



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

***ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA
DE LA PRODUCCIÓN DE VID EN CASTILLA-LA-MANCHA***

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E INGENIERÍA
DE LOS ALIMENTOS

ALUMNO/A: Irene Sánchez Villena

TUTOR/A ACADÉMICO: Neus Sanjuan Pellicer

Curso Académico:2017/2018

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2018

TITULO: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA PRODUCCIÓN DE VID EN CASTILLA LA MANCHA.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WINE GRAPE PRODUCTION IN CASTILLA LA MANCHA

RESUMEN:

El objetivo del presente proyecto es realizar una evaluación ambiental de la producción de uva en Castilla-La Mancha mediante análisis del ciclo de vida. Para ello, se han tomado tres productores representativos de la zona evaluando la campaña 2016-2017., se han considerado dos unidades funcionales: 1 kg de uva y 1 hectárea de suelo. Se evalúan diversas categorías de impacto de carácter global y regional mediante la metodología Recipe 1.08. Las emisiones de campo son las etapas del ciclo de vida que más contribuyen al cambio climático como consecuencia de la aplicación de fertilizantes. El transporte de fertilizantes y fungicidas también juega un papel importante en las categorías de impacto.

PALABRAS CLAVE:

Análisis de ciclo de vida (ACV), uva, unidad funcional, emisiones, categorías de impacto, Castilla-La Mancha.

ABSTRACT

The goal of this project is to carry out an environmental assessment of grape production in Castilla-La Mancha through life cycle assessment. To this aim, three representative producers of the area have been considered, and the 2016-2017 campaign has been evaluated. In order to evaluate the intensification effect of agricultural plantations, two functional units have been considered: 1 kg of grapes and 1 hectare of soil. Several impact categories corresponding to global and regional impacts have been evaluated through the Recipe 1.08 methodology. It is observed that field emissions are the stages of the life cycle that contribute the most to climate change as a result of the application of fertilizers, fungicides and the use of water for its cultivation. Due to the use of fertilizers and fungicides the stages of transport and production of fertilizers and fungicides also play an important role in the impact categories

KEYWORDS:

life cycle assessment (LCA), grape, functional unit, emissions, impact categories, Castilla La Mancha.

RESUM

L'objectiu del present projecte és realitzar una avaluació ambiental de la producció de raïm a castella-la Manxa per mitjà d'anàlisi del cycle de vida. Per a això, s'han pres tres productors representatius de la zona avaluant la campanya 2016-2017. A fi d'avaluar l'efecte d'intensificació de les plantacions agrícoles, s'han considerat dos unitats funcionals: 1 kg de raïm i 1 hectàrea de sòl. S'avaluen diverses categories d'impacte de caràcter global i regional per mitjà de la metodologia Reesguitó 2016. S'observa que les emissions de camp són les etapes del cycle de vida que més contribuïxen al canvi climàtic com a conseqüència de l'aplicació de fertilitzants, fungicides i l'ús d'aigua per al seu cultiu. A causa de l'ús de fertilitzants i fungicides les etapes de transport i producció de fertilitzants i fungicides també juguen un paper important en les categories d'impacte

PALAURES CLAU:

Anàlisi de cicle de vida (ACV), raïm, unitat funcional, emissions, categories d'impacte, Castella la Manxs.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Producción de vino en Castilla-La Mancha.

La industria del vino es un sector importante en muchos países mediterráneos, siendo España el tercer productor de vino del mundo, después de Francia e Italia.

De los 33.5 millones de hectolitros de vino que se producen en España, 17 millones, es decir, más del 50% de su producción, se centra en la comunidad autónoma de Castilla-la Mancha (Fernández et al 2011). Dentro de esta, Albacete abarca 5 millones de hectolitros perteneciendo alrededor de un 4% a la variedad Garnacha tintorera, variedad de uva objeto de este estudio

Actualmente se detecta una creciente demanda por parte del consumidor de productos sostenibles. Este hecho se refleja en la viticultura ecológica, en la que España es pionera a nivel europeo, alrededor de un 2% del 9% total de superficie destinada a la viticultura es ecológica. (MAPAMA, 2017). No obstante, la agricultura sostenible no solo implica ser respetuoso con el medio ambiente, sino que también implica la capacidad de los agroecosistemas para seguir siendo productivos a largo plazo, es decir producir alimentos de alta calidad, económicamente competitivos y que abastezcan las demandas del consumidor. Por ello los agricultores necesitan conocer no solo los costes de producción, sino también las causas de los impactos ambientales con el fin de promover las medidas necesarias para conseguir una producción sostenible.

Con el fin de cuantificar el impacto sobre el medioambiente que causa la actividad agrícola surge el análisis de ciclo de vida (ACV). EL ACV, según las normas ISO 14040 y 14044, es una herramienta de contabilidad de impacto ambiental que ofrece un marco estandarizado y metodológico para identificar, cuantificar y evaluar los impactos ambientales de un producto o sistema de producción a lo largo de todo su ciclo de vida, es decir, desde la producción de las materias primas, pasando por la fabricación, distribución y uso, hasta a la disposición final del producto o sus desechos.

Los estudios de ACV han tenido una amplia cabida en la viticultura, observándose desarrollos tanto para los vinos del “Viejo Mundo” en España, Italia, Francia o Portugal como para los vinos del “Nuevo Mundo” como en Canadá, Australia y Chile. Según estos estudios (por ejemplo, Aranda et al., 2005, Pizzigallo et al., 2008 y Neto et al., 2013) las principales actividades que contribuyen al impacto medioambiental del vino son la etapa de viticultura entre un 30-50% del total de etapas incluidas en el ACV y, en segundo lugar, la fase de embotellado en bodega, como consecuencia de la producción de las botellas de vidrio. Otras etapas como el transporte también son reseñadas en otros estudios (Point, 2008) mostrando variabilidad en los resultados dependiendo de la distancia, del medio de transporte usado y la eficiencia en la gestión logística.

Por este motivo, el objetivo de este proyecto ha sido analizar los impactos medioambientales de la uva hasta la puerta de la explotación agrícola, es decir, se estudió la fase agrícola de la producción del vino, en concreto de un vino tinto, de una pequeña localidad de Castilla La Mancha, utilizando para ello la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis del ciclo de vida que se expone a continuación se ha realizado basándose en las indicaciones y estructuras propuestas por las normas ISO 14040 y 14044. (Figura1)

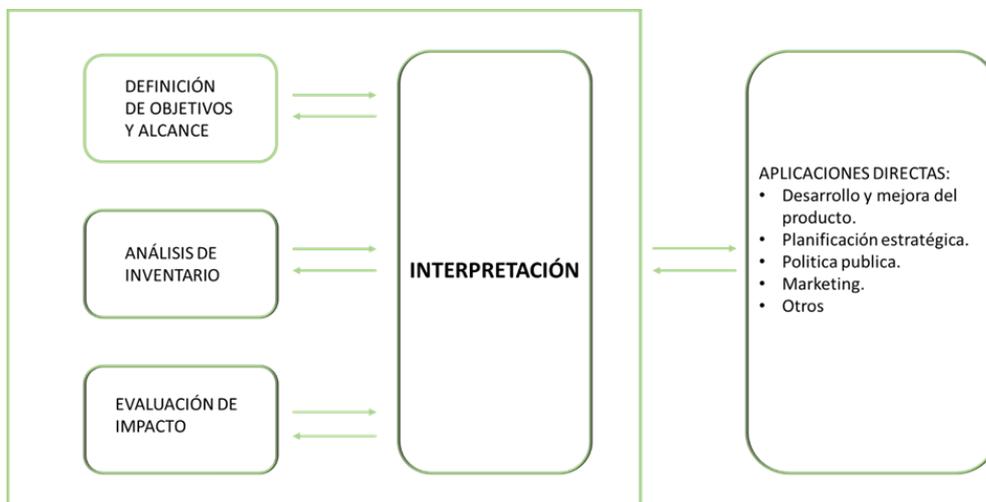


FIGURA 1. Fases del análisis del ciclo de vida y las interconexiones entre ellas.

2.1. Definición del objetivo del estudio.

Este estudio contempla el cultivo de 202 ha de uva, de un pequeño municipio al sureste de la comunidad autónoma de Castilla-la Mancha, Alpera, cuya principal actividad económica es el cultivo de uva para vinificación. Para ello, Alpera cuenta con la Cooperativa Santa Cruz de Alpera, que engloba todas las parcelas del municipio, con una superficie total de 3000 ha, en su mayoría cultivadas con la variedad garnacha tintorera.

El objeto de este proyecto es evaluar el perfil medioambiental de la producción ecológica de uva de la variedad garnacha tintorera. Para ello se han escogido las fincas de tres agricultores representativos. A partir de los resultados obtenidos en la evaluación, se pretende identificar los puntos críticos para así poder realizar una propuesta de mejora del cultivo desde el punto de vista ambiental.

2.2. Definición del alcance del estudio.

2.2.1. Unidad funcional.

La unidad funcional (UF) es la unidad de referencia del estudio en base a la cual se refleja el objetivo buscado y a través de la cual se expresarán los resultados de los impactos ambientales. Los sistemas agrícolas son multifuncionales, su función principal es la producción de alimentos, por lo que se seleccionó una unidad funcional basada en la masa de producto, 1 kg de uva. Conjuntamente la agricultura también contribuye a la preservación del paisaje, y el mantenimiento de los agroecosistemas forestales y acuáticos, por este motivo se ha escogido una segunda UF basada en área, 1 hectárea de cultivo.

2.2.2. Descripción del sistema a estudiar.

La muestra del estudio corresponde a tres agricultores que abarcan una superficie total de 202 ha a los cuales se les va a denominar Agricultor A, Agricultor B y Agricultor C. Se

decidió escoger dicha muestra pues tras recabar datos con el técnico de campo responsable de la dirección de todas las explotaciones que abastecen a la Cooperativa Santa Cruz, se llegó a la conclusión de que los cultivos ecológicos presentan poca variabilidad en las prácticas agrícolas y, por lo tanto, con tres agricultores y un conjunto de 202 ha se puede estimar que la muestra es representativa. Las características de los tres agricultores se muestran en la tabla 1.

TABLA 1 Descripción de los principales rasgos de las explotaciones de los agricultores seleccionados

AGRICULTORES	A	B	C
VARIEDAD DE UVA	Garnacha tintorera		
SUPERFICIE TOTAL EN PRODUCCIÓN (ha)			
TOTAL	120	40	42
Vaso	98	18	22
Espaldera	22	22	20
TIPO DE RIEGO			
Secano (ha)	120	30	27
Riego a goteo (ha)	0	10	15
Consumo de agua (m ³ /ha-año)	0	450	300
FERTILIZACIÓN Y FUNGICIDAS			
Dosis total de estiércol de oveja (kg/ha)	12000	7000	19047
Dosis total abono orgánico comercial (kg/ha)	2000	-	-
Aplicación estiércol oveja	Cada 3 o 4 años	Cada 3 años	Cada 3 años
Aplicación abono orgánico comercial	Anual	-	-
Fungicida	Azufre	Azufre	-
Fertirrigación	NO	NO	Estiércol de oveja
RECOLECCIÓN			
Época	01/09/17-15/09/17	10/09/17-10/10/17	15/09/17-30/09/17
Rendimiento vaso (kg uva/ha)	5000	5000	6000
Rendimiento espaldera (kg uva/ha)	6000	5000	10000

La temporada se inicia tras la vendimia, concretamente a principios de octubre se realiza el laboreo mediante el uso de cultivadores. Con el laboreo se pretende para facilitar la incorporación del estiércol que se aplicará posteriormente, al mismo tiempo que se aumenta la aireación y la capacidad de retención de agua, ayudando a la formación de reservas hídricas permitiendo que el agua se infiltre (Quinta de Couselo, 2012).

Los tres agricultores realizan una poda entre diciembre y enero (coincidiendo con las primeras heladas). La poda tiene por objeto la supresión de órganos de la vid (sarmientos,

pámpanos, hojas) para limitar el crecimiento incontrolado de la cepa y hacerlo compatible con las prácticas de cultivo, consiguiéndose así una producción regular y de calidad (Quinta de Couselo, 2012). Entre abril y mayo, tras la brotación de la vid, se realiza otra poda que se denomina poda en verde, con el mismo objetivo que la poda anterior. A continuación, se realiza el atado de la cepa. Se trata de la conducción de las parras, a través del alambre que la sostiene, para evitar un crecimiento irregular e impedir el despliegue por las calles impidiendo el paso del tractor.

En cuanto al abonado, en seco se realiza un único abonado anual tras la poda, en los meses de febrero y marzo, en el año que se abone. Si la producción es en regadío se puede realizar un abonado en febrero tras la poda y otro en junio tras la poda en verde. La dosis de fertilizante y la frecuencia de aplicación se observa en la tabla 1.

Entre mayo y junio el enólogo y el técnico de campo prestan especial atención al clima, pues las condiciones de humedad, temperatura, y precipitaciones son determinativas, ya que pueden propiciar la aparición de enfermedades criptogámicas, por ello, en esta época de la campaña se recurre al uso de fungicidas. Los agricultores A y B aplican azufre en polvo 2 veces al año, repitiendo la aplicación a los 15 días, mientras que el agricultor C no realiza tratamiento fungicida.

La vid se considera un cultivo poco exigente en riego, sin embargo, es una de las etapas imprescindibles en la viticultura, dependiendo de la zona de cultivo. Según algunos autores (Álvarez, F, 2005) con una dotación de 300 a 800 l por planta es suficiente para que ésta pueda completar su ciclo y producir una cosecha en buenas condiciones. El riego no tiene un reparto equitativo durante todas las etapas precosecha siendo los periodos invernales, la brotación y el cuajado en los que menos regadío se utiliza (15%), versus las etapas de envero y post-vendimia que se abastecen con más 85% de agua de toda la campaña (Álvarez et al 2005). El técnico de campo en consideración con las condiciones climatológicas estimó la frecuencia de riego para la campaña 2016/2017 según la explotación, tal y como se expone en la tabla 1.

La fecha de la vendimia es una de las decisiones más importantes que se toma en la bodega y viene determinada por factores climáticos, así como por los resultados del análisis de la uva (grados Baumé, contenido en taninos, pH, acidez total). En la Cooperativa Santa Cruz los socios tienen acuerdos de suministro a largo plazo lo que permite un control de los viñedos durante todo el año. De esta manera se controla individualmente los viñedos, decidiendo la vendimia una vez las uvas alcanzan el punto óptimo de maduración. Como se observa en la Tabla 1, los tres agricultores recolectaron en fechas cercanas, desde principios de septiembre hasta principios de octubre. En las parcelas en vaso la vendimia se realiza de forma manual, mientras que en las parcelas en espaldera de forma mecánica. En ambos casos la uva se transporta a la bodega en remolques de 10.000 kg de capacidad.

2.2.3. Límites del sistema.

Los límites del sistema son un conjunto de criterios que especifican qué procesos unitarios son parte del sistema de producto del análisis del ciclo de vida y cuales se quedan fuera (ISO14040).

Dentro de los límites del sistema se han incluido los siguientes subsistemas: la producción del fungicida (azufre), el transporte de insumos agrarios (tanto los fertilizantes como fungicidas), la aplicación de dichos insumos agrarios, el riego y el uso de maquinaria (en las labores de recolección, abonado, laboreo) (Figura 2).

Algunas etapas del proceso de producción agrícola no fueron consideradas, como la cantidad de vides reemplazadas anualmente, debido a que su número es muy bajo. Además, la producción de maquinaria agrícola no se ha tenido en cuenta dentro de los límites del sistema porque, según Frischknecht et al. (2007) la producción de maquinaria no presenta una contribución significativa a las categorías de impacto estudiadas, excepto

al consumo de recursos. Tampoco se ha tenido en cuenta la producción y maduración del estiércol de oveja, ya que al tratarse de un residuo de la ganadería las cargas derivadas se le atribuyen al ganadero. Lo mismo respecto al abono ecológico, ya que está elaborado a partir de residuos de la ganadería y agricultura.

El límite temporal del estudio corresponde a la campaña 2016/2017.

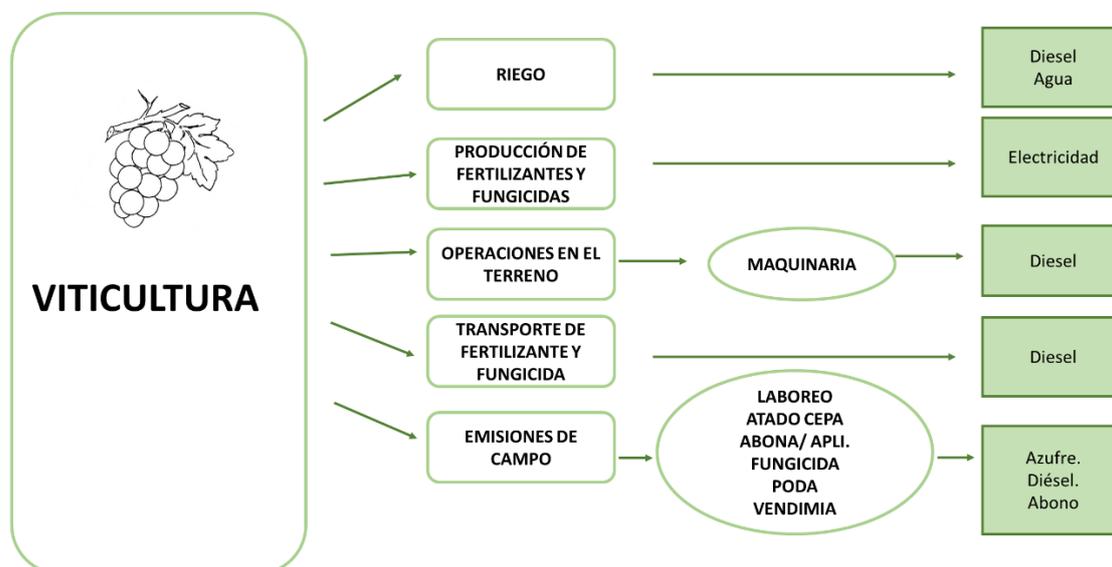


FIGURA 2. Límites del sistema de estudio de los viñedos

2.3. Análisis de inventario.

Con el análisis de inventario se pretende recabar todos los datos relevantes a las etapas incluidas en los límites del sistema, tanto entradas (materia prima y energía), como salidas (emisiones al aire o agua) asociadas al proceso productivo. El análisis de inventario se expresa en base a dos unidades funcionales (1 kg de uva y 1 ha). Todos los datos sobre las prácticas agrícolas, características de maquinaria, particularidades de los fertilizantes y abonos, se han obtenido mediante entrevistas cerradas a los tres agricultores nominados en el proyecto como Agricultor A, Agricultor B y Agricultor C.

2.3.1. Operaciones sobre el terreno.

Las operaciones de campo incluyen el laboreo, la poda y la poda en verde, el atado de la cepa, la fertilización, vendimia, riego y fertirrigación. De todas estas operaciones, las que requieren el uso de maquinaria son el laboreo, el abonado y la recolección. Todas ellas se llevan a cabo con el uso de tractores, sin embargo, dependiendo de la etapa, se hace uso de diferentes aperos. En la tabla 2, se muestran los tractores que se usan en cada explotación. Asimismo, en la tabla 3, se muestran los accesorios que se utilizan en cada práctica agrícola además del consumo de combustible y el número de pases que se realiza en cada campaña.

TABLA 2. Características de los tractores

EXPLOTACION	MODELO (Nº asignado a los tractores)	POTENCIA (CV)	PROPIO
A	Ebro 6100 (1)	120	Si
	Ebro 6100 (2)	120	
	Gregoire (3)	100	
B	Deutz fahr (4)	80	Si
	John Deere 3340 (5)	105	
C	Ford (6)	85	Si
	John Deere (7)	105	
	New Holland (8)	97	

TABLA 3. Accesorios empleados en cada etapa agrícola. AO: estiércol de oveja, AE: abono orgánico comercial, V: cepas en vaso, E: cepas en espaldera.

PRÁCTICA AGRÍCOLA		TRACTOR	ACCESORIO	Repeticiones (pases/campaña)	Tiempo (h/ha)	Diesel (l/ha)
LABOREO	A	(1)	Cultivador hidráulico intercepas	4	1	7
	B	(5)		5	0.75	6
	C	(6)		5	1	8
ABONADO	A	(2)	Abonadora con subsolador y un topo suspendido	0.3(AO)*	2	16
				0.3(AE)*		
	B	(5)		0.3 (AO)		
RECOLECCIÓN	A	(1)(3)	Remolque (1500 kg)	1	16 V*	7 V*
		X	Cosechadora (Gregoire)		1 E*	12E*
	B	(7)	Remolque (1500 kg)		24.5 V*	7 V*
		X	Cosechadora (New Holland)		1 E	10 E
	C	(8)	Remolque (1500 kg)		10.9 V	4 V
		X	Cosechadora (Pellenc)		1 E	3 E

2.3.2. Riego

El riego de las parcelas se realiza mediante un sistema de bombeo. El agricultor A no aplica riego. El productor B tiene pozo propio, sin embargo, en algunas de sus parcelas consume agua de la comunidad de regantes, que usa una bomba activada con diésel. En el caso de la parcela C solo abastece sus viñas con agua de la comunidad de regantes. Para el cálculo de energía necesaria para el riego se ha tenido en cuenta el tipo de riego, el volumen de agua consumida, las horas de riego y las características de la bomba. Las emisiones de la combustión del diésel por la bomba se obtuvieron de la base de datos GaBi 6.1.

2.3.3. Producción y transporte de fertilizantes y herbicidas

En este estudio los tres agricultores aplicaron como fertilizante estiércol de oveja. Solo el agricultor A, aplicó además del estiércol de oveja, abono orgánico comercial (compuesto en su mayoría de deyecciones de animales, estiércoles y efluentes tratados previamente y presentado en forma de pelets). Durante el proceso de fabricación del azufre se consume recursos y se producen emisiones, estos datos se tomaron de la base de datos de Ecoinvent v.3 (Wernet et al., 2016)

Se ha supuesto que el estiércol de oveja viene de granjas cercanas, a 80 km, y que el abono orgánico comercial se transporta 200 km el consumo de recursos y la producción de emisiones se tomaron de nuevo de la base de datos de Ecoinvent v3 (Wernet et al., 2016).

2.3.4. Emisiones de campo

En las emisiones de campo se incluyen las emisiones producidas por la aplicación de fertilizantes y fungicida.

2.3.4.1. Emisiones causadas por la aplicación de fertilizantes

Como consecuencia de la aplicación de fertilizantes se liberan emisiones de amoníaco (NH_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxido nitroso (N_2O), nitratos (NO_3) y fosfatos. La metodología empleada para el cálculo de estas emisiones, así como el origen y destino de las mismas se muestran en la tabla 4. En la tabla 5 se presentan el resultado del cálculo de dichas emisiones por hectárea para los tres agricultores (A, B y C).

TABLA 4 Metodología empleada para el cálculo de las emisiones emitidas tras la aplicación de fertilizantes

TIPO DE FERTILIZANTE	EMISIONES	DESTINO	METODOLOGÍA
Abono orgánico comercial/ Estiércol de oveja	N_2O	Aire	IPCC (2006)
	NH_3		Nemecek et al (2014)
	NO_x	Aire	EMEP/EEA (2013)
	NO_3	Agua	Balance de Nitrógeno de la agricultura Española.(2007)
	PO_4^{-3}		Nemecek et al (2014)

TABLA 5. Emisiones causadas por la aplicación de fertilizantes.

	AGRICULTOR A	AGRICULTOR B	AGRICULTOR C
	kg/ha	kg/ha	kg/ha
N₂O	11,46	11,3194	2,89
NH₃	0,97	2,2914	1,26
NO_x	0,86	2,3984	6,69
NO₃	50,99	50,9861	50,99
Fosfatos	3,4842	2,06995	3,7909

2.3.4.2. Emisiones causadas por la aplicación del fungicida.

Cuando se aplica un fungicida se debe conocer la porción de fitosanitario que va a parar a los diferentes compartimentos del medio (agua, aire y suelo). Esta fracción depende de las propiedades fisicoquímicas (presión de vapor y riqueza) de la materia activa (EMEP/EEA et al., 2009). Concretamente, el azufre cristalizado utilizado cuenta con una presión de vapor de 0.098 mPa (PPDB, 2009). El destino de los fitosanitarios se estimó siguiendo las recomendaciones de Berthoud et al (2011). Los resultados se observan en las Tabla 6.

TABLA 6. Destino de las emisiones de los fitosanitarios

	Materia activa	AIRE		SUELO		AGUA	
	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha
AZUFRE	39,204	5	1,96	94,5	37,05	0,5	0,20

2.4.EVALUACIÓN DE IMPACTOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

La evaluación de impacto del ciclo de vida consiste en el uso de los resultados del análisis de inventario, para evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema de producto. Por otro lado, la interpretación de resultados es una fase del análisis del ciclo de vida en la que los resultados del análisis del inventario y de la evaluación de impacto se evalúan conjuntamente en relación con el objetivo y el alcance definidos, para llegar a conclusiones y recomendaciones (ISO 14040:2006). El método utilizado para la evaluación del impacto ambiental es el Recipiente 6.1 (Goedkoop et al; 2013) Las categorías de impacto consideradas en este estudio se describen a continuación en la tabla 7.

TABLA 7. Definición de las categorías de impacto

CATEGORÍA DE IMPACTO		DESCRIPCIÓN	UNIDAD
EFECTOS GLOBALES	Cambio climático	Cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo debido a causas de origen antropogénico	kg de CO ₂ equivalentes
	Agotamiento de la capa de ozono	Representa el agotamiento de la capa de ozono estratosférico por las emisiones antropogénicas de sustancias que agotan la capa de ozono, como son los químicos recalcitrantes que contienen átomos de cloro y bromo	kg de CFC-11 equivalentes
	Agotamiento de combustibles fósiles	Consumo de combustibles extraídos de la naturaleza a mayor velocidad que su producción.	kg de petróleo equivalentes
EFECTOS REGIONALES	Acidificación	Deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmosfera, en el suelo y en el agua,.	kg de SO ₂ equivalentes
	Eutrofización	Impacto debido a un alto nivel de macronutrientes, nitrógeno y fósforo. Su incremento puede presentar un aumento de la producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos produciendo una disminución de oxígeno, pudiendo alcanzar unas condiciones anaerobias	kg de P equivalentes
EFECTOS LOCALES	Formación de oxidantes fotoquímicos	Formación de ozono troposférico por la reacción fotoquímica de los óxidos de nitrógeno con hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles (VOC)	Kg (C ₂ H ₄)-equivalentes
	Ecotoxicidad	Categoría de impacto ambiental relativa a los impactos tóxicos que afectan a un ecosistema	CTUe
	Toxicidad humana	Efectos nocivos sobre la salud humana debidos a la absorción de sustancias tóxicas mediante la inhalación de aire, la ingesta de alimentos o agua, o la penetración a través de la piel,	CTUh

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El sistema de estudio se ha dividido en cuatro etapas de acuerdo con los límites descritos en la sección 2.2.3: producción de fungicida; transporte de los fertilizantes y fungicida; emisiones de campo producidas por la fertilización y tratamientos fúngicos; operaciones sobre el terreno (incluye la combustión del diésel por la maquinaria); y, por último, el riego.

A su vez, se han considerado nueve escenarios diferentes (tabla 8) que tienen en cuenta si el cultivo es en vaso o en espaldera y si las parcelas son de secano o regadío.

TABLA 8. Descripción de los escenarios

Explotación A	
Parcela A vaso secano (Avs)	Parcela A espaldera secano (Aes)
Explotación B	
Parcela B vaso secano (Bvs)	Parcela B espaldera secano (Bes)
Parcela B vaso regadío (Bvr)	Parcela B espaldera regadío (Ber)
Explotación C	
	Parcela C espaldera secano (Ces)
Parcela C vaso regadío (Cvr)	Parcela C espaldera regadío (Cer)

3.1 Resultados de la evaluación de impacto. Análisis de contribución.

En la tabla 9 se muestran los valores obtenidos en la evaluación de impactos para cada una de las categorías de impacto consideradas y para cada escenario estudiado, así como la media de dichos escenarios y la desviación estándar, para la unidad funcional 1 kg de uva.

Las explotaciones de los tres agricultores son viñedos ecológicos en los que prácticas agrícolas son muy similares por lo que las diferencias entre los resultados de las categorías de impacto entre los escenarios son, en general, pequeñas. Para evaluar la variabilidad de los impactos se ha calculado el coeficiente de variación (cv). La mayor variabilidad en los resultados de los impactos se observa para las categorías cambio climático (cv = 22,6%) y agotamiento de recursos fósiles (cv = 10%), le siguen la formación fotoquímica de ozono (cv = 4,2%) y toxicidad humana (3,5%). El resto de las categorías de impacto presenta coeficientes inferiores al 1%. Dichas variaciones en los impactos son provocadas por variaciones en las prácticas agrícolas realizadas, como la dosis de fertilizantes y fungicidas aplicada, el uso recursos hídricos o la maquinaria utilizada para las labores del campo.

A partir de los valores medios de las categorías de impacto de los nueve escenarios y con el fin de conocer la contribución relativa de las diferentes etapas o subsistemas en las que se divide el estudio a cada una de las categorías de impacto estudiadas se ha elaborado la figura 3. Se observa como las emisiones de campo es la etapa que más contribuye a las categorías de eutrofización de agua dulce (97,99% del impacto total) debido a la lixiviación de nitratos, acidificación terrestre (49,77%) por las emisiones de NH₃, agotamiento de ozono (50,49%) y de forma más minoritaria a las categorías de cambio climático (16,58%) a causa del N₂O, toxicidad humana (13,95%) y ecotoxicidad (4,40%) por la toxicidad que genera el S usado como fungicida. La etapa de operaciones en el terreno no contribuye de forma significativa a ninguna de las categorías de impacto estudiadas, solo destaca en la categoría de impacto cambio climático (11,4% del impacto total) y en la formación fotoquímica de ozono con 1,88% del impacto total. La producción de fungicidas contribuye casi en su totalidad a la formación fotoquímica de ozono con un 93,29%, la segunda categoría a la que más contribuye es la ecotoxicidad (61,6%) y, de

forma menos notoria, al agotamiento de combustibles fósiles con un 2,98%. El transporte de los insumos afecta en mayor grado a la toxicidad humana (71,96%), al agotamiento de los combustibles fósiles (45,32) y, en menor grado, afecta a la ecotoxicidad (29,7%) y al cambio climático (20,92%). Finalmente, el riego contribuye de forma similar a las categorías de cambio climático, acidificación terrestre, agotamiento de combustibles fósiles y agotamiento de la capa de ozono, superando en todas ellas el 48% del impacto total. Siendo menor su influencia en etapas como la toxicidad con un 14% del impacto total, en el resto de las categorías de impacto no supera el 1% del impacto total. Hay que destacar la baja toxicidad del S usado como fungicida, pues su contribución a las categorías de toxicidad es más baja que la de las emisiones del transporte.

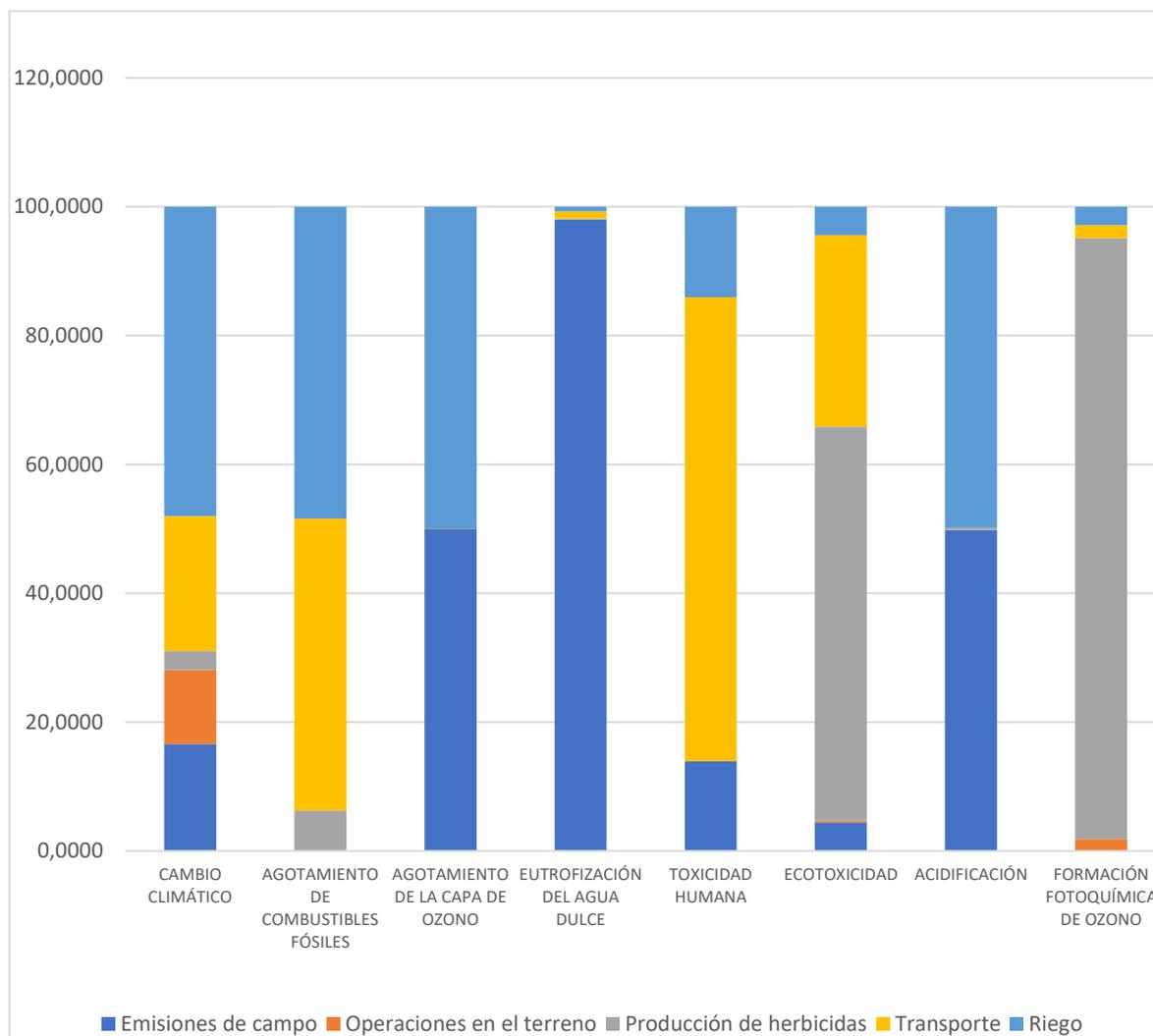


FIGURA 3. Contribución relativa de los subsistemas a cada categoría de impacto.

3.2. Comparación entre escenarios.

Con el fin de comparar mejor los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios analizados, en la Figura 4 se muestra la contribución de cada subsistema de los escenarios estudiados a las categorías de impacto que muestran una mayor variabilidad (cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles, agotamiento de la capa de ozono y toxicidad humana). Debido a la similitud en las prácticas agrícolas de los sujetos, la contribución a cada una de las categorías de impacto restantes ha sido homogénea, por lo tanto, dichas categorías no han sido definitorias en la comparación de los escenarios.

En referencia al cambio climático, las principales causas de las diferencias encontradas entre los distintos escenarios estudiados dependen del uso de recursos hídricos y de las emisiones de campo. En referencia al riego se observa una elevada contribución al cambio climático por el agricultor Cer, esto es debido a que este escenario se usa una bomba de 80CV, siendo la que mayor potencia tiene en comparación con las bombas de los restantes agricultores. Esto conlleva un mayor consumo de diésel y por lo tanto un mayor agotamiento de los combustibles fósiles. En cuanto a las emisiones de campo, dicho impacto se produce por el uso de fertilizantes, las diferencias se justifican por la dosis de estiércol aplicado. Todos los agricultores aplican el estiércol de oveja de forma trienal, excepto las explotaciones que pertenecen al agricultor A, que además aplica anualmente 2000 kg de abono orgánico comercial. La parcela Cer es el escenario que más impacto produce en esta categoría puesto que aplica una mayor cantidad de fertilizante en sus tierras y así mismo usa la técnica de fertirrigación (aplica estiércol de oveja en sus riegos). Esta contribución al incremento del cambio climático se debe a las emisiones de N_2O causadas por la aplicación de fertilizantes, que tienen un alto poder de absorción de la radiación solar.

La principal causa de variabilidad en la categoría de agotamiento de combustibles fósiles entre los escenarios es el uso de recursos hídricos. Por el mismo motivo que se ha explicado en esta misma sección, el escenario Cer es el agricultor que usa una bomba de mayor potencia lo que abala un mayor uso de diésel. Por la misma causa el transporte es la segunda etapa que más contribuye a dicha categoría de impacto

El impacto a la categoría formación fotoquímica de ozono se produce por la emisión de compuestos fluorcarbonados. Estos compuestos se generan principalmente en la producción de electricidad utilizada para la fabricación del fungicida.

La toxicidad humana solo presenta un 3.5% de coeficiente de variación, la etapa que más contribuye a esta categoría de impacto es el transporte de fertilizantes y fungicidas. Como se muestra en la Figura 4, en la categoría de impacto toxicidad humana los escenarios A y C tienen un mayor impacto respecto al B por la elevada cantidad de fertilizante que usan, lo que implica mayor cantidad de fertilizante a transportar, y por consiguiente, más emisiones.



Figura 4. Contribución de cada uno de los escenarios a las categorías de impacto de mayor variabilidad.

3.3. Resultados para UF = 1 hectárea

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos para la otra UF utilizada en este estudio, 1 ha. En este caso, la mayor variabilidad en los resultados se observa para las categorías: agotamiento de recursos fósiles ($cv = 161,76\%$), agotamiento de la capa de ozono ($cv = 127\%$) y cambio climático ($cv = 91\%$) El resto de las categorías de impacto presenta coeficientes de variación en torno al 70%. Se observa una variabilidad mucho mayor en los resultados en las categorías de impacto para la UF de 1 ha respecto a la UF 1 kg de uva, esto es consecuencia de los rendimientos de las parcelas lo que provoca una amplia heterogeneidad de los valores, que elevan de esta manera los coeficientes de variación.

Si analizamos los resultados de las categorías de impacto que muestran una mayor variabilidad se ve que el escenario que más contribuye al agotamiento de combustibles fósiles es el agricultor C, que tiene los viñedos cultivados en espaldera y en regadío, al

igual que ocurre al expresar los resultados respecto a 1 kg uva. No obstante, pese a que este agricultor transporta más fertilizantes que el resto (el transporte es la principal causa de esta categoría de impacto) al expresar los resultados por kg, el impacto de este se divide por el rendimiento, que también es mucho mayor para el cultivo en espaldera (10000 kg/ha vs. 6000 y 5000 kg/ha para los agricultores A y B, respectivamente).

A diferencia de la unidad funcional, un kg de uva, se ha observado una mayor variabilidad en los resultados en la categoría de agotamiento de la capa de ozono sobre todo en los escenarios A y B en los cultivos en vaso y en seco por la producción de fungicidas, esto es debido a que en su producción emiten más compuestos fluorocarbonados que en la producción de fertilizantes, cuya contribución de categoría de impacto es menor, por ello el escenario C no es relevante en esta categoría, porque no aplica azufre en sus terrenos. Pese a que por un kg de uva los escenarios A y B son más relevantes por lo explicado en este anexo, todos los escenarios atienden a una similitud en los valores, este rango se distorsiona por el rendimiento de las extensiones A y B respecto al agricultor C que es mayor.

Los resultados obtenidos demuestran que, si bien unas prácticas más intensivas producen más impacto por ha, estas se compensan al expresar los resultados por cantidad de producto si los rendimientos obtenidos son mayores.

TABLA 9 Resultados de la evaluación de impacto ambiental, del cultivo de uva de la campaña 2016/2017 para los nueve escenarios estudiados. UF:1 kg de uva

	UD	MEDIA	D. ESTÁNDAR	SECANO						REGADÍO		
				VASO			ESPALDERA			VASO	ESPALDERA	
				A	B	C	A	B	C	B	B	C
CC	kg CO2 eq	5,44.10 ⁻²	1,23.10 ⁻²	1,10.10 ⁻¹	9,20.10 ⁻²	3,11.10 ⁻²	3,92.10 ⁻²	3,11.10 ⁻²	3,92.10 ⁻²	2,13.10 ⁻²	1,28.10 ⁻²	1,13.10 ⁻¹
CF	kg oil eq	8,86.10 ⁻³	8,87.10 ⁻⁴	9,54.10 ⁻³	7,95.10 ⁻³	3,11.10 ⁻³	5,77.10 ⁻³	3,11.10 ⁻³	5,77.10 ⁻³	5,10.10 ⁻³	3,06.10 ⁻³	3,63.10 ⁻²
EC	kg 1,4 DB eq	1,62.10 ⁻⁴	6,62.10 ⁻⁸	3,05.10 ⁻⁴	2,54.10 ⁻⁴	8,04.10 ⁻⁵	9,33.10 ⁻⁵	8,04.10 ⁻⁵	9,33.10 ⁻⁵	1,78.10 ⁻⁴	1,07.10 ⁻⁴	2,68.10 ⁻⁴
EU	kg P eq	7,25.10 ⁻⁵	2,93.10 ⁻⁸	1,93.10 ⁻⁴	1,61.10 ⁻⁴	5,02.10 ⁻⁵	5,05.10 ⁻⁵	5,02.10 ⁻⁵	5,05.10 ⁻⁵	4,23.10 ⁻⁵	2,54.10 ⁻⁵	2,94.10 ⁻⁵
TH	kg 1,4 DB eq	1,33.10 ⁻²	4,69.10 ⁻⁴	2,40.10 ⁻²	2,00.10 ⁻²	6,54.10 ⁻³	7,86.10 ⁻³	6,54.10 ⁻³	7,86.10 ⁻³	1,39.10 ⁻²	8,32.10 ⁻³	2,48.10 ⁻²
OF	kg NOX eq	1,13.10 ⁻²	4,82.10 ⁻⁴	1,67.10 ⁻²	1,39.10 ⁻²	1,6.10 ⁻²	1,70.10 ⁻²	1,68.10 ⁻²	1,70.10 ⁻²	2,86.10 ⁻⁴	1,72.10 ⁻⁴	2,68.10 ⁻³
AO	kg CFC-11 eq	8,33.10 ⁻⁷	1,04.10 ⁻¹¹	3,08.10 ⁻⁶	2,57.10 ⁻⁶	3,04.10 ⁻⁷	3,08.10 ⁻⁷	3,04.10 ⁻⁷	3,08.10 ⁻⁷	2,56.10 ⁻⁷	1,53.10 ⁻⁷	2,11.10 ⁻⁷
AC	kg SO2 eq	3,31.10 ⁻⁴	2,53.10 ⁻⁷	4,11.10 ⁻⁴	3,42.10 ⁻⁴	3,61.10 ⁻⁴	4,06.10 ⁻⁴	3,61.10 ⁻⁴	4,06.10 ⁻⁴	5,71.10 ⁻⁵	3,43.10 ⁻⁵	5,97.10 ⁻⁴

Tabla 11: Resultados de la evaluación de impacto ambiental, del cultivo de uva, de la campaña 2016/2017 de los escenarios estudiados. UF:1 hectárea

	UD	MEDIA	D. ESTÁNDAR	VASO			ESPALDERA			VASO	ESPALDERA	
				A	B	C	A	B	C	B	B	C
CC	kg CO2 eq	3,62.10 ²	3,33.10 ²	5,50.10 ²	1,56.10 ²	1,28.10 ²	5,52.10 ²	1,87.10 ²	1,28.10 ²	1,96.10 ²	2,35.10 ²	1,13.10 ³
CF	kg oil eq	6,86.10 ¹	1,11.10 ²	4,77.10 ¹	1,56.10 ¹	3,06.10 ¹	4,77.10 ¹	1,87.10 ¹	3,06.10 ¹	2,89.10 ¹	3,46.10 ¹	3,63.10 ²
EC	kg 1,4 DB eq	1,09	7,43.10 ⁻¹	1,53	4,02.10 ⁻¹	1,07	1,52	4,82.10 ⁻¹	1,07	4,67.10 ⁻¹	5,60.10 ⁻¹	2,68E
EU	kg P eq	4,27.10 ⁻¹	3,06.10 ⁻¹	9,65.10 ⁻¹	2,51.10 ⁻¹	2,54.10 ⁻¹	9,66.10 ⁻¹	3,01.10 ⁻¹	2,54.10 ⁻¹	2,53.10 ⁻¹	3,03.10 ⁻¹	2,94.10 ¹
TH	kg 1,4 DB eq	9,04.10 ¹	6,82.10 ¹	1,20.10 ²	3,27.10 ¹	8,34.10 ¹	1,20.10 ²	3,93.10 ¹	8,32.10 ¹	3,93.10 ¹	4,72.10 ⁻¹	2,48.10 ²
OF	kg NOX eq	6,33.10 ¹	4,12.10 ¹	8,37.10 ¹	8,41.10 ¹	1,72	8,36.10 ¹	1,01.10 ²	1,72	8,51.10 ¹	1,02.10 ²	2,68.10 ¹
AO	kg CFC-11 eq	4,75*10 ³	6,05.10 ⁻³	1,54.10 ⁻²	1,52.10 ⁻³	1,54.10 ⁻³	1,54.10 ⁻²	1,82.10 ⁻³	1,53.10 ⁻³	1,54.10 ⁻³	1,85.10 ⁻³	2,11.10 ⁻³
AC	kg SO2 eq	2,13	1,63	2,06	1,81	3,43.10 ⁻¹	2,05	2,17	3,43.10 ⁻¹	2,03	2,44	5,97

4. PROPUESTAS DE MEJORA.

A la vista los objetivos propuestos al inicio del estudio y los resultados obtenidos, se plantean a continuación una serie de propuestas para disminuir los impactos producidos por la etapa de viticultura en uva para la vinificación.

Los tres agricultores objeto de estudio llevan a cabo una agricultura ecológica en cada una de sus parcelas. Sin embargo, para conseguir una agricultura ecológica más sostenible cabría concienciar a los agricultores en ajustar el número de aplicaciones de los fertilizantes puesto que su aplicación y transporte contribuyen en gran medida a la mayoría de los impactos analizados.

En referencia al tema del riego, muchas de las parcelas necesitarían una adecuación en viñedos para un mejor aprovechamiento del agua proveniente de la lluvia, incorporando zonas de hundimiento en las hileras de la planta en vez de montículos que permiten la escorrentía en épocas de lluvia. Asimismo, se podrían instaurar sistemas sencillos de capacitación de agua evitando así recurrir a las comunidades de regantes y al uso de pozos.

Respecto al uso de combustibles, las principales medidas están en función del uso de gasolina por parte de vehículos y equipos una opción sería sustituir dichos vehículos por otros con menos impacto, por ejemplo, sustituyendo en la medida de lo posible los vehículos actuales por vehículos híbridos o que consuman biocombustibles. Del mismo modo en referencia al riego muchas de las parcelas usan bombas para poder distribuir el agua en sus viñedos, todas ellas activadas con el uso de diésel, se podrían sustituir por bombas que se activen mediante placas solares

5. CONCLUSIONES.

Como conclusión, de las cinco etapas que han sido objeto de este estudio: emisiones de campo, operaciones sobre el terreno, producción de fungicidas, transporte de fertilizantes y fungicidas y riego cabe destacar que las emisiones de campo, el transporte de fertilizantes y fungicida y el riego son las que más influencia tienen en la mayoría de las categorías impacto. Con todo ello las propuestas de mejora están encaminadas a subsanar dichos impactos, sin embargo, debemos tener en cuenta que estas parcelas se guían bajo unos principios ecológicos por lo que la mayoría de sus etapas ya están optimizadas.

Tres de los nueve escenarios estudiados destacan respecto los demás, siendo el escenario del agricultor C cultivado en espaldera y en regadío el que contribuye a un mayor impacto en el cambio climático debido a una mayor aplicación de fertilizante ya no solo de forma tradicional sino a través de fertirrigación, lo que provoca una mayor emisión de N_2O . También destaca en el impacto que contribuye al agotamiento de combustibles fósiles tras el uso de una bomba de elevada potencia que provoca una mayor combustión de diésel.

De manera menos significativa los escenarios correspondientes al agricultor A (Avs y Aes) y al agricultor B (Bvs, Bes, Bvr, Ber) presentan mayor impacto en la categoría formación fotoquímica de ozono. A diferencia del agricultor C, A y B aplican azufre como fungicida, por lo que la electricidad utilizada para la producción contribuye significativamente a esta categoría.

Por último, en destacar que los rendimientos altos mejoran el resultado ambiental de los productos agrícolas, uva en el caso que nos ocupa. Sin embargo, las prácticas agrícolas que aumentan la productividad también aumentan las emisiones al ambiente, por ejemplo, al aumentar las dosis de fertilizante. Por tanto, como señalan Escobar et al. (2017), una

evaluación detallada de estos factores, así como sus interacciones, es necesaria para mejorar las prácticas agrícolas de manera que al mismo tiempo que se aumenta el rendimiento se mitiguen los impactos del cultivo de la viña.

BIBLIOGRAFIA

Álvarez, F. Reyes, L. Gómez, A. (2005) Manual básico de viticultura Tacaronte-Acentejo, TACORONTE-ACENTEJO. Dirección URL: <http://www.tacovin.com/dota/Active/pdf/viti.pdf>

Antón Vallejo, M. A. (2004). Capítulo 3, Metodología del análisis del ciclo de vida. *Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Universitat Politècnica de Catalunya

Arzoumanidis, I., Raggi, A., & Petti, L. (2014). Considerations when applying simplified LCA approaches in the wine sector. *Sustainability*, 6(8), 5018-5028.

Bosco, S., Di Bene, C., Galli, M., Remorini, D., Massai, R., & Bonari, E. (2011). Greenhouse gas emissions in the agricultural phase of wine production in the Maremma rural district in Tuscany, Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 6(2), 15.

Berthoud, A., Maupu, P., Huet, C., Poupart, A., 2011. Assessing freshwater ecotoxicity of agricultural products in life cycle assessment (LCA): a case study of wheat using French agricultural practices databases and USEtox model. *The International Journal of Life Cycle Assessment*; 16; 841-84

Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., & Kuhlmann, H. (2000). Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 349.

Escobar, N., Ramírez-Sanz, C., Chueca, P., Moltó, E., & Sanjuán, N. (2017). Multiyear life cycle assessment of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) production in the Mediterranean region of Spain: a comparative case study. *Biomass and Bioenergy*, 107, 74-85

European Environment Agency (EEA). (2013) EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013- Technical guidance to prepare national emissions inventories. European Environment Agency, Luxembourg, EEA Technical report No 12/2013. Available at <http://www.eea.europa.eu>

. Faist Emmenegger M., Reinhard J. & Zah R. (2009) Sustainability Quick Check for Biofuels-intermediate background report. With contributions from T. Ziep, R. Weichbrodt, Prof. Dr. V. Wohlgemuth, FHTW Berlin and A. Roches, R. Freiermuth Knuchel, Dr.G. Gaillard, Agroscope Reckengolz--- Tänikon Dübendorf, Switzerland

Fernández, J., Curt, M. D., Aguado, P. L., Esteban, B., Sánchez, J., Checa, M., ... & Romero, L. (2011). Caracterización de las comarcas agrarias de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España, 1, 301-321.

Gobierno de la Rioja (2016). Estados fenológicos de la vid. Dirección URL: www.larioja.org/agricultura/es/investigacion-tecnologia/proteccion-cultivos/fenologicos/fenologicos-vid

ISO 14040-2006, 2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de Referencia. AEN/CTN 150 *Gestión Medioambiental*.

ISO 14044-2006, 2006. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices. AEN/CTN 150 *Gestión Medioambiental*.

Meneses, M., Torres, C. M., & Castells, F. (2016). Sensitivity analysis in a life cycle assessment of an aged red wine production from Catalonia, Spain. *Science of the Total Environment*, 562, 571-579.

Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente secretaría general de agricultura y alimentación dirección general de producciones y mercados agrarios. (2017) Balance de Nitrógeno de la agricultura Española.

Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente secretaría general de agricultura y alimentación dirección general de producciones y mercados agrarios. (2017) Producciones agrícolas, vitivinicultura.

Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., Mouron, P., Rossi, V., & Humbert, S. (2014). Methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products.

Neto, B., Dias, A. C., & Machado, M. (2013). Life cycle assessment of the supply chain of a Portuguese wine: from viticulture to distribution. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 590-602.

Organisation Internationale de la vigne et du vin (24, Octubre, 2017) Datos sobre la coyuntura vitivinícola mundial [Comunicado de prensa] Dirección URL: <http://www.oiv.int/public/medias/5682/es-communique-depresse-octobre-2017.pdf>

Organisation Internationale de la vigne et du vin (2007). Situación del sector vitivinícola mundial. Estadísticas vitivinícolas mundiales. Dirección URL: <http://www.oiv.int/public/medias/2873/4-1-a-es-statistiques-commentaires-annexes-2007-rectifie.pdf>

Pattara, C., Raggi, A., & Cichelli, A. (2012). Life cycle assessment and carbon footprint in the wine supply-chain. *Environmental management*, 49(6), 1247-1258.

Schau, E. M., & Fet, A. M. (2008). LCA studies of food products as background for environmental product declarations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(3), 255-264.

Villanueva-Rey, P., Vázquez-Rowe, I., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2014). Comparative life cycle assessment in the wine sector: biodynamic vs. conventional viticulture activities in NW Spain. *Journal of Cleaner Production*, 65, 330-341.

Rosado, M. A. G. (2016). Propuestas de prácticas sustentables en la Industria vitivinícola de Baja California, México (Doctoral dissertation, Tesis para obtener el grado de Maestro en administración integral del ambiente. Colegio de la Frontera Norte, México).

PPDB (2010). Pesticide properties database. University of Hertfordshire. Dirección URL: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es/Reports/605.htm> [Consulta: 18 August 2018]

Quinta de Couselo (2012) Tareas de la viña. Dirección URL: <http://www.quintacouselo.com/bodega/tareas-de-la-vina/>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), pp.1218–1230.