes de hasta el 68,4% en la categoría EI con un valor medio de 0,182g eq. PO_4^- y en las categorías CCI y AI, con CV de 20 y 19% respectivamente. Las variaciones en este subsistema son debidas mayoritariamente a las diferentes emisiones de compuestos nitrogenados.

Tabla 4.29 Resultados globales y para los subsistemas F y FR de las principales categorías afectadas por diferentes dosis de fertilizantes.

	Global			F			FR		
	avg	CV	[5% -95%]	avg	CV	[5% - 95%]	avg	CV	[5% - 95%]
EI	0,282	(0,459)	[0,129-0,445]	0,035	(0,274)	[0,022-0,043]	0,182	(0,684)	[0,042-0,344]
AR	7,4E-03	(0,087)	[0,007-0,0081]	4,6E-03	(0,14)	[0,004-0,0053]	4,2E-05	(0,0)	[4,E-05-4,E-05]
AI	0,0289	(0,061)	[0,027-0,031]	6,2E-03	(0,14)	[0,005-0,007]	6,2E-03	(0,19)	[0,005-0,008]
CCI	106,42	(0,23)	[69,5-122,4]	85,3	(0,23)	[55,5-96,6]	31,6	(0,20)	[24,4-39,5]
ODI	2,3E-05	(0,02)	[2,E-05-2,E-05]	2,1E-06	(0,19)	[2,E-06-3,E-06]	4,7E-07	(0,0)	[5,E-07-5,E-07]
POI	0,169	(0,02)	[0,164-0,172]	0,0164	(0,21)	[0,011-0,0192]	1,4E-03	(0,0)	[0,0014-0,0014]
ATI	6,57	(0,0)	[6,57-6,57]	6,5E-04	(0,20)	[0,0005-0,0008]	9,2E-05	(0,0)	[0,0001-0,0001]
HTI	48.908	(0,0)	[48.908-48.908]	0,2832	(0,19)	[0,207-0,338]	0,069	(0,02)	[0,068-0,071]
TTI	167,64	(0,0)	[167,6-167,6]	3,3E-05	(0,21)	[2,E-05-4,E-05]	5,0E-06	(0,0)	[5,E-06-5,E-06]

Los resultados muestran la importancia que sobre el impacto ambiental tiene la gestión de los fertilizantes químicos, tanto en el proceso de fabricación como de gestión de la fertirrigación, se trata de un tema al cual deberá profundizarse en su estudio y optimización.

4.5.5 Influencia del transporte de la estructura

Dado que la producción de tomate del Maresme se destina básicamente a mercado local, máximo 60 km de transportes y previamente ya se mostrado el beneficio ambiental de la proximidad de los mercados. En esta sección se muestran los resultados del análisis del factor transporte del material que compone la estructura, suponiendo una distancia desde la factoría de 0 km, 400 km, 800 km y 1600. En todos los casos y a escala global la categoría más afectada es la DOI con un aumento de un 4%, un 9% y un 17% respectivamente (figura 4.15).

El estudio detallado del subsistema E en el cual se incluye el transporte (figura 4.16) refleja que las categorías que se ven más afectadas son ODI, CV 55%, (tabla 4.30) y TTI, CV 48%, (tabla 4.30). La emisión de Halon aumenta el potencial de agotamiento de ozono, ODI, ratios 1,72, 2,45 y 3,89 respecto a 400, 800 y 1600 km de distancia respectivamente. La variación en TTI, (ratio 1,55, 2,10 y 3,21) es debida principalmente a las emisiones de Zinc y Niquel (tabla 4.31). Las emisiones de NO₂ (tabla 4.31) causadas por el transporte son las principales causantes del incremento de potencial de eutrofización en el caso de considerar el transporte

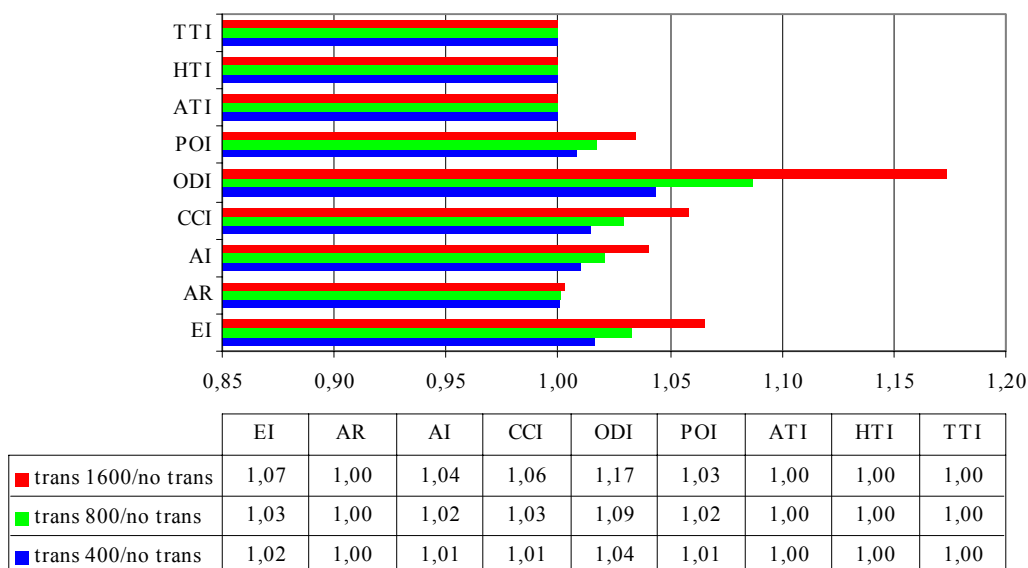


Figura 4.15 Influencia en el impacto global de producción de tomate de la distancia del transporte de material que compone la estructura. Ratios de una distancia de 1600, 800 y 400 respecto a 0 Km (no transporte)

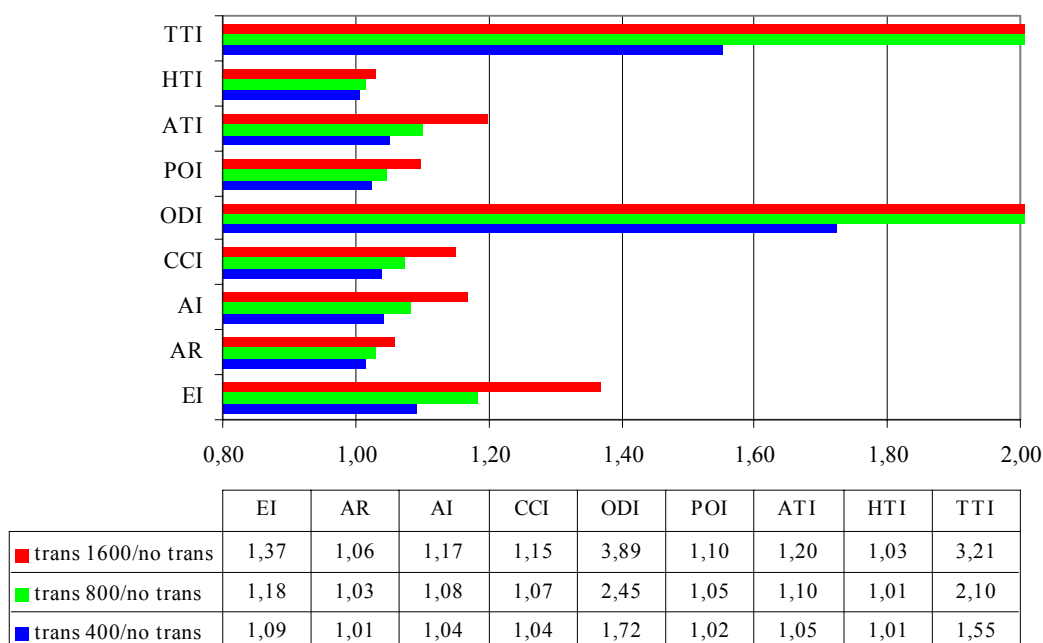


Figura 4.16 Influencia en el subsistema E para las diferentes categorías de la distancia de la factoría del material de la estructura. Ratios de una distancia de 1600, 800 y 400 respecto a 0 Km (no transporte)

Tabla 4.30 Resultados globales y para el subsistema E de las principales categorías afectadas por la distancia de la factoría del material de la estructura

	Global			E		
	avg	CV	[5% -95%]	avg	CV	[5% - 95%]
EI	0,10	(0,027)	[0,10-0,11]	0,02	(0,14)	[0,02-0,02]
AI	0,027	(0,017)	[0,027-0,028]	0,007	(0,07)	[0,007-0,008]
CCI	82,2	(0,024)	[80,2-84,8]	33,0	(0,06)	[31,0-35,6]
ODI	1,9E-05	(0,069)	[1,8E-05-2,1E-05]	2,4E-06	(0,55)	[1,1E-06-4,1E-06]
ATI	5,32	(0,000)	[5,32-5,32]	0,002	(0,08)	[0,002-0,002]
TTI	134,1	(0,000)	[134,1-134,1]	4,7E-05	(0,48)	[2,4E-05-7,6E-05]

Tabla 4.31 Subsistema y correspondientes valores de emisiones comparando el transporte del material utilizado en la estructura, y principales categorías afectadas

		No Trans	Trans 400	Trans 800	Trans 1600	CATEGORÍAS
E						
(a) CO ₂	g	28,9	29,9	30,9	32,9	CCI
(a) Halon	g	8,8E-08	1,5E-07	2,1E-07	3,4E-07	CCI, ODI
(a) NO ₂	g	0,126	0,138	0,150	0,174	TTI, HTI, ATI
(a) N ₂ O	g	9,3E-05	2,2E-04	3,5E-04	6,2E-04	AI, EI, HTI
(a) Zinc	g	3,5E-06	4,3E-05	8,2E-05	1,6E-04	TTI, HTI, ATI
(w) NH ₃	g	8,4E-05	1,1E-04	1,4E-04	1,9E-04	EI
(w) fenoles	g	7,8E-06	1,1E-05	1,5E-05	2,2E-05	EI
(w) Fósforo	g	2,8E-08	1,6E-07	2,8E-07	5,4E-07	ATI, HTI

4.5.6 Valores de referencia

La comparación de los valores absolutos de las diferentes categorías resulta compleja. La comparación entre procesos que utilizan diferentes recursos, que producen emisiones diversas y de las que no siempre se disponen datos de referencia, o actividades calculadas con factores de caracterización distintos conlleva una serie de problemas.

En la tabla 4.32 se comparan, para diferentes categorías, dos ejemplos: el primero es el impacto causado por la producción de un kilo de PE y su posterior depósito en vertedero tras una utilización de cinco años. Este impacto es entre 10 y 70 veces más alto, dependiendo de las categorías consideradas, que la producción de un kg de tomate.

El segundo ejemplo compara los kilómetros que deberá circular un coche que funciona a motor diesel y con 1,6 pasajeros (datos de SIMAPRO[®], (PRéConsultants, 2003) para igualar el impacto producido por la producción de un kilo de tomate bajo invernadero y con un sistema de recirculación.

Se observa por ejemplo que el impacto generado durante la producción de tomate en la categoría de EI equivale al mismo que producirá dicho coche al desplazarse 1,280 km. El recorrido de 450 m por el coche definido produce el mismo efecto sobre la categoría de cambio climático que la producción de tomate. Este ejemplo deberá ser tomado como orientativo puesto que se trata de una simplificación. Se han excluido la categoría de recursos puesto que no se ha considerado ni la fabricación del coche ni el combustible diesel, tan sólo su combustión. Asimismo de la producción de tomate se han excluido el impacto producido por los plaguicidas, puesto que se ha visto previamente su destacada importancia.

Tabla 4.32 Comparación del impacto ambiental del ciclo de producción de un kilo de tomate en invernadero con el impacto ambiental que produce la circulación de un coche diesel

		TOMATE	PE ⁽²⁾	Circulación Coche ⁽³⁾	
		UF: 1 kg _{tom}	UF: 1 kg	UF: 1 km	eq. km kg _{tom} ⁻¹
EI	g eq. PO ₄	0,100	1,63	0,078	1,28
AI	g eq. H ⁺	0,027	0,55	0,014	1,90
CCI	g eq. CO ₂	81,4	3.456	182,3	0,45
POI	g eq. etileno	0,170	8,06	0,031	5,43
ATI ⁽¹⁾	eq. Zn agua	0,253	17,23	0,076	3,33
HTI ⁽¹⁾	eq. Pb aire	1,13	10,56	27,06	0,04
TTI ⁽¹⁾	eq. Zn aire	0,00015	0,004	0,33	0,0005

⁽¹⁾Excluidos los plaguicidas

⁽²⁾Datos de Ecobilan

⁽³⁾Datos de SIMAPRO

La simplificación que ha permitido ilustrar este ejemplo aconseja, para el estado actual de conocimientos, la comparación en lugar de entre categorías, entre las emisiones de las principales sustancias y referenciarlas al total de dichas emisiones en Europa Occidental y al conjunto del planeta.

Las principales sustancias estudiadas muestran, que suponiendo que la producción total española de tomate bajo invernadero se realizase en las condiciones analizadas en la sección 4.4, equivalen a la emisión de alrededor de un 0,01% de las emisiones estimadas en el ámbito de la Europa occidental (CML) y de un 0,002% a escala mundial. Rompen esta tónica las emisiones de los metales pesados en el agua procedentes en el caso estudiado del depósito de plásticos en vertedero (tabla 4.33). La consulta a otra base de datos, SIMAPRO[®], (PRéConsultants, 2003) muestra valores de emisiones al agua de metales pesados de entre 1.000 veces (caso del Cd procedente del PE) a 25.000 veces menor (caso del Zinc para este mismo material), la utilización de estos valores bajaría estos porcentajes a los niveles medios considerados.

Por no disponerse de datos de referencia de la extracción de recursos no renovables y de los de las emisiones de los diferentes plaguicidas, estos aspectos han quedado fuera de estudio.

Tabla 4.33 Principales sustancias, categoría afectada, valores de las emisiones por UF, (g·kg_{tom}), por producción total de tomate bajo invernadero en España(g P N_{tom}), total de las emisiones de dicha sustancia en Europa Occidental y total mundial. Ratio de la producción de tomate bajo invernadero en España respecto a la emisión total Europea, % P/E y la total Mundial, % P/M

substancia	categoría	g·kg _{tom}	g·P N _{tom}	g Europa ⁽¹⁾	g Mundial ⁽¹⁾	% P/E	% P/M
(a) NH ₃	EI	5,3E-02	2,6E+08	3,5E+12	6,0E+13	0,007	0,000
(a) Cd	HTI,TTI	3,3E-06	1,6E+04	1,3E+08	5,9E+08	0,012	0,003
(a) CO ₂	CCI	4,0E+01	1,9E+11	3,4E+15	2,7E+16	0,006	0,001
(a) Cr	HTI, ATI, TTI	1,3E-05	6,1E+04	6,5E+08	2,9E+09	0,009	0,002
(a) Cu	HTI, ATI, TTI	1,8E-05	8,6E+04	6,0E+08	2,6E+09	0,014	0,003
(a) C ₂ H ₄	POI	7,9E-03	3,8E+07	5,1E+11	9,2E+12	0,007	0,000
(a) Halon	ODI	1,5E-06	7,3E+03	2,6E+08	2,8E+09	0,003	0,000
(a) Pb	HTI, ATI, TTI	1,5E-04	7,2E+05	1,2E+10	5,5E+10	0,006	0,001
(a) Hg	HTI, ATI, TTI	3,9E-06	1,9E+04	1,6E+08	7,2E+08	0,011	0,003
(a) CH ₄	CCI,POI	5,2E-01	2,5E+09	2,0E+13	3,0E+14	0,012	0,001
(a) Ni	HTI,TTI	6,8E-05	3,3E+05	1,6E+09	7,0E+09	0,021	0,005
(a) NO _x	EI,AI,HTI	4,0E-01	1,9E+09	1,4E+13	1,1E+14	0,014	0,002
(a) Se	HTI	5,2E-06	2,5E+04	2,4E+08	1,1E+09	0,011	0,002
(a) SO _x	AI,HTI	4,8E-01	2,3E+09	1,2E+13	1,4E+14	0,019	0,002
(a) Zn	HTI, ATI, TTI	9,4E-05	4,5E+05	6,5E+09	2,9E+10	0,007	0,002
(w) Cd ^(*)	ATI	8,9E-04	4,3E+06	2,1E+07	9,4E+07	19,961	4,519
(w) Cu ^(*)	ATI	6,2E-03	3,0E+07	1,7E+09	7,5E+09	1,752	0,397
(w) Hg ^(*)	ATI	1,5E-04	7,2E+05	1,4E+07	6,3E+07	5,032	1,139
(w) P	EI	2,4E-03	1,1E+07	2,2E+11	3,4E+12	0,005	0,000
(w) Zn ^(*)	ATI	1,2E-02	5,5E+07	1,1E+10	5,0E+10	0,493	0,112

^(*)Valores muy dispares según la fuente de datos consultada

4.6 INTERPRETACIÓN

En primer lugar cabe destacar la importancia de la mayor producción del sistema hidropónico, tanto con drenaje libre como con recirculación, lo cual se refleja en un menor impacto potencial respecto al cultivo en suelo. La elección de la producción como unidad funcional significa que cuanto más alta sea ésta más bajos serán los impactos producidos. La elección de otra unidad funcional como por ejemplo el espacio ocupado puede variar los resultados como se demuestra en van Woerden (2001). El área ocupada que puede ser una unidad funcional válida para áreas agrícolas o forestales interesantes además de por su producción por su interés en la conservación de un paisaje rural no resultaría apropiada para el cultivo en invernadero. De ahí se

desprendería el interés en aumentar la producción por unidad de superficie de suelo, esto es, intensificar la producción, que no el área ocupada como una mejora desde un punto de vista ambiental.

De la comparación entre las diferentes alternativas propuestas para la producción de tomate en invernadero destaca la importancia del cultivo en sustrato con recirculación tal y como también se señala en el trabajo de Nienhuis y col. (1996). La recogida del drenaje implica un menor impacto por kilo de producto. No tan solo por lo que parece evidente que es la reducción del potencial de eutrofización sino también porque cuando el agua de drenaje es reutilizada se pierden menos minerales implicando un menor consumo de fertilizantes y agua.

Cabe señalar la importante contribución del equipamiento de la infraestructura tiene sobre la mayor parte de las categorías, exceptuando las de toxicidad y uso del agua. Esta contribución se cifra entre un 10 y un 90% del total del proceso dependiendo de las categorías de impacto. Estos valores son más importantes en el sistema con recirculación, que precisa de sustrato y más material auxiliar para proceder a la recogida de lixiviados. Destacan las categorías CCI, AR, y POI con un 90%, 82% y 72%. En el sistema de drenaje abierto estos porcentajes son algo más bajos 62%, 76% y 66% respectivamente. Se mantiene la importancia del sustrato y disminuye la del material auxiliar. En cultivo en suelo se reducen un poco más, 45%, 27% y 63%, especialmente por la ausencia de sustrato. Estos resultados, que contrastan con los sistemas de producción industrial en los que el impacto del equipamiento es prácticamente despreciable están en concordancia con los resultados de Cowell (1998). Las razones las podríamos encontrar por un lado en las características del material utilizado para la construcción del invernadero, material con un tiempo de vida útil relativamente pequeño en comparación con las fábricas de los procesos industriales, y por otro en que el cultivo en sí requiere un consumo energético relativamente pequeño y a intervalos irregulares, comparando otra vez con sistemas industriales de producción continua. No cabe olvidar tampoco que la principal fuente de energía en la producción de tomate en el invernadero es la energía solar.

Siguiendo con la infraestructura y por lo que respecta al material de la cubierta se apunta que la opción de una placa de policarbonato no mejora ambientalmente el invernadero, puesto que su fabricación resulta más contaminante. Se recomendaría por tanto aumentar la investigación en la búsqueda de una infraestructura más beneficiosa ambientalmente, tanto en lo que se refiere a la estructura de soporte como al material de cubierta

El transporte, uno de los factores que más se han considerado por su efecto negativo en los ACVs (Jolliet, 1993, Jungbluth y col., 2000 Jolliet, 1993), está muy ligado a la localización de la producción y a la distancia de las fábricas que proporcionan la infraestructura y mercados. En la producción de invernaderos en el Maresme se ha mostrado que el transporte de 400 km para el

traslado de materiales repercute mínimamente. Esto, junto con el hecho de que la comercialización sea prácticamente en su totalidad para mercado local, distancia 30-60 Km, conduce a que el transporte no tenga un efecto especialmente negativo en los invernaderos del Maresme.

Aspectos como la localización de la explotación junto con la temporalidad de la producción tienen una importante influencia, tal y como señala Cowell (1998) en su tesis, y que puede ser mayor que la aplicación de determinadas técnicas. Factores como la fertilización y los tratamientos fitosanitarios presentan una gran variabilidad en categorías como la eutrofización, la acidificación o la toxicidad humana y de los ecosistemas. Sería interesante comparar estos resultados con los que podrían derivarse de otras herramientas ambientales como "Environmental Risk Assessment" (ERA) (Sonnemann, 2002) que tiene en cuenta este factor local.

El capítulo de producción de fertilizantes es otro de los temas susceptibles de mejora ambiental. Aunque se ha mostrado que el cultivo hidropónico con recirculación reduce el consumo de éstos, su contribución es de entre un 15% y 35% para las categorías de eutrofización, acidificación, cambio climático y agotamiento de recursos renovables. La reducción del uso de fertilizantes pasa por el ajuste entre el aporte y el consumo. Actualmente para evitar deficiencias nutritivas o acumulación de excesos salinos se realizan aportes excesivos de fertilizantes y agua. Deberán buscarse criterios de gestión más racional en el suministro de nutrientes al cultivo con el propósito de reducir el impacto ambiental y de aumentar el aprovechamiento de un recurso escaso, como es el agua.

El sistema hidropónico con recirculación precisa de unas condiciones de agua de una mínima calidad, condiciones que se han utilizado en este estudio. Sin embargo cabe considerar que el área mediterránea se caracteriza en gran parte de su territorio por la presencia de aguas salinas y escasez de agua de lluvia, aspectos, ambos, que dificultan el uso de las opciones ambientalmente más positivas (Antón y col., 2003). En este sentido la investigación sobre el mejor manejo de la fertirrigación en sistemas hidropónicos con recirculación contribuirá a un desarrollo más sostenible de éstos (Marfà, 2000).

La fabricación de los plaguicidas tiene un mínimo impacto negativo. Sin embargo, su aplicación adquiere la máxima importancia en los impactos de toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre y acuática. Su importante contribución aconseja profundizar en este tema tanto por lo que respecta a la variabilidad que pueden representar diferentes tratamientos como al método elegido para el cálculo de los factores equivalentes. Esta tema se desarrollará en el siguiente capítulo

La gestión de los residuos ha mostrado ser uno de los problemas principales. La separación de la fracción verde y su posterior compostaje constituye una importante reducción de la carga ambiental para todas las categorías alcanzando su máximo valor para la categoría de cambio

climático que puede reducirse entre el 40 y 70% dependiendo de la alternativa, vertedero o incineración. Si el acero se elimina del vertedero siendo reutilizado esta mejora alcanza a categorías como la acidificación o la ecotoxicidad acuática en porcentajes cercanos al 65%.

El depósito en vertedero también produce un aumento considerable de las emisiones de metales pesados. El impacto de estos queda enmascarado en el global de la producción por los valores de toxicidad de los plaguicidas.

La incineración, que puede resultar ciertamente ventajosa para alguna de las categorías, resulta claramente perjudicial para otras. Por tanto será un tema a estudiar más profundamente.

Las operaciones incluidas en el manejo del invernadero, **ME**, como la producción del plantel, cosa que requiere calefacción, la electricidad consumida en la apertura de ventanas, el material necesario para realizar la cosecha o el manejo del tractor puede representar entre un 6% y un 19% de contribución al global, exceptuando la categoría de agotamiento de ozono que aunque el valor total es bajo las operaciones consideradas en este subsistema representan un 69% del total. Este es quizás uno de los subsistemas analizados que menos mejoras puede admitir.

Los trabajos previos de ACV en horticultura protegida destacaban el consumo energético y las emisiones causadas por la calefacción y la iluminación como factores más importantes (Joliet, 1993, Van Woerden, 2001). Los invernaderos mediterráneos, generalmente, no utilizan calefacción, por tanto en este estudio no se ha considerado exceptuando la energía necesaria para la producción del plantel. Esta circunstancia permite detectar que hay otros factores susceptibles de mejora y que en anteriores trabajos podrían haber pasado desapercibidos.

Los inventarios comprenden numerosas sustancias que después no son evaluadas. Entre éstas hay entre 20 y 30 sustancias que influyen mayoritariamente tal y como también se demuestra en trabajos previos (Cowell, 1998, Antón, 2003). Por ello puede resultar aconsejable la utilización de ACV simplificados para detectar los principales problemas ambientales que afectan al cultivo en invernadero.

Los datos utilizados en el estudio provienen de medidas directas realizadas en explotaciones dirigidas con los criterios técnicos actualmente considerados correctos. Por tanto, son una aproximación cuantitativa realista de la importancia de las diferentes alternativas y pueden hacerse extensivos a explotaciones hortícolas bajo invernadero de la cuenca mediterránea.

4.6.1 Recomendaciones

- El capítulo de gestión de residuos debe considerarse prioritario en la mejora ambiental del cultivo en invernadero. La separación de la fracción verde y su posterior compostaje significa una importante disminución de la carga ambiental para todas las categorías y

alcanza su máximo valor para la categoría de cambio climático con un valor cercano al 80% para el proceso global de producción de tomate bajo invernadero. Igualmente deberá reducirse la cantidad de residuo que se genera bien mediante su reciclado o reutilización.

- En general deberá buscarse una mejora en la reducción de los impactos causados por el equipamiento mediante la utilización de materiales reciclados o de mayor duración.
- Principalmente en cultivo en suelo, pero también en hidropónico, deberán establecerse criterios de gestión más racional en el suministro de nutrientes al cultivo con el propósito de reducir el impacto ambiental de los fertilizantes y de aumentar el aprovechamiento de un recurso que puede resultar escaso en el área Mediterránea, como es el agua.
- Cabe destacar la necesidad de la investigación en sustratos alternativos de origen local y preferiblemente procedentes de reutilización de algún material.
- La aproximación en la distancia entre fabricantes, agricultores y consumidores es una manera de reducir el impacto ambiental debido al transporte.