

EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL DE PLAGUICIDAS EN AGROECOSISTEMAS DE TOMATE BAJO INVERNADERO Y LIBRE EXPOSICIÓN DE COLOMBIA

Nelson Alejandro Serrato Bohórquez^a, Luis Alejandro Arias Rodríguez^b

^a Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Carrera 4 # 22- 61. Bogotá, Colombia. nelsona.serratob@utadeo.edu.co

^b Departamento de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Carrera 4 # 22- 61. Bogotá, Colombia. luis.arias@utadeo.edu.co

Resumen

La presente investigación se desarrolló en dos sistemas de producción de tomate, bajo invernadero y libre exposición, ubicados en el departamento de Boyacá y Santander respectivamente, con el objetivo de evaluar el riesgo ambiental causado por la aplicación de plaguicidas. Para tal fin se utilizó una metodología para la evaluación de riesgo ambiental (ERA) adaptada a las condiciones geográficas y ambientales del país, la cual, constituye una herramienta para la toma de decisiones que favorezcan la salud y la integridad de los compartimentos ambientales y los humanos. Tomando como base, investigaciones anteriores realizadas en las zonas de estudio y la disponibilidad de la información primaria y secundaria, se seleccionaron cuatro agroecosistemas en el departamento de Boyacá, cuatro en el departamento de Santander y ocho plaguicidas, los cuales fueron objeto de la ERA. Como resultado de dicha evaluación, se encontró que todos los plaguicidas seleccionados constituyen un riesgo para los organismos acuáticos que puedan estar presentes en la zona de estudio. Los ingredientes activos metalaxil y carbofuran representan un riesgo considerable para la contaminación de cuerpos de agua superficiales que se encuentran cerca a los agroecosistemas, debido a su coeficiente de adsorción (Koc) y a las altas dosis empleadas. Adicionalmente, ingredientes activos como el carbofuran, prohibido por la autoridad agrícola colombiana, sigue siendo usado y se encuentra como residuo en la Finca 4 del departamento de Santander. Aunado a esto, la sobredosificación por parte de los agricultores, incide directamente en que los plaguicidas azoxistrobin, dimetomorf en la Finca 4 ubicada en el departamento de Santander y metomilo en la Finca 1 del departamento de Boyacá, se encuentren como residuos en muestras de tomate a punto de consumo, lo cual, va en contravía de la seguridad alimentaria del país y representa un riesgo considerable para la salud de los consumidores, situación que se refuerza si se tiene en cuenta que el tomate es una de las hortalizas más consumidas por los colombianos.

Palabras clave: Agricultura sostenible, contaminación agrícola, límites máximos de residuos, seguridad alimentaria.

Abstract

The present work was developed, in two systems of tomatoes production, under greenhouse and free exhibition, located in the Boyacá and Santander department of respectively, with the aim to check out the environmental risk caused by the application of pesticides. To find out, the environmental risk assessment (ERA) adapted to the geographical and environmental conditions of the country was used, which is a tool for making decisions that helps the health and integrity of environmental compartments and humans. Based on previous research conducted in the study areas and the availability of primary and secondary information, four farms were selected in the Boyacá department, 4 in the Santander department and 8 pesticides, which were the subject of the ERA. As a result of this evaluation, it was found that all selected pesticides constitute a risk for aquatic organisms that may be present in the study area. The active ingredients metalaxyl and carboruran represent a high risk for the contamination of surface water bodies that are close to the farms, due to their adsorption coefficient (K_{oc}) and the high doses used. Active ingredients such as carbofuran, forbidden by the Colombian agricultural authority, is still used and is found as a residue in farm number 4 of the Santander department. Additionally, due to overdosing by farmers, the application of the pesticides azoxystrobin, dimethomorph in Farm 4 located in the Santander department and methomyl in Farm 1 of the Boyacá department, were found as residues in tomato samples. Point of consumption, this goes against the food safety of the country and represents a considerable risk to the health of consumers, a situation that is reinforced if it takes into account that tomato is one of the most consumed vegetables by Colombians.

Keywords: Sustainable agriculture, agricultural pollution, maximum residue limits, food security.

1. Introducción

En el 2015 se aprobó la Agenda 2030, la cual incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que constituyen un llamado universal para lograr el crecimiento económico, la inclusión social y la protección del medio ambiente (PNUD, 2016). La agricultura sostenible ha demostrado ser un acelerador para que los países alcancen múltiples ODS, tales como, erradicar la pobreza extrema, el hambre, la malnutrición; promover la gestión sostenible de recursos naturales, incluidos la biodiversidad, pesca, bosques, tierra,

suelos, agua y océanos; atenuar los efectos del cambio climático, adaptándose a él y creando resiliencia (FAO, 2017). Aunado a esto, se destaca el papel de la agricultura como catalizador de desarrollo mundial, especialmente en América Latina y el Caribe, quienes albergan un buen número de países en vía de desarrollo.

Lo anterior, exige claramente que los sistemas agrícolas sean altamente eficientes para lograr obtener las máximas cifras de productividad, salvaguardando la integridad y garantizando la sostenibilidad de los ecosistemas en los que se desarrollan, es allí, donde el uso de plaguicidas cobra gran importancia, ya que ayudan a combatir diversos tipos de plagas y enfermedades que de no ser controladas pueden derivar en la pérdida de hasta un 100% de la cosecha (Guaiteiro, 2010), sin embargo, este tipo de moléculas no siempre son compatibles con la integridad ambiental de los agroecosistemas donde son aplicadas.

Los plaguicidas han traído consigo ciertos problemas, ya que no solamente se distribuyen en el agroecosistema, sino que ingresan a otros compartimentos ambientales como el agua, el aire y el suelo, causando posiblemente la contaminación de acuíferos subterráneos o superficiales, como se muestra en las investigaciones de Carriquiriborde *et al.* (2014), Ruiz *et al.* (2014), Ccancapa *et al.* (2016), Aux (2016) y Etchegoyen *et al.* (2017), y la afectación de organismos y en especial de la fauna benéfica del suelo, evidenciada en Römbke *et al.* (2008), Garzón *et al.* (2014), Mansano *et al.* (2016) y Sáenz & Rosso (2018).

La presencia de estas moléculas en el ambiente, también puede afectar la salud de los seres humanos, en especial la de los agricultores, como se evidencia en las investigaciones de Plenge *et al.* (2007), Pérez *et al.* (2013) y Harari & Harari, (2016). Estos problemas asociados a la aplicación de plaguicidas no favorecen la consecución de algunos de los ODS, y más específicamente, van en contravía de la política Colombiana de Seguridad Alimentaria definida en el CONPES Social 113 de 2008, muestra de esto, es que el daño causado a los ecosistemas por la aplicación de plaguicidas afecta posteriormente la disponibilidad y el acceso de las comunidades a los alimentos, también puede verse afectada la salud y el bienestar de los consumidores, más aún, si se tiene en cuenta que la presencia de estas moléculas en algunos alimentos puede superar los Límites Máximos de Residuos (LMR) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) y la Unión Europea (EU), el Ministerio de Salud, Trabajo y Bienestar (MHLW), El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), Salud Canadá, entre otros.

Todo lo anterior genera una preocupación social a nivel mundial definida como Riesgo Ambiental, el cual se entiende como una categoría teórica que puede conjugar una serie de elementos relacionados con la degradación y los cambios en el ambiente (Cohen, 2017), este riesgo ambiental puede verse materializado en talleres internacionales, como en Guicherit *et al.* (1999), trabajos como Boivin & Poulsen (2017), e investigaciones como las de Finizio & Villa (2002), Flores *et al.* (2013), Li *et al.* (2014) y Garratt (2017). En el mismo sentido, estas investigaciones resaltan la importancia del desarrollo y aplicación de metodologías que permitan evaluar el riesgo ambiental asociado a la aplicación de plaguicidas, esto con el fin de contribuir a la toma de decisiones acertadas que garanticen la integridad y sostenibilidad de los agroecosistemas en el tiempo.

De acuerdo con lo anterior, la Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) es una metodología que permite estimar la probabilidad de que efectos ecológicos adversos puedan ocurrir o estén ocurriendo como resultado de la exposición a uno o más plaguicidas de uso agrícola (Guaiteiro, 2010). Uno de los aspectos más importantes y favorables de la ERA, es que para su aplicación se requiere de información que puede ser, en la mayoría de los casos, de fácil acceso. Esta información incluye propiedades físicas, químicas y toxicológicas de los plaguicidas, propiedades y características ambientales de la zona de estudio y datos puntuales acerca del manejo de los agroecosistemas por parte de los productores. Lo anterior, hace de la ERA una herramienta económica y de fácil aplicación en comparación con los métodos convencionales de laboratorio.

En lo que a Colombia respecta, Casilimas *et al.* (2012), Bastidas *et al.* (2013), Mojica & Guerrero (2013), Bojacá *et al.* (2013), Arias *et al.* (2014), Marrugo *et al.* (2014), Alza *et al.* (2016), Díaz *et al.* (2017), han hecho aportes significativos para entender la dinámica de estas moléculas en los agroecosistemas del país, no obstante, las evaluaciones de riesgo ambiental por el uso de plaguicidas son escasas, sin embargo, Guaiteiro (2010), desarrolló una metodología flexible, que integra y adecua a las condiciones del país indicadores usados internacionalmente para valorar el riesgo ambiental que representan estas moléculas.

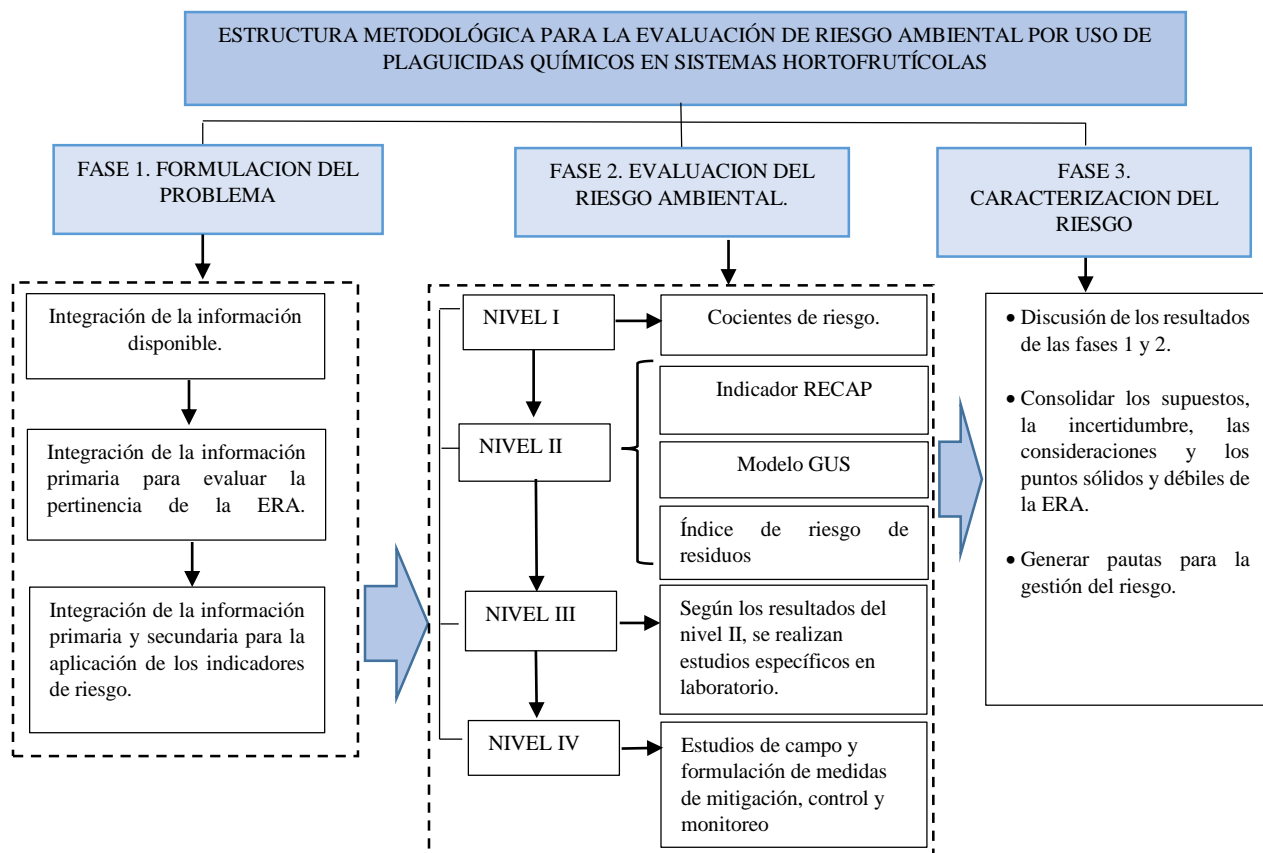
Productos como el tomate, una de las hortalizas de mayor consumo en el país según el DANE (2014), ha sido objeto de investigaciones como las de Arias *et al.* (2014) en donde se encontraron residuos de plaguicidas en el 73,5% de las muestras de tomate comercializado en algunos establecimientos de la ciudad de Bogotá, por su parte, Bojacá *et al.* (2013), Ayarza *et al.* (2014) y Garzón *et al.* (2014)

encontraron residuos de plaguicidas en el fruto, la planta y el suelo de cultivos de tomate ubicados en los departamentos de Santander-Provincia Guanentina y Boyacá-Provincia Ricaurte Alto, departamentos en donde se concentra la producción nacional de tomate a campo abierto y bajo invernadero respectivamente. Claramente, las investigaciones anteriores muestran un riesgo ambiental que puede incidir directamente en la salud y el bienestar de los ecosistemas y los humanos, por esta razón, se tomó como referencia la metodología propuesta por (Guaiteiro, 2010) con el objetivo de evaluar el riesgo ambiental causado por la aplicación de plaguicidas en algunos cultivos de tomate del departamentos de Santander-Provincia Guanentina y Boyacá-Provincia Ricaurte Alto, esto con el fin de proporcionar información que sirva para la toma de decisiones que favorezcan la integridad y sostenibilidad de estos agroecosistemas.

2. Materiales y métodos

En el presente estudio se seleccionaron los ocho agroecosistemas ubicados de la provincia de Alto Ricaurte en el departamento de Boyacá y en la provincia de Guanentina en el departamento de Santander, en los cuales, se evidenciaron problemáticas ambientales asociadas al uso de plaguicidas químicos, por medio de investigaciones realizadas en el marco de los proyectos Multidisciplinary assessment of efficiency and sustainability of smallholder-based tomato production systems in Colombia, with a roadmap for change” (Código: ZEIN2009PRE364) y “Determinación de residuos de plaguicidas en cuerpos de agua asociados a la producción de tomate en Colombia (Cod: 632-11-14), y más específicamente en los trabajos adelantados por Bojacá *et al.* 2013, Ayarza *et al.* (2014), Garzón *et al.* (2014). Con el fin de evaluar el riesgo ambiental de la aplicación de plaguicidas, en los agroecosistemas anteriormente mencionados, se aplicó La Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) propuesta por Guaiteiro (2010), cuya estructura general se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Representación gráfica del proceso de Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) desarrollado por Guaiteiro (2010).



Tomado de: Guaitero (2010)

Una de las fortalezas de esta ERA es que permite valorar el nivel de riesgo al que se encuentran expuestos los compartimentos ambientales de suelo, producto vegetal, agua y aire, sin embargo, no permite la estimación de la cantidad de residuos de plaguicidas presentes en un compartimento ambiental específico. De acuerdo con lo anterior, es importante cuantificar a través de análisis de laboratorio la cantidad de residuos de cada plaguicida en los compartimentos ambientales, esto con el fin de establecer comparaciones entre la información emitida por la ERA y los resultados obtenidos en campo. Dichos análisis de laboratorio, se realizaron en las investigaciones de Ayarza *et al.* (2014), Garzón *et al.* (2014) y Aux (2016), sus resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Residuos de plaguicidas químicos encontrados en algunos compartimentos ambientales de cultivos de tomate en departamento de Boyacá y Santander.

Ubicación/Sistema De Cultivo	Agroecosistema	Matriz Ambiental	Plaguicidas Encontrados	Concentración Obtenida (Ppm)	LMR (ppm) Códex Alimentarius	LMR (ppm) Unión Europea
	FINCA 1	Agua	NR	NR	NR	NR

Boyacá - Provincia Ricaurte Alto/Cultivos De Tomate Bajo Invernadero		Suelo	Dimetomorf	0,061	--	--
			Clorfenapir	0,112	--	--
		Hojas	Dimetomorf	0,034	--	--
			Metomilo	0,287	--	--
		Fruto	Indoxacarb	0,472	0,5	0,5
			Metalaxil	0,0085	0,5	0,2
	FINCA 2	Agua	NR	NR	NR	NR
			Metalaxil	0,177	--	--
		Suelo	Tiociclám	0,03	--	--
			Metalaxil	0,002	--	--
		Hojas	Tiociclám	0,172	--	--
			Metalaxil	0,008	0,5	0,2
		Fruto	Tiociclám	0,132	0,01	0,01
			NR	NR	NR	NR
	FINCA 3	Suelo	Metomilo	0,087	--	--
			NR	NR	NR	NR
		Hojas	NR	NR	NR	NR
			Tiociclám	0,724	0,01	0,01
	FINCA 4	Agua	NR	NR	NR	NR
			NR	NR	NR	NR
Suelo		NR	NR	NR	NR	
		Acefato	0,022	1	0,01	
Fruto		Azoxistrobin	0,033	0,01	3	
		Spinozad_A	0,0473	0,3	1	
Santander-Provincia Guanentina/Cultivos De Tomate A Libre Exposición	FINCA 1	Agua	NR	NR	NR	NR
			Difenoconazol	0,959	--	--
		Suelo	Dimetomorf	41,969	--	--
			Metomilo	0,832	--	--
			Tebuconazol	23,027	--	--
		Hojas	Dimetomorf	0,195	--	--
			Tebuconazol	0,343	--	--
		Fruto	NR	NR	NR	NR
	FINCA 2	Agua	NR	NR	NR	NR
			Carbendazim	18,804	--	--
		Suelo	Dimetomorf	18,953	--	--
			Metalaxil	0,353	--	--
			Metomilo	1,555	--	--
			Tebuconazol	4,032	--	--
			Tiabendazol	1,273	--	--
		Hojas	Azoxistrobin	0,019	--	--
			Carbendazim	1,133	--	--
			Dimetomorf	1,426	--	--
		Fruto	Azoxistrobin	0,009	0,01	3
			Carbendazim	0,207	0,5	0,3

		Dimetomorf	0,0226	0,01	1	
	FINCA 3	Agua	NR	NR	NR	
			Azosxistrobin	1,310	--	--
			Benalaxilo	0,419	--	--
			Carbendazim	1,852	--	--
		Suelo	Dimetomorf	30,517	--	--
			Metalaxil	0,383	--	--
			Metomilo	1,682	--	--
			Tiabendazol	1,257	--	--
		Hojas	3OH_carbofuran	0,032	--	--
			Dimetomorf	3,129	--	--
		Fruto	Azosxistrobin	0,0031	0,01	3
			Dimetomorf	0,0346	0,01	1
		FINCA 4	Agua	NR	NR	NR
			Azosxistrobin	1,276	--	--
			Carbendazim	0,637	--	--
			3OH_carbofuran	0,810	--	--
			Carbofuran	18,377	--	--
	Suelo		Cimoxanil	23,167	--	--
			Difenoconazol	3,448	--	--
			Dimetomorf	25,136	--	--
			Indoxacarb	15,476	--	--
			Metalaxil	0,418	--	--
			Metomilo	4,145	--	--
			Pirimicarb	2,788	--	--
	Hojas		Carbendazim	0,027	--	--
			3OH_carbofuran	0,673	--	--
			Carbofuran	0,324	--	--
			Difenoconazol	0,723	--	--
			Dimetomorf	0,007	--	--
			Indoxacarb	23,887	--	--
			Metomilo	0,157	--	--
	Fruto		carbofuran	0,0527	0,01	0,01
		Difenoconazol	0,509	0,5	2	
		Metomilo	0,0583	1	0,02	

RN = No hay presencia de residuos de plaguicidas para este cultivo y compartimento ambiental. Fuente: adaptado de Garzón (2014), Ayarza (2014) y Aux (2016).

Para el desarrollo y aplicación de la ERA en los ocho agroecosistemas seleccionados y de acuerdo a la disponibilidad de la información primaria y secundaria, los plaguicidas seleccionados y que fueron objeto de la ERA se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Fincas y plaguicidas seleccionados para la evaluación de riesgo ambiental (ERA)

Departamento				
BOYACÁ - PROVINCIA RICAURTE ALTO				
Agroecosistema	FINCA 1	FINCA 2	FINCA 3	FINCA 4
Municipio	Villa de Leyva	Sutamarchán	Villa de Leyva	Santa Sofía
Ingrediente Activo	Metaxilo	Metaxilo	Metomilo	Azosxistrobin
	Metomilo	Tiociclam	Tiociclam	-
	Dimetomorf			-
Departamento				
SANTANDER - PROVINCIA GUANENTINA				
Agroecosistema	FINCA 1	FINCA 2	FINCA 3	FINCA 4
Municipio	Páramo	Valle de San José	San Gil	Curití
Ingrediente Activo	Azosxistrobin	Azosxistrobin	Azosxistrobin	Azosxistrobin
	Dimetomorf	Dimetomorf	Dimetomorf	Dimetomorf
		Carbendazim	Carbendazim	Carbendazim
		Metaxilo	Metaxilo	Metaxilo
	Metomilo	Metomilo	Metomilo	Metomilo
	Difenoconazol			Difenoconazol
			Carbofuran	

Una vez seleccionados los agroecosistemas y los plaguicidas, se aplicó la metodología para la Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA) desarrollada por Guaitero (2010), la cual se estructura en tres fases fundamentales (figura 1), tal como se muestra a continuación.

2.1. Fase 1: Formulación del problema

2.1.1. Integración de la información primaria para la evaluación de la pertinencia de la ERA

En esta primera fase, se busca integrar la información primaria y secundaria disponible, la cual, permitirá evaluar de acuerdo a la severidad de la problemática ambiental identificada, si es o no pertinente la aplicación de la ERA. Para tal fin, se evaluó la pertinencia de la ERA haciendo uso de la información primaria suministrada por el proyecto “Multidisciplinary assessment of efficiency and sustainability of smallholder-based tomato production systems in Colombia, with a roadmap for change” (Código: ZEIN2009PRE364), en el cual, se realizaron 255 encuestas semi-estructuradas (175 en Boyacá y 80 en

Santander) que sirvieron como insumo, para el desarrollo y aplicación del cuestionario propuesto por Guaitero (2010), a los ocho agroecosistemas seleccionados. En el cuestionario se tienen en cuenta aspectos importantes como la categoría toxicológica de los plaguicidas usados, su frecuencia de aplicación y la dosis utilizada, la presencia de un plan de manejo integrado de plagas y enfermedades, la implementación de las buenas prácticas agrícolas, entre otros.

Con un rango de 1 a 18 puntos, un puntaje mayor a 9, es decir, superior al 50% el cuestionario indica un riesgo latente para los compartimentos ambientales y para los humanos, y se demuestra que es necesario avanzar en la aplicación de la siguiente fase de la ERA para el agroecosistema y el plaguicida en cuestión.

2.1.2. Integración de la información para la aplicación de los indicadores de riesgo.

Adicional al cuestionario y haciendo uso de los datos recolectados por el proyecto anteriormente mencionado, se diligenció el formato de encuesta propuesto por Guaitero (2010), en el cual se recolectó la información requerida por los indicadores de riesgo utilizados en la aplicación de la ERA, esta información está relacionada con la intensidad de aplicación de plaguicidas, las características geográficas de la zona, el tamaño del agroecosistema, la duración del ciclo productivo, entre otros.

En cuanto a la información secundaria, luego de buscar en bases de datos como EU Pesticide Database, Pesticide Properties Database (PPDB), PAN Pesticide Database, Integrated Risk Information System (IRIS), se construyó la Tabla 4, la cual, reúne las propiedades físicas, químicas, características residuales, toxicológicas y ecotoxicológicas de los plaguicidas, requeridas por los indicadores de riesgo en la **Fase 2** de la ERA.

Fase 2: Evaluación del riesgo ambiental

En esta fase se aplicaron diferentes indicadores ambientales, para los cuales, se hizo uso de la información primaria y secundaria recolectada durante la **Fase 1**. Estos indicadores se agrupan en cuatro niveles de evaluación que aumentan en exigencia y rigurosidad con el fin de valorar el riesgo para los compartimentos ambientales, suelo, agua superficial, agua subterránea, aire y producto vegetal.

2.1.3. Nivel I

En este nivel se relacionó la exposición y el grado de toxicidad de los plaguicidas sobre los organismos animales terrestres y acuáticos, para esto se realizó el cálculo de los Coeficientes de Riesgo (RQ) tal y como se establece en Guaitero (2010), y se los comparó con el Nivel de Preocupación (Level of Concern, LOC). Si los valores de RQ superan los LOC, significa que existe un riesgo potencial y se debe avanzar al siguiente nivel de evaluación en la ERA.

2.1.4. Nivel II

En este nivel se evaluó el riesgo para los organismos terrestres y acuáticos, haciendo uso de los indicadores de riesgo RECAP (Riesgo Ecológico por Aplicación de Plaguicidas) adaptado de Jerez *et al.* (2006), el modelo GUS desarrollado por Gustaffson (1989) y el IRR (Índice de Riesgo de Residuos) desarrollado por Santiago (2001).

2.1.4.1. Modelo RECAP

Debido al procedimiento efectuado en el **Nivel I**, el cual sugirió un análisis más profundo en la estimación del riesgo para los organismos animales terrestres y acuáticos, se hizo uso de la adaptación del modelo RECAP realizada por Guaitero (2010), el cual consta de cinco índices de riesgo; tres para evaluar riesgo agudo de los compartimentos ambientales agua superficial, suelo epigeo y suelo hipogeo y dos para evaluar el riesgo crónico en los compartimentos ambientales suelo epigeo y suelo hipogeo, de la misma manera, el cálculo y la valoración cualitativa para cada uno de los índices que integran el modelo RECAP se realizaron según lo propuesto en Guaitero (2010).

2.1.4.2. Modelo GUS: Indicador del potencial de lixiviación

Con este modelo se relacionó el Coeficiente de Adsorción de Carbono Orgánico (K_{oc}) con la vida media en el suelo (DT_{50}) de los plaguicidas, para predecir el potencial de lixiviación de estas moléculas y probablemente la contaminación de cuerpos de agua subterráneos. El cálculo de este índice se realizó de acuerdo a lo propuesto por Guaitero (2010).

2.1.4.3. Índice de riesgo de residuos (IRR) de plaguicidas sobre el producto vegetal

Se utilizó este indicador para estimar el riesgo causado por los residuos de plaguicidas sobre el tomate cosechado y a punto de consumo en el departamento de Boyacá y Santander, esto con el fin de emitir alertas tempranas a las autoridades agrícolas y de salud, y poder evitar posibles afectaciones a la salud y la integridad de los colombianos.

2.1.5. Nivel III y IV

Una vez se han aplicado todos los requerimientos contemplados en los niveles de evaluación I, II y III y se evidencia que persiste el riesgo para determinado plaguicida, en el nivel III se realiza un análisis mucho más riguroso para lograr la caracterización del riesgo. En este análisis se pueden emplear simulaciones del movimiento de estas moléculas en el laboratorio, incluyendo características específicas del suelo y de las condiciones climáticas de la zona de estudio, estudios de toxicidad aguda y crónica sobre organismos que se encuentren en vía de extinción, que sean particulares de la región o que tengan potencial económico (Guaitero, 2010).

Una vez se has superado los anteriores niveles de evaluación, en el nivel IV se realizan pruebas de campo que incluyen características específicas del área de estudio, también se tiene en cuenta la fisiología de los cultivos y modelaciones para el ciclo de vida de los plaguicidas, esto con el fin de aclarar dudas sobre el comportamiento ambiental del plaguicida. Estas pruebas se realizan teniendo siguiendo la metodología recomendada en el Manual Técnico para el Registro y Control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola (CAN, 2001).

2.2. Caracterización del riesgo

En este apartado se integraron las fases anteriores para lograr realizar un análisis exhaustivo de los resultados de la ERA, el cual implicó la integración y correlación de estos resultados con las pruebas realizadas en laboratorio, adicionalmente se identificaron los puntos fuertes y débiles de la evaluación y finalmente se generaron pautas para la gestión del riesgo ambiental causado por la aplicación de estas moléculas en los agroecosistemas seleccionados.

3. Resultados y discusión

3.1. Formulación del problema

3.1.1. Integración de la información primaria para la evaluación de la pertinencia de la ERA

De acuerdo con las reglas de decisión expuestas anteriormente en la metodología, se puede ver en la Tabla 3, que de los ocho agroecosistemas analizados, solamente uno (Finca 4) ubicado en el departamento de Boyacá no obtuvo el puntaje necesario para la realización de la ERA. Esto se debe principalmente a que el agricultor realiza un manejo agronómico adecuado, implementa las buenas prácticas agrícolas (BPA) y la aplicación de plaguicidas se está sujeta a recomendaciones de un asistente técnico.

Tabla 3. Puntajes obtenidos por los agroecosistemas en la evaluación de la pertinencia de la ERA

SANTANDER - PROVINCIA GUANENTINA			
No. Finca (Agroecosistema)	Puntaje (1-18)	Porcentaje (%)	Pertinencia de la ERA
FINCA 1 Páramo	13	72,2 %	PERTINENTE
FINCA 2 Valle de San José	14	77,8 %	PERTINENTE
FINCA 3 San Gil	11	61,1%	PERTINENTE
FINCA 4 Curití	14	77,8 %	PERTINENTE
BOYACÁ - PROVINCIA RICAURTE ALTO			
No. Finca (Agroecosistema)	Puntaje (1-18)	Porcentaje (%)	Pertinencia de la ERA
FINCA 1 Villa de Leyva	10	61,1 %	PERTINENTE
FINCA 2 Sutamarchán	13	72,2 %	PERTINENTE
FINCA 3 Villa de Leyva	13	72,2 %	PERTINENTE
FINCA 4 Santa Sofía	6	33,3 %	NO PERTINENTE

El uso de plaguicidas con categoría toxicológica I y II, la falta de capacitación a los operarios en el manejo de plaguicidas, la no calibración de los equipos usados para la aplicación de plaguicidas y la alta frecuencia en la aplicación de estos productos, son unas de las razones para

que el puntaje obtenido por los siete agroecosistemas superara el 50% y fuera pertinente la realización de las fases posteriores de la ERA.

3.1.2. Integración de la información para la aplicación de los indicadores de riesgo

Con el fin de recopilar la información necesaria para la aplicación de los indicadores de riesgo ambiental de las fases posteriores, se utilizó la información suministrada por el proyecto “Multidisciplinary assessment of efficiency and sustainability of smallholder-based tomato production systems in Colombia, with a roadmap for change” (Código: ZEIN2009PRE364), para desarrollar el formato de encuesta propuesto por Guaitero (2010), con el cual se determinó la dosis y la intensidad con la que se aplican plaguicidas, las características geográficas de la zona, el tamaño del agroecosistema, la duración del ciclo productivo, entre otros.

En cuanto a la información secundaria, posterior a la consulta en las respectivas bases de datos y otras fuentes, se consolidó la información presentada en la Tabla 4, en donde se consigna las propiedades físicas, químicas, características residuales, toxicológicas y ecotoxicológicas de los plaguicidas, las cuales son requeridas por los indicadores de riesgo en la Fase 2 de la ERA.

Tabla 4. Información secundaria requerida por los indicadores de riesgo en la ERA.

Indicador de riesgo	Variable	Unidades	Carbofuran	Carbendazim	Azoxistrobin	Difenoconazol	Dimetomorf	Metalaxil	Metomilo	Tiociclam
Cociente de riesgo (RQ)	DT50suelo	Días	14	22	180,7	85	44	38,7	7	1
	t (Lombriz de tierra)	Días	56	14	56	56	56	56	14	
	EC50 (<i>Daphnia</i>)	mg i,a./L	0,0094	0,15	0,23	0,77	10,6	3,47	0,0076	2,01
	LC50 (Lombriz de tierra)	mg/kg suelo	224	5,4	283	610	500	1000	19	87
	NOEC (Lombriz de tierra)	ppm	0,84	1	20	0,2	60	40	1,5	-
	LC50 (Peces)	mg i,a./L	0,18	0,44	0,47	1,1	3,4	0,96	0,63	0,04
Riesgo Ecológico por Aplicación de Plaguicidas (RECAP)	LD50 (Ratas)	mg/kg peso	7	10000	5000	1453	3900	669	30	370
	LD50 (Abejas)	µg/kg	0,05	756	25	177	32,4	269	0,28	-
	LD50 (Aves)	ppm	0,71	2250	2000	2150	2000	1466	24,2	-
	t (Ratas)	Días	60	730	730	730	730	730	730	-
	DT50suelo	Días	14	22	180,7	85	44	38,7	7	1
	NOEC (Lombriz de tierra)	ppm	0,84	1	20	0,2	60	40	1,5	-
	NOEL (Mamíferos, ratas)	ppm	0,2	500	32	17,3	300	96	4,6	-
	NOEL (Abejas)	ppm	0,001	1,512	0,05	0,354	0,0648	0,538	0,00056	-
	NOEL (Aves)	ppm	0,64	212	117	100	800	300	150	-
	TDI (Aves)	mg/kg peso/día	1,6	615	1179	5000	728,3	10000	518,8	-
TDI (Mamíferos, ratas)	mg/kg peso/día	0,1	0,02	0,2	0,01	0,05	0,08	0,0025	-	

	EC50 (<i>Daphnia</i>)	mg i.a./L	0,0094	0,15	0,23	0,77	10,6	3,47	0,0076	2,01
	EC50 (Algas)	mg i.a./L	6,5	8	0,36	0,032	29,2	0,42	100	3,3
Índice de Riesgo de Residuos (IRR)	Kow (Log)	--	1,8	0,9	2,5	4,6	2,68	1,75	0,09	-0,07
	DT50suelo	Días	14	22	180,7	85	44	38,7	7	1
Modelo GUS	Koc	--	28	223	589	6120	1360	163	43	20
	DT50suelo	Días	14	22	180,7	85	44	38,7	7	1

Fuente: EU Pesticide Database, Pesticide Properties Database (PPDB), PAN Pesticide Database, Integrated Risk Information System (IRIS).

3.2. Fase 2: Evaluación del riesgo ambiental

3.2.1. Nivel I

Haciendo uso de la información suministrada por los agricultores a través de la encuesta diligenciada en la Fase 1, se obtuvo la dosis real del ingrediente activo aplicado por hectárea, dato con el cual, se estimó el riesgo al que se encuentran expuestos los organismos de los compartimentos ambientales suelo, aire y agua superficial, presentes en los agroecosistemas seleccionados, En la Tabla 5 se pueden ver los resultados del cálculo de los RQ's y su comparación con los LOC para los siete agroecosistemas que continuaron en el proceso de la ERA.

Tabla 5. Comparación de los Coeficientes de Riesgo (RQ) con los Level of Concern (LOC) para los plaguicidas encontrados en Boyacá y Santander.

		BOYACÁ - PROVINCIA RICAURTE ALTO								
Agroecosistema	Plaguicida	Organismos Terrestres (Lombriz de tierra)						Organismos Acuáticos (<i>Daphnia</i>)		
		RQ-Riesgo agudo alto	LOC	RQ>LOC	RQ-Riesgo crónico	LOC	RQ>LOC	RQ-Riesgo agudo alto	LOC	RQ>LOC
Finca 1	Dimetomorf	0,002		No	0,009		No	1,423		Si
	Metalaxil	0,001	0,5	No	0,008	1,0	No	2,893	0,5	Si
	Metomilo	0,187		No	1,278		Si	8952,632		Si
Finca 2	Metalaxil	0,001	0,5	No	0,016	1,0	No	7,043	0,5	Si
	Tiociclam	0,006		No	--		--	6,057		Si
Finca 3	Metomilo	0,059	0,5	No	0,404	1,0	No	3157,895	0,5	Si
	Tiociclam	0,013		No	--		--	11,905		Si
		SANTANDER - PROVINCIA GUANENTINA								
Agroecosistema	Plaguicida	Organismos Terrestres (Lombriz de tierra)						Organismos Acuáticos (<i>Daphnia</i>)		
		RQ-Riesgo agudo alto	LOC	RQ>LOC	RQ-Riesgo crónico	LOC	RQ>LOC	RQ-Riesgo agudo alto	LOC	RQ>LOC
Finca 1	Azosxistrobin	0,00052		No	0,007		No	17,913		Si
	Difenoconazol	0,00036	0,5	No	0,883	1,0	No	8,000	0,5	Si

	Dimetomorf	0,00057		No	0,003		No	0,755		Si
	Metomilo	0,01000		No	0,069		No	700,000		Si
Finca 2	Azoxistrobin	0,00027		No	0,003		No	9,217		Si
	Carbendazim	0,000001		No	0,000		No	0,003		No
	Dimetomorf	0,00185	0,5	No	0,010	1,0	No	2,449	0,5	Si
	Metalaxil	0,00025		No	0,004		No	1,994		Si
	Metomilo	0,08128		No	0,557		No	5689,474		Si
Finca 3	Azoxistrobin	0,00027		No	0,003		No	9,217		Si
	Carbendazim	--		No	--		No	--		No
	Dimetomorf	0,00155	0,5	No	0,009	1,0	No	2,049	0,5	Si
	Metalaxil	0,00009		No	0,001		No	0,749		Si
	Metomilo	0,04353		No	0,298		No	3047,368		Si
Finca 4	Azoxistrobin	0,00121		No	0,015		No	41,739		Si
	Carbendazim	0,05159		No	0,225		No	52,000		Si
	Carbofuran	0,00006		No	0,006		No	1404,255		Si
	Difenoconazol	0,00046	0,5	No	1,118	1,0	Si	10,130	0,5	Si
	Dimetomorf	0,00476		No	0,026		No	6,291		Si
	Metalaxil	0,00064		No	0,010		No	5,187		Si
	Metomilo	0,04511		No	0,309		No	3157,89		Si

Como se muestra en los resultados presentados en la Tabla 5, el plaguicida carbendazim en la Finca 2 y 3 del departamento de Santander-provincia Guanentina, no representa un riesgo significativo para el ambiente, por tal razón y de acuerdo con la regla de decisión presente en la metodología para esta fase de evaluación, finalizan su proceso dentro de la ERA.

Es importante mencionar que de los plaguicidas incluidos en la ERA, el carbendazim es uno de los plaguicidas que presenta valores ecotoxicológicos que incrementan el riesgo (Tabla 4) para los organismos representativos terrestres y acuáticos, aun así, la dosis (1,8 g de i,a, ha⁻¹) reportada por el agricultor de la Finca 2 durante la realización de la encuesta en la Fase 1, hace que los valores de RQ para este plaguicida no superen los LOC e indiquen que no existe un riesgo significativo para los organismos terrestres y acuáticos.

Cabe aclarar que en la Finca 3 mencionada anteriormente, el plaguicida carbendazim no presenta valores de RQ, ya que en la encuesta realizada en la **Fase 1**, el agricultor aseguró no hacer uso de este plaguicida durante el ciclo productivo, por tanto, no se tiene registro de las dosis y frecuencia empleada, sin embargo, en los análisis de laboratorio se encontraron residuos de este plaguicida en el compartimento ambiental suelo (1,853 ppm).

Lo anterior permite inferir que presuntamente el agricultor ocultó información acerca del número de plaguicidas que aplica en el ciclo de producción del tomate, más aun, cuando se tiene en cuenta que la vida media del carbendazim en el suelo ($DT_{50 \text{ suelo}}$) es de 22 días, tiempo relativamente corto, y no se tiene registro de otro tipo de actividad agrícola que se realice en la zona de estudio.

Por otra parte, el resto de los plaguicidas avanza al siguiente nivel de evaluación de la ERA, ya que el valor obtenido en sus RQ's es superior a los LOC, lo cual significa que, por sus características físicas, químicas y ecotoxicológicas, representan un riesgo para el ambiente, en particular para los organismos acuáticos. Se destaca al plaguicida metomilo en la Finca 1 departamento de Boyacá y al difenoconazol en la Finca 4 en el departamento de Santander, por representar un riesgo crónico para los organismos terrestres, esto implica una amenaza potencial por la exposición prolongada a estos plaguicidas.

3.2.2. Nivel II

3.2.2.1. Modelo RECAP

Los resultados obtenidos en el Nivel I de evaluación, indican que se debe profundizar en la estimación del riesgo para los organismos terrestres y en especial para los acuáticos, Para tal fin, en la Tabla 6 se muestran los resultados de la aplicación del modelo RECAP.

Tabla 6. Resultado de la aplicación del modelo RECAP para los agroecosistemas y plaguicidas seleccionados.

BOYACÁ - PROVINCIA RICAURTE ALTO						
Plaguicida	Índices					
	PRIHS-1	PRIHS-2	PRIES-1	PRIES-2	PRISW-1	
Finca 1	Dimetomorf	10,5 Bajo	12,5 Bajo	46,5 Medio	75,396 Muy alto	100 Muy alto
	Metaxil	0 Nulo	12,5 Bajo	43 Medio	68,598 Alto	100 Muy alto
	Metomilo	50 Alto	94 Muy alto	80 Muy alto	38,728 Medio	100 Muy alto
	Metaxil	2 Nulo	23,5 Medio	43 Medio	68,598 Alto	100 Muy alto
Finca 2	Tiociclam	12,5 Bajo	- -	- -	- -	100 Muy alto
	Metomilo	25	50	80	29,046	94

		Medio	Muy alto	Muy alto	Medio	Muy alto
	Tiociclam	23	-	-	-	100
		Medio	-	-	-	Muy alto
SANTANDER - PROVINCIA GUANENTINA						
Agroecosistema	Plaguicida	Índices				
		PRIHS-1	PRIHS-2	PRIES-1	PRIES-2	PRISW-1
Finca 1	Asoxistrobin	0	12,5	49	71,962	100
		Nulo	Bajo	Medio	Muy alto	Muy alto
	Difenoconazol	0	47	40,5	49,44	100
		Nulo	Alto	Medio	Alto	Muy alto
	Dimetomorf	0	11	46,5	75,396	94
		Nulo	Bajo	Medio	Muy alto	Muy alto
Metomil	12,5	25	80	19,364	88	
	Bajo	Medio	Muy alto	Medio	Muy alto	
Finca 2	Asoxistrobin	0	12,5	49	71,96	100
		Nulo	Bajo	Medio	Muy alto	Muy alto
	Dimetomorf	10,5	23,5	46,5	75,396	100
		Bajo	Medio	Medio	Muy alto	Muy alto
	Metalaxil	0	12,5	43	45,732	100
		Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Metomilo	25	50	80	38,73	94	
	Medio	Muy alto	Muy alto	Medio	Muy alto	
Finca 3	Azosxistrobin	0	12,5	49	71,96	100
		Nulo	Bajo	Medio	Muy alto	Muy alto
	Carbendazim	--	--	--	--	--
	Dimetomorf	10,5	12,5	46,5	75,396	100
		Bajo	Bajo	Medio	Muy alto	Muy alto
	Metalaxil	0	11	43	45,732	100
Nulo		Bajo	Medio	Alto	Muy alto	
Metomilo	25	47	80	29	94	
	Medio	Alto	Muy alto	Medio	Muy alto	
Finca 4	Azosxistrobin	10,5	23,5	49	107,94	100
		Bajo	Medio	Medio	Muy alto	Muy alto
	Carbendazim	21	44	34,5	22,5	100
		Medio	Alto	Medio	Medio	Muy alto
	Carbofuran	2	14	85	24,72	88
		Nulo	Bajo	Muy alto	Medio	Muy alto
Difenoconazol	0	91	40,5	49,44	100	
	Nulo	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	
Dimetomorf	10,5	23,5	46,5	100,528	100	
	Bajo	Medio	Medio	Muy alto	Muy alto	
Metalaxil	0	23,5	43	68,6	100	
	Nulo	Medio	Medio	Alto	Muy alto	

En general, para los organismos del ecosistema hipogeo (lombrices y mamíferos), el índice PRIHS-1 que evalúa el riesgo inmediatamente después de la aplicación del plaguicida, muestra que ninguno de los plaguicidas representa un riesgo ambiental considerable.

En cuanto el plaguicida tiociclam, presente en la Finca 1 y 2 ubicadas en el departamento de Boyacá, presenta al igual que los demás, un nivel de riesgo “Muy alto” para los organismos (algas, *Daphnia* y peces) presentes en ecosistemas de aguas superficiales según el índice PRISW-1. Debido a la falta de información secundaria, no es posible evaluar el riesgo que representa la aplicación de plaguicidas para los organismos del ecosistema hipogeo (lombrices y mamíferos) en el índice PRISH-2, lo mismo sucede con los organismos del ecosistema epigeo (abejas, aves y mamíferos) en el índice PRIES-1 y PRIES-2, sin embargo, el plaguicida no fue excluido de la ERA debido a que en investigaciones como la realizada por Rodríguez (2017), se muestra que el ingrediente activo tiociclam junto con el metomilo presentan un efecto negativo sobre el proceso de polinización de la *A. mellifera*, el cual se ve reflejado en la disminución del número de semillas polinizadas y la cantidad de frutos obtenidos en cada planta.

Si bien, todos los plaguicidas representan un riesgo significativo para los ecosistemas de aguas superficiales (PRISW-1) y deben ser sometidos a niveles posteriores de evaluación dentro de la ERA, el plaguicida metomilo en la mayoría de los ecosistemas en donde es aplicado, se destaca por presentar la mayor cantidad de índices indicando un nivel de riesgo “Muy alto”, esto se debe principalmente, según la encuesta aplicada en la Fase 1, a la sobredosificación y alta frecuencia de aplicación por parte del agricultor. Lo anterior se ve reforzado por investigaciones como la de Rodríguez (2017), en la cual, se responsabiliza al metomilo de afectar un importante servicio ecosistémico como la polinización, aunado a lo anterior, Sáenz & Rosso (2018) demuestran que el metomilo tiene un efecto negativo en la nodulación de la especie *T. pratense*, afectando la fijación de nitrógeno en el suelo, otro servicio ecosistémico importante para estos sistemas de producción.

Investigaciones como la de Ramírez et al. (2007), también señalan a la sobredosificación y la categoría toxicológica de los plaguicidas como factores responsables de la contaminación de cuerpos de agua cercanos a los agroecosistemas.

3.2.2.2. Modelo GUS: Indicador del potencial de lixiviación

Debido a que para el cálculo de este índice (Tabla 7), no se tiene en cuenta las propiedades físicas y químicas del suelo, se realizó un análisis general de los plaguicidas y no se los discriminó por el agroecosistema (finca) en donde son aplicados, tal y como se muestra a continuación.

Tabla 7. Resultados del modelo GUS para el potencial de lixiviación de los plaguicidas.

BOYACÁ - PROVINCIA RICAURTE ALTO				
Plaguicida	DT50 suelo (Días)	Koc	GUS	Potencial de Lixiviación
Dimetomorf	44,0	1360,0	1,424	No lixivía
Metalaxil	38,7	1,8	5,965	Alto
Metomilo	7,0	43,0	2,000	Moderado
Tiociclam	1,0	20,0	0,0001	No lixivía
SANTANDER - PROVINCIA GUANENTINA				
Plaguicida	DT50 suelo (Días)	Koc	GUS	Potencial de Lixiviación
Azoxistrobin	180,7	589,0	2,776	Moderado
Difenoconazol	85,0	6120,0	0,411	No lixivía
Dimetomorf	44,0	1360,0	1,424	No lixivía
Carbendazim	22,0	223,0	2,217	Moderado
Carbofuran	14,0	28,0	2,926	Alto
Metalaxil	38,7	1,8	5,965	Alto
Metomilo	7,0	43,0	2,000	Moderado

De acuerdo con lo anterior, el plaguicida metomilo, azoxistrobin y carbendazim presentan un riesgo de lixiviación moderado (Tabla 7) para los agroecosistemas en donde son aplicados (Tabla 1), esto se debe principalmente al bajo valor del coeficiente de adsorción, el cual indica que estos plaguicidas presentan poca afinidad con la materia orgánica y por tanto no son retenidos por el suelo del cultivo, sino por el contrario, se mueven con gran facilidad en las aguas superficiales. Para el caso específico del azoxistrobin, su coeficiente de adsorción no es tan bajo, sin embargo, es el plaguicida que presenta la vida media en el suelo (DT₅₀) más alta en comparación con los demás, esto causa que permanezca mucho más tiempo en el cultivo y que aumente el riesgo de lixiviación de esta molécula. También se resaltan los resultados obtenidos por los plaguicidas metalaxil y carbofuran, los cuales según el indicador GUS presentan un potencial alto de lixiviación (Tabla 7) en los agroecosistemas que son aplicados (Tabla 1), este resultado se relaciona directamente con los coeficientes de adsorción de estos dos plaguicidas, que al ser los

más bajos, indican que presentan una movilidad alta en las aguas superficiales, y representan un riesgo de contaminación para los cuerpos de agua cercanos.

De acuerdo con lo anterior, en el departamento de Santander el cuerpo de agua más cercano, el río Fonce, y en Boyacá los reservorios de agua superficial que se encuentran junto a los invernaderos usados para la producción de tomate, pueden estar siendo contaminados por el plaguicida metalaxil y carbofuran, sin embargo, los análisis de muestras de agua y sedimento realizados por Aux (2016), no muestran la presencia de residuos de plaguicidas en estos compartimentos ambientales (Tabla 1).

3.2.2.3. Índice de riesgo de residuos (IRR) de plaguicidas sobre el producto vegetal

En la Tabla 11 se puede observar la estimación del riesgo causado por los residuos de plaguicidas sobre el tomate cosechado y a punto de consumo en el departamento de Boyacá y Santander.

Tabla 8. Resultados del IRR para los plaguicidas y agroecosistemas seleccionados.

BOYACÁ - PROVINCIA RICAURTE ALTO								
Agroecosistema	Plaguicida	Dosis (g i,a./ha)	t 1/2 en planta (días)	Carga Plaguicida (C)	Potencial de Concentración (PC)	Potencial de Residuos (PR)	Índice de Riesgo de Residuos (IRR)	Interpretación
Finca 1	Dimetomorf	377	11	7,56E-05	2,52E+03	1,91E-01	2	Bajo
	Metalaxil	251	9,675	1,80E-05	1,01E+03	1,82E-02	1	Muy Bajo
	Metomilo	1701	1,75	4,75E-02	4,85E+01	2,30E+00	3	Medio
Finca 2	Metalaxil	611	10	4,38E-05	1,01E+03	4,43E-02	1	Muy Bajo
	Tiociclam	318	0,25	3,50E-02	6,12E+00	2,14E-01	2	Bajo
Finca 3	Metomilo	600	1,75	2,27E-04	4,85E+01	1,10E-02	1	Muy Bajo
	Tiociclam	625	0,25	4,71E-04	6,12E+00	2,88E-03	<1	Bajísimo
SANTANDER - PROVINCIA GUANENTINA								
Agroecosistema	Plaguicida	Dosis (g i,a./ha)	t 1/2 en planta (días)	Carga Plaguicida (C)	Potencial de Concentración (PC)	Potencial de Residuos (PR)	Índice de Riesgo de Residuos (IRR)	Interpretación
Finca 1	Azoxistrobin	103	45,175	6,44E-05	8,87E+03	5,71E-01	2	Bajo
	Difenoconazol	154	21,25	3,19E-05	2,70E+04	8,61E-01	2	Bajo
	Dimetomorf	200	11	2,10E-04	2,52E+03	5,29E-01	2	Bajo
	Metomilo	133	1,75	1,41E-04	4,85E+01	6,81E-03	<1	Bajísimo
Finca 2	Azoxistrobin	53	45,175	3,45E-05	8,87E+03	3,06E-01	2	Bajo
	Dimetomorf	649	11	7,45E-05	2,52E+03	1,88E-01	2	Bajo
	Metalaxil	173	9,675	2,72E-05	1,01E+03	2,74E-02	1	Muy Bajo
	Metomilo	1081	1,75	1,02E-05	4,85E+01	4,93E-04	<1	Bajísimo
Finca 3	Azoxistrobin	53	45,175	3,31E-05	8,87E+03	2,94E-01	2	Bajo
	Carbendazim	--	--	--	--	--	--	--
	Dimetomorf	543	11	8,61E-06	2,52E+03	2,17E-02	1	Muy Bajo

	Metalaxil	65	9,675	6,67E-06	1,01E+03	6,74E-03	<1	Bajísimo
	Metomilo	579	1,75	2,49E-04	4,85E+01	1,21E-02	1	Muy Bajo
Finca 4	Azoxistrobin	240	45,175	1,50E-04	8,87E+03	1,33E+00	3	Medio
	Carbendazim	195	5,5	3,92E-05	2,87E+02	1,13E-02	1	Muy Bajo
	Carbofuran	10	3,5	1,68E-07	3,81E+02	6,42E-05	<1	Bajísimo
	Difenoconazol	195	21,25	1,06E-05	2,70E+04	2,85E-01	2	Bajo
	Dimetomorf	1667	11	5,45E-04	2,52E+03	1,38E+00	3	Medio
	Metalaxil	450	9,675	6,50E-05	1,01E+03	6,57E-02	1	Muy Bajo

De acuerdo con los resultados arrojados por el modelo IRR, todos los plaguicidas aplicados en los agroecosistemas de Boyacá y Santander, a excepción del azoxistrobin, metomilo y dimetomorf, obtuvieron valores que no representan un riesgo para la salud de los consumidores. Esto se debe principalmente a que dichos plaguicidas presentan valores bajos en el tiempo de vida media en la planta y a que los agricultores respetan los periodos de carencia en el momento de la cosecha del tomate.

Lo anterior resulta ser muy importante, más aun, cuando se sabe que el tomate es uno de los productos de mayor consumo en fresco y es también la hortaliza más importante en el mundo y la de mayor consumo en Colombia (Monsalve *et al.* 2009; Escobar y Lee, 2009). Sin embargo, en el caso de los plaguicidas azoxistrobin, metomilo y dimetomorf, presentan un valor de riesgo medio, catalogado por el modelo IRR como un valor crítico, se puede ver en la Tabla 8, que específicamente para el metomilo y dimetomorf, el factor que incide principalmente en este resultado, es la sobredosificación por parte de los agricultores. En el caso del plaguicida azoxistrobin, un tiempo de vida media en la planta de 45.175 días influye directamente en el aumento del nivel de riesgo al que se encuentran expuestos los consumidores.

Lo anterior muestra el riesgo al que se encuentran expuestos los colombianos al consumir el tomate proveniente de las zonas de estudio, no obstante, Arias *et al.* (2014) mediante un monitoreo del tomate comercializado en la ciudad de Bogotá, determinó que no existe riesgo para los ciudadanos que consumen esta hortaliza producida probablemente en la zona de estudio, igualmente, Ayarza *et al.* (2014) por medio del análisis de muestras de tomate producidas en los ocho agroecosistemas seleccionados (Tabla 2), determinó que tampoco existe un riesgo para la salud de los consumidores, lo anterior puede atribuirse a las variaciones en la rigurosidad y sensibilidad de las diferentes metodologías utilizadas para la estimación del riesgo. De la misma manera, en otra zona de producción de tomate (Caldas-Colombia), Páez *et al.* (2011), determinó que no existe un riesgo en la

salud humana por la presencia de residuos de plaguicidas en el tomate cosechado y resalta la importancia de las BPA en la rentabilidad de los agroecosistemas.

3.2.3. Nivel III y IV

Una vez aplicados todos los requerimientos contenidos en los niveles de evaluación I y II, se evidenció que persiste el riesgo para los plaguicidas metalaxil, carbofuran, metomilo, azoxistrobin, y dimetomorf, de manera que, se deben realizar análisis mucho más rigurosos para lograr una caracterización más profunda y detallada del riesgo. Estos análisis incluyen simulaciones del movimiento de estas moléculas en el laboratorio, integrando características específicas del suelo y de las condiciones climáticas, estudios de toxicidad aguda y crónica sobre organismos que se encuentren en vía de extinción, que sean particulares de la región o que tengan potencial económico (Guaitero, 2010). Dado que los análisis mencionados anteriormente, demandan una inversión económica muy alta y adicionalmente requieren una gran cantidad de tiempo para llevarse a cabo, no se realizaron dentro de la aplicación de la ERA para el presente estudio.

En el nivel IV se realizan pruebas de campo que incluyen características específicas del área de estudio, también se tiene en cuenta la fisiología de los cultivos y modelaciones para el ciclo de vida de los plaguicidas, esto con el fin de aclarar dudas sobre el comportamiento ambiental del plaguicida. Estos análisis tampoco se llevaron a cabo, debido a la alta inversión económica y de tiempo que implican.

3.3. Caracterización del riesgo

En el desarrollo de la ERA, el compartimento ambiental suelo fue uno de los más afectados por la aplicación de plaguicidas, en especial por el ingrediente activo metomilo. Teniendo en cuenta que el suelo es un componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida (Arroyave & Restrepo, 2009), su contaminación incide negativamente sobre el establecimiento y bienestar de las comunidades, como se muestra en Römbke *et al.* (2008). Este problema se acrecienta, al considerar que en Colombia no existe una legislación que regule la cantidad de plaguicidas que pueden estar presentes en un suelo de uso agrícola, permitiendo así, que los agricultores realicen un manejo inadecuado de estos productos y como consecuencia se presente su acumulación en el suelo.

En general, todos los plaguicidas incluidos dentro de la presente ERA presentan un riesgo ambiental significativo para los organismos de los ecosistemas de aguas superficiales, esto se debe principalmente a las características toxicológicas de estas moléculas. Se recomienda realizar más investigaciones como las de Rodríguez (2017) y Sáenz & Rosso (2018), que permitan estimar a profundidad los efectos de estos plaguicidas en los organismos presentes en los diferentes compartimentos ambientales.

De acuerdo los datos arrojados por el modelo GUS, el plaguicida metalaxil y carbofuran representan un riesgo para los cuerpos de agua superficiales que se encuentran cerca a los agroecosistemas en que son aplicados, razón por la cual, es importante realizar estudios de destino ambiental, que permitan evaluar el comportamiento del plaguicida metalaxil y carbofuran en campo. Lo anterior, se ve reforzado con investigaciones como la de Alza *et al.* (2016), en la cual se evidencia la contaminación por carbofuran en cuerpos de agua cercanos a agroecosistemas dedicados a la producción de papa en el departamento de Boyacá.

Una de las debilidades del modelo GUS es que no integra las propiedades físicas y químicas de los suelos de la zona de estudio, siendo este un factor que influye considerablemente en el movimiento y lixiviación de cualquier plaguicida, no obstante, es importante mencionar que la inclusión de estos factores limitaría la aplicación de la ERA, ya que los datos de las características propias de los suelos no siempre están disponibles como información secundaria y su obtención resulta costosa y demorada.

Adicionalmente, según los datos obtenidos del modelo IRR los plaguicidas azoxitrobin, metomilo y dimetomorf, representan un riesgo para la salud de los consumidores, más aún, si se tiene en cuenta que el tomate es una hortaliza que, en la mayoría de las veces, se consume en fresco. En consecuencia, se recomienda realizar un trabajo pedagógico conjunto con los agricultores para que tengan muy en cuenta las recomendaciones técnicas, implementen las buenas prácticas agrícolas (BPA) y eviten la sobredosificación de dichos plaguicidas.

4. Conclusiones

Es importante resaltar que el tomate producido bajo invernadero en el departamento de Boyacá, tiene una probabilidad menor de representar un riesgo para el ambiente y los humanos, en comparación con aquel que se produce a libre exposición en el departamento de Santander. Esto se atribuye principalmente a la menor cantidad de residuos de plaguicidas encontrados en los diferentes compartimentos ambientales

y a un manejo riguroso y tecnificado de los agroecosistemas. Sin embargo, para una de las fincas se evidencia sobredosificación del plaguicida metomilo, lo cual, hace que el producto cosechado presente un riesgo para el consumidor y que no cumpla con las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).

En el desarrollo de la ERA el plaguicida carbofuran debido a sus características ecotoxicológicas, mostró ser un riesgo para la salud de los ecosistemas, en especial para los organismos propios del ecosistema epigeo. Sus propiedades químicas potencian el riesgo para los cuerpos de agua superficiales, esto es importante si se tiene en cuenta que en el departamento de Boyacá la mayoría de invernaderos cuenta con reservorios de agua superficial utilizada para riego. No puede dejarse pasar por alto que, por razones asociadas a las anteriormente expuestas, el plaguicida carbofuran se encuentra prohibido por las autoridades ambientales y agrícolas del país, sin embargo, se evidencia que se sigue comercializando de forma ilegal.

Si bien, la aplicación de plaguicidas está asociada a un riesgo ambiental y a un posible deterioro de las condiciones naturales de los ecosistemas, realizar un manejo de los agroecosistemas bajo las recomendaciones técnicas e implementando constantemente las buenas prácticas agrícolas, disminuyen en gran medida el riesgo al que se encuentran expuestos los organismos propios de cada compartimento ambiental y los humanos. Esto contribuye al establecimiento de un sistema agrícola sostenible, el cual según la FAO y el PNUD, es uno de los impulsores para alcanzar varias de las metas contenidas en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Se recomienda que en investigaciones posteriores se adelanten los estudios contemplados en el nivel III y IV de la Fase 2 de la ERA, con el fin de caracterizar de una manera más rigurosa y detallada, el riesgo al que se encuentran expuestos los compartimentos ambientales y los humanos, es importante que se involucre en dichas investigaciones a las autoridades nacionales competentes como aliados y ayudantes en el establecimiento de los riesgos y las medidas de mitigación.

Finalmente, la ERA aplicada en el presente estudio, constituye una herramienta importante en la estimación del riesgo asociado a la aplicación de plaguicidas y es punto de partida para la toma de decisiones, tales como, la selección de plaguicidas más compatibles con la salud del medio ambiente y la de los humanos, la adopción de medidas de control para evitar la contaminación de uno o varios

compartimentos ambientales, la precisión en los periodos de carencia y la integración de alternativas ecológicas como el manejo integrado de plagas.

5. Referencias

Alza Camacho. W. R. García Colmenares. J. M. & Chaparro Acuña. S. P. (2016). Estimación del riesgo de contaminación de fuentes hídricas de pesticidas (Mancozeb y Carbofuran) en Ventaquemada. Boyacá-Colombia. *Acta Agronómica*. 65(4).

Arias. L. Bojacá. C. Ahumada. D. & Schrevens. E. (2014). Monitoring of pesticide residues in tomato marketed in bogota. colombia. *Food Control*. 35(1). 213-217. doi: 10.1016/j.foodcont.2013.06.046

Arroyave. S. M. S. & Restrepo. F. J. C. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre economico*. 12(23). 13-34.

Aux. B. S. M. Evaluación de residuos de plaguicidas y condiciones fisicoquímicas en aguas de ríos aledaños a sistemas agrícolas en la región del alto ricaurte boyacá -colombia-.

Ayarza Páez, E. A., Arias Rodríguez, L. A., & Bojacá Aldana, C. R. (2014). Evaluación de residuos de plaguicidas en tejidos cuticulares y sub-cuticulares de frutos de tomate y el riesgo asociado a su consumo en Colombia. [recurso electrónico]. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Retrieved from <http://search.ebscohost.com.ezproxy.utadeo.edu.co:2048/login.aspx?direct=true&db=cat00809a&AN=ujtl.325778&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Bastidas. D. A. Guerrero. J. A. & Wyckhuys. K. (2013). Residuos de plaguicidas en cultivos de pasifloras en regiones de alta producción en Colombia. *Revista Colombiana de Química*. 42(2). 39-47.

Boivin. A. & Poulsen. V. (2017). Environmental risk assessment of pesticides: state of the art and prospective improvement from science. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(8). 6889-6894.

Bojacá. C. R. Arias. L. A. Ahumada. D. A. Casilimas. H. A. & Schrevens. E. (2013). Evaluation of pesticide residues in open field and greenhouse tomatoes from Colombia. *Food Control*. 30(2). 400-403.

CAN – Comunidad Andina. 2001. Resolución 532. Manual Técnico Andino para el Registro y Control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola. Secretaría General de la Comunidad Andina. Lima. Perú. 166 p.

Carriquiriborde. P. Mirabella. P. Waichman. A. Solomon. K. Van den Brink. P. & Maund. S. (2014). Aquatic risk assessment of pesticides in latin america. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 10(4). 539-542. doi:10.1002/ieam.1561

Ccancapa. A. Masiá. A. Navarro-Ortega. A. Picó. Y. & Barceló. D. (2016). Pesticides in the Ebro River basin: occurrence and risk assessment. *Environmental pollution*. 211. 414-424.

Cohen. M. A. (2017). Riesgo Ambiental: La aportación de Ulrich Beck. *Acta Sociológica*. 73. 171-194.

Casilimas. H. Arias. L. A. Schrevens. E. Bojacá. C. R. & Gil. R. (2012. November). Modelling the environmental impact of pesticides sprayed on greenhouse tomatoes: a regional case study in Colombia. In IV International Symposium on Models for Plant Growth. Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation- 957 (pp. 61-68).

Dane.gov.co. (2014). El cultivo del tomate de mesa bajo invernadero. tecnología que ofrece mayor producción. calidad e inocuidad del producto. En línea: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/sipsa/insumos_factores_de_produccion_dic_2014.pdf Consulta: Enero de 2018

Díaz. Sonia M. Sánchez. Francisco. Varona. Marcela. Eljach. Victoria. & Muñoz G. Ma. Nathalia. (2017). Niveles de colinesterasa en cultivadores de papa expuestos ocupacionalmente a plaguicidas. Totoró. Cauca. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*. 49(1). 85-92. <https://dx.doi.org/10.18273/revsal.v49n1-2017008>

Dnp.gov.co. (2018). Seguridad Alimentaria y Nutricional. En línea: <https://www.dnp.gov.co/programas/desarrollo-social/pol%C3%ADticas-sociales-transversales/Paginas/seguridad-alimentaria-y-nutricional.aspx> Consulta: Julio de 2018

Escobar. H. Lee. R. (Eds.) 2009. Manual de producción de tomate bajo invernadero. Segunda Edición. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 167 p.

Etchegoyen. M. A. Ronco. A. E. Almada. P. Abelando. M. & Marino. D. J. (2017). Occurrence and fate of pesticides in the Argentine stretch of the Paraguay-Paraná basin. *Environmental monitoring and assessment*. 189(2). 63.

Finizio. A. & Villa. S. (2002). Environmental risk assessment for pesticides: A tool for decision making. *Environmental impact assessment review*. 22(3). 235-248.

Flores-Pacheco. J. A. Mairena. Á. & Espluga. J. (2013). Evaluación de riesgos en sistemas agrícolas asociados a la utilización de plaguicidas en el Municipio de Kukra Hill. Nicaragua. Centroamérica. *Nexo Revista Científica*. 26(1). 34-44.

Garzón Espinosa. C. A. Arias Rodríguez. L. A. & Bojacá Aldana. C. R. (2014). Determinación de residuos de plaguicidas en tejidos foliares y suelos de sistemas productivos de tomate bajo invernadero y libre exposición en Colombia. [recurso electrónico]. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 2014.

Guicherit. R. Bakker. D. J. De Voogt. P. Van Den Berg. F. Van Dijk. H. F. & Van Pul. W. A. J. (1999). Environmental risk assessment for pesticides in the atmosphere; the results of an international workshop. In *Fate of Pesticides in the Atmosphere: Implications for Environmental Risk Assessment* (pp. 5-19). Springer. Dordrecht.

Gustaffson. D.I. 1989. Groundwater Ubiquity Score: A simple method for assessing pesticide leachability *environmental toxicology and Chemistry*. Vol. 8: 339-357.

Harari. R. & Harari. H. (2006). Children's environment and health in Latin America: the Ecuadorian case. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1076(1). 660-677.

Jerez. J. Peralta. J. M.; Tapia. F. Mejías. J. Jerez. A. y Encina. F. 2006. Estudio de metodologías para la evaluación de riesgo ambiental de la aplicación de plaguicidas. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago. Chile. www.sag.gob.cl/pls/portal/url/ITEM/22D806E64B866190E040A8C0100117AB

Li. H. Wei. Y. Lydy. M. J. & You. J. (2014). Inter-compartmental transport of organophosphate and pyrethroid pesticides in South China: implications for a regional risk assessment. *Environmental pollution*. 190. 19-26.

- Mansano. A. Moreira. R. Pierozzi. M. Oliveira. T. Vieira. E. Rocha. O. & Regali-Selegim. M. (2016). Effects of diuron and carbofuran pesticides in their pure and commercial forms on *Paramecium caudatum*: The use of protozoan in ecotoxicology. *Environmental Pollution*. 213. 160-172. doi:10.1016/j.envpol.2015.11.054
- Marrugo-Negrete. J. L. Navarro-Frómata. A. E. & Urango-Cardenas. I. D. (2014). Organochlorine pesticides in soils from the middle and lower Sinú River Basin (Córdoba, Colombia). *Water, Air, & Soil Pollution*. 225(8). 2053.
- Mojica. A. & Guerrero. J. A. (2013). Evaluación del movimiento de plaguicidas hacia la cuenca del lago de tota, Colombia. *Revista Colombiana de Química*. 42(2). 29-38.
- Monsalve. O. Escobar. H. Medina. A. Forero. A. 2009. Estrategias de fertilización limpia y orgánica en la producción de tomate bajo invernadero. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 98 p.
- UN (Naciones Unidas). 2018. Población. En línea: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>. Consulta Julio de 2018.
- Uribe. M. V. Castro. R. A. Paéz. I. Carvajal. N. Barbosa. E. León. L. M. & Díaz. S. M. (2012). Impacto en la salud y el medio ambiente por exposición a plaguicidas e implementación de buenas prácticas agrícolas en el cultivo de tomate. Colombia. 2011. *Revista chilena de salud pública*. 16(2). 96-106.
- Cepal.org. (2018). Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Comisión Económica para América Latina y el Caribe En línea: <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible> Consulta: Noviembre 2017
- Páez, M. I., Uribe, M. V., Díaz, S. M., Castro, R. A., Barbosa, E., Carvajal, N., & Londoño, A. (2011). Evaluación de riesgo en humanos por plaguicidas en tomate cultivado con sistemas tradicional y BPA (Buenas Prácticas Agrícolas). *Revista de Ciencias*, 15, 153-166.
- Pérez. M. A. Navarro. H. & Miranda. E. (2013). Residuos de plaguicidas en hortalizas: problemática y riesgo en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 29. 45-64.
- Plenge-Tellechea. F. Sierra-Fonseca. J. A. & Castillo-Sosa. Y. A. (2007). Riesgos a la salud humana causados por plaguicidas. *Tecnociencia chihuahua*. 1(3). 4-6.

Ramírez, David Horacio, Zuluaga, Adriana Marcela, & Gómez, Evelio de Jesús. (2007). Evaluación Del Riesgo De Contaminación Por Metamidofos En La Microcuenca El Salto Del Municipio De El Santuario, Antioquia. *Revista EIA*, (8), 165-180. Recuperado el septiembre 18, 2018, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200013&lng=en&tlng=en.

Rodríguez. R. F. A. Efecto de plaguicidas sobre *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) y su polinización en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero de la Sabana de Bogotá. Colombia.

Römbke. J. Waichman. A. V. & Garcia. M. V. (2008). Risk assessment of pesticides for soils of the Central Amazon. Brazil: comparing outcomes with temperate and tropical data. *Integrated environmental assessment and management*. 4(1). 94-104.

Ruiz-Toledo. J. Castro. R. Rivero-Pérez. N. Bello-Mendoza. R. & Sánchez. D. (2014). Occurrence of glyphosate in water bodies derived from intensive agriculture in a tropical region of southern Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 93(3). 289-293.

Sáenz Salamanca. M. Y. & Rosso Chocontá. M. (2018). Efecto de cuatro plaguicidas sobre la Nodulación de Trébol Rojo (*Trifolium pratense*) de Santa Sofía (Boyacá).

Santiago. J. 2001. Diagnóstico del uso y manejo de plaguicidas en tres cultivos hortícolas en la Sabana de Bogotá y propuesta de un índice de predicción de residuos de plaguicidas. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. 40 pág.

Solano. H. J. S. & Negrete. J. L. M. (2014). Plaguicidas organoclorados en leche de ganado vacuno de la zona arrocera del hatico. Municipio de Fonseca–La Guajira. *Alimentos Hoy*. 22(33). 81-90.