



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación agroecológica del uso y destino ambiental de plaguicidas en sistemas de producción de tomate de Boyacá y Santander en Colombia

Luis Alejandro Arias Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Doctorado en Agroecología
Bogotá D.C., Colombia
2020

Evaluación agroecológica del uso y destino ambiental de plaguicidas en sistemas de producción de tomate de Boyacá y Santander en Colombia

Luis Alejandro Arias Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Agroecología

Director:

PhD Carlos Ricardo Bojacá Aldana

Codirector:

PhD Heliodoro Arguello Arias

Línea de Investigación:

Agricultura y medio ambiente

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Doctorado en Agroecología

Bogotá D.C., Colombia

2020

Al gestor de nuestros días, al incondicional amor de mis padres Aurora y Gregorio, de mi esposa Alejandra y de mi hermano Enrique.

A mi hijo Santiago, espero que vivas en un mundo con menos riesgos y más alimentos.

Agradecimientos

Doy inicio a estas líneas agradeciendo al Doctor Carlos Ricardo Bojacá Aldana por su dirección, confianza y amistad, al Doctor Heliodoro Arguello Arias por sus consejos y guía. Agradezco también a la Universidad Nacional de Colombia por el proceso de formación brindado desde mi pregrado hasta este doctorado, a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (UJTL) por el apoyo laboral y académico durante este proceso. A su vez, a los profesores Cilia Leonor Fuentes de Piedrahita, Fabio Leiva Barón, Jairo Arturo Guerrero Dallos, Tomas León Sicard, Diego Miranda Laspriella, Guillermo Adolfo León Martínez, Michael Ahrens, Sara María Marquéz Girón y Alvaro Acevedo Osorio por sus aportes, enseñanzas, asesoría, evaluaciones, seminarios o asignaturas.

Agradezco profundamente a los profesionales Alejandra Garzón, Alejandra Ayarza, Angela Brito, Diego Ahumada, Andrea Mojica, Alejandro Serrato, Sandra Aux, Sandra Hermosilla, Yasmin Saenz, Marisol Rosso y Fabian Rodríguez[†], como equipo fundamental para adelantar esta investigación. También a los funcionarios y técnicos del Centro de Bio-Sistemas de la UJTL, en cabeza de Luz Stella Fuentes Quintero. Además, agradezco especialmente a todas y cada una de las personas de la provincia Guanentá (Santander) y la región de Ricaurte Alto (Boyacá) que participaron, aportando su tiempo y saberes. Agradezco a mi familia, por su tiempo, apoyo, paciencia y participación directa en este trabajo, a mi madre Elia Aurora Rodríguez Zambrano, mi padre Gregorio Arias Puig, mi esposa Alejandra Garzón Espinosa y mi hermano Jorge Enrique Arias Rodríguez. Además, a todos los familiares y amigos que estuvieron haciendo parte de una u otra forma en este proceso de formación doctoral, en especial a Rodrigo Gil.

Por último, este trabajo fue financiado por el Consejo Interuniversitario Flamenco (Vlaamse Interuniversitaire Raad - VLIR) a través del proyecto “*Multidisciplinary assessment of efficiency and sustainability of smallholder-based tomato production systems in Colombia, with a roadmap for change*” (Código: ZEIN2009PRE364) ejecutado por la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) y la UJTL, además por el proyecto “*Determinación de residuos de plaguicidas en cuerpos de agua asociados a la producción de tomate en Colombia*”, financiado y ejecutado por la UJTL (Código: 632-11-14), a quienes agradezco los recursos económicos brindados

Resumen

El tomate es una hortaliza de alto consumo a nivel mundial que hace parte de la canasta básica de los colombianos. Los sistemas productivos predominantes son convencionales a campo abierto o bajo invernadero, con manejo fitosanitario basado en plaguicidas de síntesis química. El objetivo del trabajo fue evaluar el uso y destino ambiental de plaguicidas en dos regiones productoras de tomate, con el fin de estimar los riesgos asociados bajo un enfoque agroecológico. Las zonas de estudio fueron regiones de Santander y Boyacá, productoras a campo abierto y bajo invernadero, respectivamente. Mediante 252 encuestas semi-estructuradas se caracterizó cada sistema de producción incluyendo aspectos socioeconómicos y fitosanitarios; por medio de 392 muestras compuestas se determinó el destino ambiental de plaguicidas; se evaluó el riesgo ambiental incluyendo el riesgo ecológico y el riesgo de consumo, este último con 696 muestras de frutos de las regiones de estudio y Bogotá, además se integró la percepción de los actores mediante 134 encuestas semi-estructuradas y se propusieron soluciones alternativas desde la agroecología. Como resultado, se determinó un manejo químico predominante con uso excesivo e inadecuado con 129 principios activos diferentes, principalmente insecticidas y fungicidas. Se detectaron residuos de 22 plaguicidas en frutos, hojas y suelo, siendo comunes en compartimientos y regiones dimetomorf, metomilo y tiociclam, no hubo detecciones en aguas ni sedimentos. Existe riesgo ecológico sobre especies terrestres y acuáticas, afectando servicios ecosistémicos. También se evidenció riesgo en la salud humana por ingesta de tomate con carbofuran, indoxacarb, difenoconazol y hexaconazol. Se superaron los Límites Máximos de Residuos-LMR en frutos. Los actores no perciben claramente el riesgo generado y su exposición. Este estudio bajo la perspectiva agroecológica vislumbró el panorama general de contaminación y riesgo ambiental por plaguicidas en sistemas productivos convencionales de tomate, proponiendo un proceso de disminución de su uso y conversión hacia sistemas de producción agroecológicos.

Palabras clave: agroecosistema, evaluación de riesgo, percepción, sostenibilidad.

Abstract

Worldwide tomato is a high consumption vegetable, as part of Colombians staple food. The predominant productive systems are conventionals in open field or greenhouse, with pest management based on chemical pesticides. The main goal of this work was to evaluate the use and environmental fate of pesticides in two tomato producing regions, in order to estimate the associated risks under an agroecological approach. The study areas were some regions of Santander and Boyacá, open field and greenhouse producers, respectively. Each production system was characterized included socioeconomic and pest management aspects, through 252 semi-structured surveys. The environmental fate of pesticides was determined, through 392 composite samples. An Environmental Risk Assessment was implemented, including ecological risk and consumption risk, the latter, with 692 tomato samples from the study regions and Bogotá; also, the perception of the actors was integrated in the analysis through 134 semi-structured surveys in order to propose solutions from agroecology. As a result, a predominant chemical pest management was determined with excessive and inadequate use of 129 different active components, mainly insecticides and fungicides. Residues of 22 pesticides were detected in fruits, leaves and soil. Dimetomorph, methomyl and thiocyclam pesticides were common in compartments and regions. There is an ecological risk on terrestrial and aquatic species, affecting ecosystem services. There is also a risk to human health due to tomato intake of carbofuran, indoxacarb, difenoconazole and hexaconazole. Maximum Residues Limits-MRLs were exceeded in fruits. The risk generated and their exposures are not clearly perceived by the actors. This study under agroecological perspective glimpsed the big picture of contamination and environmental risk by pesticides in conventional tomato production systems, proposing a process to reduce their use and conversion to agroecological production systems.

Keywords: agroecosystem, risk assessment, perception, sustainability.

Contenido

Resumen y abstract.....	V
Lista de figuras.....	VIII
Lista de gráficas.....	VIII
Lista de tablas.....	IX
Introducción.....	1
1 Capítulo: Caracterización de sistemas de producción de tomate y uso de plaguicidas en regiones de Santander y Boyacá.....	5
1.1 Introducción	5
1.2 Metodología	7
1.3 Resultados.....	9
1.4 Discusión	27
1.5 Conclusiones	31
2 Capítulo: Destino ambiental de plaguicidas en regiones productoras de tomate de Santander y Boyacá.....	33
2.1 Introducción	33
2.2 Metodología	35
2.3 Resultados.....	43
2.4 Discusión	56
2.5 Conclusiones	61
3 Capítulo: Evaluación de Riesgo Ambiental asociado a los agroecosistemas de tomate y su consumo	64
3.1 Introducción	64
3.2 Metodología	66
3.3 Resultados.....	73
3.4 Discusión	83
3.5 Conclusiones	88
4 Capítulo: Percepción de actores en los territorios sobre aspectos del uso de plaguicidas y propuesta de transición agroecológica	89
4.1 Introducción	89
4.2 Metodología	91
4.3 Resultados.....	93
4.4 Discusión	114
4.5 Conclusiones	119
5 Conclusiones generales y recomendaciones.....	121
5.1 Conclusiones generales.....	121
5.2 Recomendaciones	124

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de la evaluación del uso y destino ambiental de plaguicidas en sistemas de producción de tomate en Boyacá y Santander, bajo una perspectiva agroecológico.....	5
Figura 1-1. Diagrama de flujo del sistema de producción de tomate a campo abierto en la provincia Guantentá (Santander).....	21
Figura 1-2. Diagrama de flujo del sistema de producción de tomate bajo invernadero en Ricaurte Alto (Boyacá).....	22
Figura 2-1. Mapa de los puntos de muestreo de material vegetal, suelos, aguas y sedimentos en las regiones de estudio.....	39
Figura 3-1. Esquema de la Evaluación de Riesgo Ambiental para sistemas de producción de tomate.....	57
Figura 4-1. Esquema interpretativo del uso de plaguicidas en sistemas de producción convencionales de tomate a campo abierto (Santander) y bajo invernadero (Boyacá).....	103
Figura 4-2. Propuesta del proceso de conversión agroecológica de sistemas de producción convencionales de tomate a campo abierto (Santander) y bajo invernadero (Boyacá).....	104

Lista de gráficas

Gráfica 1-1. Contribución de las variables al ACP para los sistemas de producción de tomate y regiones: campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá).....	23
Gráfica 1-2. Agrupaciones generales de las fincas para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá), mediante el ACP.....	24
Gráfica 1-3. ACP para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.....	25
Gráfica 1-4. ACP para los sistemas de producción de tomate bajo invernadero (Boyacá), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.....	26
Gráfica 1-5. ACP para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.....	27
Gráfica 1-6. Agrupaciones de fincas para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.....	27
Gráfica 3-1. Efecto de plaguicidas sobre polinización de <i>A. mellifera</i> en plantas de tomate, representado en la cantidad de granos de polen.....	79

Gráfica 4-1. Comparación entre plaguicidas mencionados (%) en las encuestas de percepción de las regiones de estudio de Boyacá y Santander en 2017.....	96
Gráfica 4-2. Comparación entre plaguicidas mencionados (%) en las encuestas de las regiones de estudio de Boyacá y Santander en 2010 y 2017.....	99
Gráfica 4-3. Percepción sobre el destino ambiental de plaguicidas (%) y el riesgo sobre estos mismos compartimientos (%) por parte de los actores encuestados.....	101

Lista de tablas

Tabla 1-1. Generalidades de las regiones de estudio y proporción de las encuestas iniciales.....	9
Tabla 1-2. Factores socioeconómicos y de producción de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.....	10
Tabla 1-3. Factores de producción de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.....	13
Tabla 1-4. Productos reportados utilizados para el manejo fitosanitario en las regiones de estudio.....	15
Tabla 2-1. Plaguicidas analizados en laboratorio en frutos, hojas y suelo.....	41
Tabla 2-2. Residuos de plaguicidas en muestras de frutos de tomate provenientes de las regiones de estudio en el muestreo de 2011.....	44
Tabla 2-3. Residuos de plaguicidas en muestras de frutos de tomate provenientes de las regiones de estudio en el muestreo de 2013.....	45
Tabla 2-4. Residuos de plaguicidas en muestras de cáscara y pulpa de frutos provenientes de regiones de estudio en el muestreo de 2013.....	46
Tabla 2-5. Número de muestras con múltiples residuos de plaguicidas en muestras de frutos provenientes de regiones de estudio en el muestreo de 2013.....	46
Tabla 2-6. Residuos de plaguicidas en muestras de hojas de plantas de tomate provenientes de las regiones de estudio.....	47
Tabla 2-7. Residuos de plaguicidas en muestras de suelo provenientes de las regiones de estudio.....	48
Tabla 2-8. Promedios de los parámetros evaluados en muestras de agua y sedimento en corrientes de agua de la provincia Guanetá.....	49
Tabla 2-9. Promedios de los parámetros evaluados en muestras de agua y sedimento en corrientes de agua de la región de Ricaurte Alto.....	50

Tabla 2-10. Presencia (+) y ausencia (-) de residuos de plaguicidas detectados en frutos, hojas, suelos, agua y sedimento en regiones productoras de tomate de Santander y Boyacá.....	52
Tabla 2-11. Propiedades físico-químicas de los plaguicidas detectados en las regiones de estudio y su afinidad.....	53
Tabla 2-12. Exceso de aplicaciones y compartimientos con residuos de plaguicidas.....	55
Tabla 3-1. Fincas donde se implementó la ERA, con los plaguicidas aplicados y detectados en diferentes compartimientos ambientales.....	67
Tabla 3-2. Pertinencia de la ERA para las fincas seleccionadas en las regiones de estudio.....	73
Tabla 3-3. Aspectos físico-químicos, características residuales, toxicológicas y ecotoxicológicas de los plaguicidas objeto de la ERA.....	74
Tabla 3-4. Comparación de RQ con los LOC para las fincas pertinentes de la ERA.....	75
Tabla 3-5. Valores de los indicadores del modelo RECAP y su nivel de riesgo.....	76
Tabla 3-6. Valores de los indicadores obtenidos para el modelo GUS.....	77
Tabla 3-7. Valores obtenidos para el modelo IRR y su nivel de riesgo.....	77
Tabla 3-8. Efecto de plaguicidas sobre el número de granos de polen, número de semillas, y mortalidad de <i>A. mellifera</i> , relacionados con la polinización de tomate.....	79
Tabla 3-9. Efecto de plaguicidas en el número y diámetro de nódulos radicales de <i>T. pratense</i> provenientes de agroecosistemas de tomate.....	80
Tabla 3-10. Efecto de plaguicidas sobre el peso fresco, peso seco y porcentaje medio de humedad de nódulos radicales de <i>T. pratense</i> en tomate.....	80
Tabla 3-11. Riesgo agudo y crónico en salud humana debido al promedio de ingesta diaria de plaguicidas debido al consumo de tomate, muestreo 2011.....	81
Tabla 3-12. Riesgo agudo y crónico en salud humana debido al promedio de ingesta diaria de plaguicidas debido al consumo de tomate, muestreo 2013.....	82
Tabla 3-13. Riesgo agudo y crónico en salud humana debido al promedio de ingesta diaria de plaguicidas debido al consumo de tomate, muestreo en Bogotá.....	82
Tabla 4-1. Aspectos poblacionales y de manejo fitosanitario de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.....	93
Tabla 4-2. Aspectos de uso de plaguicidas de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.....	96
Tabla 4-3. Plaguicidas y otros insumos mencionados en las encuestas de percepción de 2017 en los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.....	97
Tabla 4-4. Prácticas de manejo propuestas para la conversión y rediseño de sistemas de producción de tomate convencionales en relación con los principios agroecológicos.....	112

Introducción general

La agroecología existe como un concepto explícito desde la década de 1930 y se desarrolló durante el siglo XX como la aplicación de conceptos ecológicos y sociales a las prácticas agrícolas, con el objetivo principal de reducir el uso de productos químicos y el impacto de la agricultura sobre el ambiente (Altieri, 1999). A través de la visión de los sistemas agrícolas como ecosistemas, la agroecología combina la ecología, la agronomía y las ciencias humanas con un enfoque de integración de la gestión agrícola (Wezel et al., 2009; Vaarst et al., 2017).

Actualmente, la agroecología es reconocida como un movimiento, una práctica y una disciplina científica; la evolución de las interpretaciones y definiciones están relacionadas con las diferencias en el desarrollo histórico de la agroecología en diferentes regiones del mundo (Altieri, 2002; Altieri & Nicholls, 2012; Silici, 2014; Tiftonell, 2014; Gliessman, 2015; Wezel et al., 2009). Como movimiento, se relaciona con principios sociales y ambientalistas debido a los impactos de las sustancias tóxicas, especialmente plaguicidas, sobre el ambiente y luchas sociales centradas en el acceso a la tierra y reconocimiento del patrimonio cultural principalmente de indígenas y campesinos. La creación de movimientos sociales se intensificó con la llegada de la “Revolución Verde”, cuando la agricultura convencional se centró en la producción, utilizando prácticas dependientes de insumos externos que anulan procesos ecológicos que sustentan los ecosistemas sostenibles (Zhang et al., 2007).

Como práctica, tomó realce en la década de 1980 como un conjunto de actividades que permiten estudiar y proyectar la sostenibilidad en la agricultura, mediante la investigación en tres escalas: (1) parcela y campo, (2) fincas y agroecosistemas, y (3) sistema alimentario (Wezel et al., 2009; Wezel et al., 2014). Como disciplina científica, se ha enfocado en el sistema alimentario, como red mundial de producción, distribución y consumo (Gliessman, 2015). En esta perspectiva, la producción y consumidores son vistos como partes activamente conectadas del sistema.

Según algunos autores, esto implica una definición amplia de la agroecología como la ecología de los sistemas alimentarios, un enfoque integral de la agricultura, basado en la aplicación de la ecología para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles, y que tiene como objetivo vincular la ecología, la cultura, la economía y la sociedad para mantener la producción agrícola y entornos saludables (Altieri, 1999; Francis et al., 2003; Gliessman, 2015). En este sentido, en el presente trabajo se aborda una problemática recurrente derivada de la agricultura convencional moderna, como es el uso excesivo e inadecuado de Plaguicidas de Síntesis Química (PSQ), que tiene efectos sobre las diferentes dimensiones del sistema alimentario: (1) sobre la dimensión ecológica en relación con la agrobiodiversidad y servicios ecosistémicos de los agroecosistemas; (2) sobre la dimensión sociocultural y política, en relación con la seguridad alimentaria, las condiciones de mercado, la sociedad y la normatividad nacional e internacional, como transición a una soberanía alimentaria. Los efectos de estos plaguicidas, también se manifiestan en diferentes escalas: parcela, agroecosistema, región, distribución y consumo. Siendo éste, un panorama que justifica un análisis para la conversión y rediseño de sistemas agrícolas convencionales hacia sistemas agroecológicos.

No obstante lo anterior, el abordaje de esta problemática en Colombia carece de esta perspectiva de evaluación, y en este sentido, asumiendo la importancia en la agroecología de las dimensiones y escalas de los sistemas alimentarios, en este trabajo, se desarrolló un estudio desde la perspectiva agroecológica del uso y destino ambiental de plaguicidas para sistemas de producción de tomate en los Departamentos de Boyacá y Santander, Colombia, en el marco de la línea de investigación en agricultura y medio ambiente. Esta evaluación incluyó: (1) una visión sistémica, abordando diferentes componentes e interacciones desde la finca hasta el consumidor; (2) el uso de diferentes criterios e indicadores relacionados con aspectos de manejo fitosanitario y ambientales; (3) el escalamiento del estudio a niveles de finca, local y regional; (4) un análisis interdisciplinario entendiendo las complejidades de las dimensiones ecológica y sociocultural de la problemática, y en este sentido integrar el conocimiento al sistema alimentario al cual pertenece el tomate como alimento básico en la dieta de los colombianos.

Para el abordaje del estudio, se implementaron metodologías científicas rigurosas de encuestas socioeconómicas, muestreo en campo, análisis de laboratorio, diseño experimental, modelado, análisis de riesgo, y seguimientos técnicos bajo un enfoque participativo; haciendo uso de conceptos de ecología, biología, agronomía, limnología, química analítica, química ambiental, toxicología, ecotoxicología, estadística y sociología, como característica fundamental de interdisciplinaredad en la investigación agroecológica. Para este fin, se estudió el sistema de producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en Colombia desde una visión integral, siendo este un cultivo modelo para este análisis, por su alto consumo a nivel mundial, variedad de sistemas de producción y regiones productoras, además del intensivo uso de PSQ, bajo las condiciones biofísicas y socioeconómicas propias del trópico altoandino.

El tomate es la hortaliza más importante en el mundo después de la papa y la de mayor consumo en Colombia (Dorais et al., 2008; Monsalve et al., 2009). Su producción se basa en dos sistemas: a campo abierto y bajo invernadero (Escobar & Lee, 2009; Bojacá et al., 2013). Estos sistemas productivos se caracterizan por pertenecer a pequeños productores carentes de tecnología y asistencia técnica. Uno de los factores más limitantes en la producción de tomate es el ataque de plagas y enfermedades. La actividad predominante para su manejo es el uso de PSQ, utilizándose diversos ingredientes activos con diferente destino ambiental bien sea al suelo, aire, agua o al medio biótico. Estos productos pueden afectar los ecosistemas y la salud humana desde su aplicación en el cultivo, en poscosecha y consumo debido a la presencia de residuos de moléculas tóxicas. Es entonces una problemática que integra el sistema alimentario desde de la finca hasta el consumidor final.

El proceso de investigación se realizó entre los años 2010 a 2018 y se estructuró en cuatro grandes fases complementarias, cada fase corresponde a cada uno de los capítulos del presente documento, que contemplaron las diferentes dimensiones y escalas del problema bajo una visión sistémica. En este sentido, la *Fase I* tuvo el objetivo de identificar los patrones de manejo fitosanitario más empleados en la producción convencional de tomate, bajo dos sistemas de cultivo: a campo abierto y bajo invernadero, en la provincia Guanentá (Santander) y la región del Ricaurte Alto (Boyacá), respectivamente.

Para este análisis, se caracterizaron sistemas producción de tomate de las dos regiones productoras, mediante información secundaria y primaria, además, se adelantaron encuestas semiestructuradas y seguimientos técnicos con participación de agricultores de las zonas de estudio, se hizo énfasis en el manejo fitosanitario del cultivo para determinar las características principales de uso de plaguicidas por parte de las comunidades locales.

Una vez caracterizados los sistemas productivos de tomate en las dos regiones, la *Fase II* tuvo el objetivo de determinar residuos de plaguicidas en diferentes compartimentos ambientales de la provincia Guantán y región de Ricaurte Alto. Lo anterior se logró mediante el diseño e implementación de muestreos a escala de finca, local y regional, de manera específica se obtuvo muestras de suelo, material vegetal y frutos en las fincas productoras, así como en agua y sedimentos de ríos aledaños a los agroecosistemas de tomate, con el fin de verificar el destino ambiental de plaguicidas, mediante análisis específicos de laboratorio.

Teniendo en cuenta la información derivada de la caracterización de las fincas, así como de los plaguicidas más frecuentes en los compartimentos ambientales, e información secundaria, la *Fase III* tuvo el objetivo de estimar el riesgo ecológico y sobre la salud humana por consumo de tomate. En este sentido, se hizo uso de metodologías basadas en Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA), que implica la evaluación de riesgo ecológico y evaluación de riesgo en la salud humana por consumo, mediante modelos matemáticos, sumado a bioensayos específicos sobre especies como abejas (*Apis mellifera*) y trébol rojo (*Trifolium pratense*). Este esquema metodológico permitió integrar la información de las dimensiones y escalas evaluadas de manera objetiva.

Finalmente, la *Fase IV* tuvo como objetivo valorar la percepción de los productores de tomate de las regiones de estudio acerca del uso, destino ambiental y riesgo de plaguicidas, así como el planteamiento de una propuesta de transición agroecológica. De esta manera, se acudió a instrumentos de evaluación de percepción sobre plaguicidas, complementados con la percepción del riesgo, aplicados a diferentes actores de las regiones de estudio vinculados a esta problemática, abarcando así una visión integral.

A su vez, con el panorama de la evaluación completa, se plantearon procesos hacia la conversión y rediseño de los sistemas agrícolas convencionales de tomate hacia sistemas agroecológicos, teniendo en cuenta las diferentes fases del trabajo. En la figura 1, se representa un esquema general de la presente evaluación bajo la perspectiva agroecológica.

Por último, teniendo en cuenta que en Colombia los aspectos relacionados con el uso y destino ambiental de plaguicidas han sido abordados desde escenarios puntuales de manejo del cultivo y poscosecha sin integrarse aún estudios bajo una mirada holística, se evidencia una brecha del conocimiento en esta problemática específica, y en términos generales, el objetivo del presente trabajo consistió en evaluar el uso y destino ambiental de PSQ asociados a sistemas de producción de tomate colombianos, con el fin de estimar los riesgos relacionados a estos territorios bajo una perspectiva agroecológica.

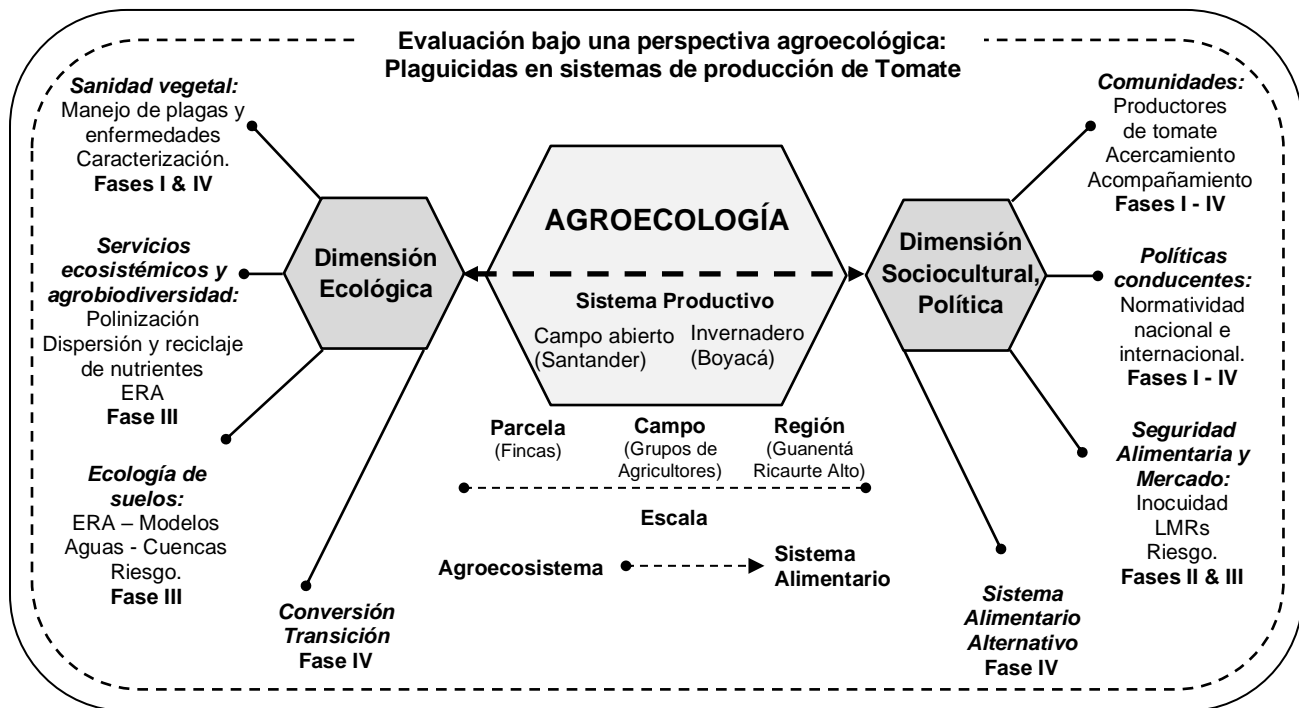


Figura 1. Esquema de la evaluación del uso y destino ambiental de plaguicidas en sistemas de producción de tomate en Boyacá y Santander, bajo una perspectiva agroecológica. Basado en Nicholls y Altieri (2013).

1 Capítulo: Caracterización de sistemas de producción de tomate y uso de plaguicidas en regiones de Santander y Boyacá

1.1 Introducción

El tomate (*S. lycopersicum*) es una de las hortalizas de mayor importancia a nivel mundial debido a su área cultivada y su alto nivel de consumo (Jaramillo et al., 2006; Kimura & Sinha, 2008). Según información de la FAO (2017) se produce en 177 países en el mundo, siendo los principales productores China (59'626.900 ton año⁻¹), India, Turquía, Estados Unidos, Egipto, Irán, Italia, España, México y Brasil, quienes contribuyen con cerca del 81% de la producción mundial, Colombia se encuentra en la posición 30 con un estimado de 714.314 ton año⁻¹, siendo el 0,3 % de la producción total (FAOSTAT, 2017).

Según datos oficiales, en 2017 el área cultivada de tomate en Colombia fue de 9.959,6 ha, los principales departamentos productores fueron Antioquia, Santander, Norte de Santander, Cundinamarca, Valle del Cauca, Huila y Boyacá (Agronet, 2019). Típicamente, se encuentran dos sistemas productivos locales, uno a campo abierto con variedades tipo "Chonto" en altitudes inferiores a los 1.500 msnm y otro bajo invernadero con variedades tipo "Larga vida" en altitudes entre los 1.000 - 2.000 msnm (Escobar & Lee, 2009, Bojacá et al., 2013). Para el año 2017, el área cultivada a campo abierto fue de 7.283,1 ha, con rendimiento de 25,2 ton ha⁻¹ y bajo invernadero 2.676,5 ha con rendimiento de 95,7 ton ha⁻¹ (Agronet, 2019).

Los problemas fitosanitarios más relevantes en el cultivo de tomate son los artrópodos plaga: mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*), cogollero y minador de hoja (*Tuta absoluta*), pasador del fruto (*Neoleucinodes elegantalis*) y minadores (*Liriomza* spp.); por

otra parte, las enfermedades producidas por hongos como *Botrytis cinerea*, *Phytophthora infestans* y *Oidium* spp (Escobar & Lee, 2009). Para el manejo de estos problemas, se implementan medidas con bajos niveles tecnológicos, siendo el uso de PSQ el más frecuente, utilizando diferentes ingredientes activos de diversos grupos químicos (Bojacá et al., 2012, Arias et al., 2014). En menor medida, se ha implementado control biológico y uso de productos de origen botánico para este manejo.

Los plaguicidas son moléculas de síntesis química destinadas a prevenir, destruir, atraer, repeler o combatir cualquier plaga, incluyendo vectores de enfermedades humanas o animales, las especies no deseadas de plantas o animales que afectan la producción, almacenamiento, transporte, distribución y elaboración de alimentos, productos agrícolas o alimentos para animales (FAO/WHO, 2019). Estos se diferencian según sus características moleculares en grupos químicos, entre los plaguicidas más utilizados se encuentran los Carbamatos, Organofosforados, Organoclorados y Piretroides, que son sustancias químicas de baja tolerancia para el ambiente y el ser humano (El-Shahawi, 1997; Ramírez & Lacasaña, 2001; Cárdenas et al., 2010).

En agricultura, el uso de productos de síntesis química con fines fitosanitarios, se ha incrementado en los últimos años, debido al aumento de la demanda de alimentos y de la población (Zhang et al., 2011). Según su blanco biológico, los más utilizados son los herbicidas, seguidos por insecticidas y fungicidas (EPA, 2011). En Colombia ha aumentado su registro, según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), en 1974 se registraban 770 productos, pasando a 1.370 en el 2003, siendo el 80% grupos químicos Carbamatos y Organofosforados (Cárdenas et al., 2010). Actualmente, están registrados 3.219 productos PSQ, producidos y/o comercializados por 488 empresas registradas ante el ICA (ICA, 2019).

Los plaguicidas pueden disminuir las pérdidas de productividad (Cooper & Dobson, 2007; Aktar et al., 2009; Fenik et al., 2011), y su uso inadecuado puede generar efectos adversos para el ambiente y la salud humana. Es por esto, que teniendo en cuenta el uso frecuente de estos plaguicidas en la producción de tomate, se debe tomar como punto de partida la caracterización del manejo fitosanitario del cultivo, y en este sentido, el objetivo de este primer capítulo fue identificar los patrones de manejo fitosanitario más empleados en la producción convencional de tomate, bajo dos sistemas de cultivo: a campo abierto y

bajo invernadero, con participación de los productores de dos regiones de estudio, ubicadas en los departamentos de Santander y Boyacá en Colombia.

1.2 Metodología

El área de estudio comprendió dos regiones contrastantes respecto a la producción convencional de tomate en Colombia. Por un lado, se seleccionó el departamento de Santander siendo el segundo departamento productor de tomate a campo abierto, con 1.016,7 ha reportadas en 2017 (Agronet, 2019), dentro de este se abarcó la provincia Guanentá a la cual pertenecen, entre otros, los municipios de Curití, Mogotes, Páramo, Pinchote, San Gil y Valle de San José, donde se produce principalmente café (*Coffea arabica*) y caña panelera (*Saccharum officinale*) (Gil et al., 2019), además de tomate a campo abierto. En contraste se seleccionó el departamento de Boyacá, con 253,0 ha de tomate bajo invernadero reportadas en 2017 (Agronet, 2019), abarcando la región del Ricaurte Alto, conformada, entre otros, por los municipios de Sáchica, Santa Sofía, Sutamarchán, Ráquira, Tinjacá, y Villa de Leyva, destacándose como la región de mayor producción de tomate bajo invernadero en ese departamento.

En las dos regiones se realizaron encuestas semi-estructuradas y seguimientos a fincas, en el marco del proyecto “*Multidisciplinary assessment of efficiency and sustainability of smallholder-based tomato production systems in Colombia, with a roadmap for change*” financiado por el Consejo Interuniversitario Flamenco (Vlaamse Interuniversitaire Raad - VLIR) (Código: ZEIN2009PRE364) y ejecutado por la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) y la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Colombia) en 2010. Mediante información secundaria, se realizó la descripción de las condiciones físicas (clima, suelos, relieve) de los agroecosistemas de las dos regiones de estudio, así como de otras características complementarias de cada sistema de producción. Con esta información se establecieron los componentes, interacciones, entradas, salidas y límites de los dos sistemas de producción, plasmándolos en esquemas bajo un enfoque sistémico.

En total se realizaron 80 encuestas en los sistemas de campo abierto y 172 en los sistemas bajo invernadero. Estas encuestas se realizaron al azar mediante visitas directas en cada finca productora de tomate, se colectaron datos generales y de cultivo,

correspondientes a infraestructura y aspectos socioeconómicos. Respecto al manejo del cultivo se tuvo en cuenta las variables: altitud de la finca (msnm), área cultivada (m^2), número de tallos por planta, número de frutos por planta, número de ciclos al año, duración del ciclo (días), número de plantas, densidad (plantas m^{-2}), producción (t.), productividad ($t\ ha^{-1}$), rendimiento por planta ($t\ ha^{-1}$), preparación del suelo ($h\ ha^{-1}$), volumen de riego ($l\ m^{-2}$). En cuanto a aspectos socioeconómicos las variables fueron: propietario, experiencia (Años), educación (Nivel), labores ($h\ m^{-2}$), labores desempeñadas por hombres ($h\ m^{-2}$), labores desempeñadas por mujeres ($h\ m^{-2}$), tipo de financiación del cultivo, otros cultivos. Por último, las variables de manejo fitosanitario fueron: uso de elementos de protección para plaguicidas, asistencia técnica, capacitación, número, tipo y dosis de plaguicidas, número y tipo de aplicaciones de plaguicidas, número y tipo de plagas, rotación de cultivos.

Posterior a la aplicación de las encuestas iniciales, se realizaron seguimientos en fincas productoras de tomate seleccionadas entre 2011 y 2013, desde la preparación del suelo hasta la cosecha. Estas correspondieron a 10 fincas con producción a campo abierto y 9 bajo invernadero, teniendo en cuenta sus ciclos de cultivo, donde se acompañó a los agricultores durante 32 ciclos de producción a campo abierto y 39 bajo invernadero. Los datos colectados iniciales incluyeron área cultivada, densidad y aspectos de infraestructura, durante el seguimiento, se realizaron cuestionarios a los productores sobre aspectos enfocados en el manejo del cultivo como: esquemas de riego, labores, tipos y dosis de plaguicidas, así como la producción final.

El análisis estadístico correspondió a un análisis descriptivo, con medidas de tendencia central tales como el promedio o la mediana, para las variables consideradas, así como la frecuencia. También, se calculó el coeficiente de variación (CV) para las variables continuas, para cuantificar la incertidumbre, dado que es independiente de las unidades, permite comparar el grado de dispersión entre las variables evaluadas en los dos sistemas de producción. Además, se realizaron análisis multivariados, mediante análisis de componentes principales (ACP), para explorar posibles tendencias y relaciones entre las variables. Inicialmente, se implementó un ACP a escala general del estudio con 27 variables para las 252 encuestas. Posteriormente, se llevaron a cabo tres ACP adicionales a escala regional, cada uno con 10 variables focalizadas al uso de plaguicidas, el primero se llevó a cabo sobre las 80 encuestas de Santander y el segundo

sobre las 172 encuestas de Boyacá y un tercero integrado. Todos los procesos estadísticos se realizaron mediante el software estadístico R (R Core Team, 2017).

1.3 Resultados

Caracterización mediante el análisis de encuestas y seguimientos.

La Provincia Guanentá es una de las siete provincias del departamento de Santander y está constituida por 18 Municipios (Pinzón, 2007); en fincas productoras de tomate a campo abierto de seis de estos municipios, se llevaron a cabo las encuestas semiestructuradas y seguimientos en razón a la concentración de los cultivos (Tabla 1-1). Por su parte, la Provincia de Ricaurte es una de las 15 provincias del departamento de Boyacá, constituida por 13 Municipios, a su vez, está dividida en dos regiones: Ricaurte Bajo con seis municipios y Ricaurte Alto con siete municipios; en este caso, en fincas productoras de tomate bajo invernadero de cinco municipios de la región de Ricaurte Alto, se implementaron las encuestas y seguimientos, según la distribución de cultivos bajo invernadero (Tabla 1-1).

Tabla 1-1. Generalidades de las regiones de estudio y proporción de las encuestas iniciales.

Provincia Guanentá (Santander)					
Municipio	Superficie* (Km²)	Población rural* (No. de habitantes)	Proporción rural (%)	Veredas* (No.)	Encuestas** (%) n = 80
Curití	247,0	8.479	70,3	39	14,0
Mogotes	487,0	6.550	63,1	29	1,0
Páramo	73,2	2.906	67,7	11	67,0
Pinchote	53,8	3.680	70,8	10	2,0
San Gil	149,5	13.921	25,5	31	8,0
Valle de San José	99,0	2.728	58,4	13	8,0
Región Ricaurte Alto (Boyacá)					
Municipio	Superficie* (Km²)	Población rural* (No. de habitantes)	Proporción rural (%)	Veredas* (No.)	Encuestas** (%) n = 172
Sáchica	62,4	1.916	50,5	6	11,0
Santa Sofía	78,0	1.983	73,3	10	33,1
Sutamarchán	102,0	4.564	77,1	9	18,6
Tinjacá	79,3	2.580	85,0	10	5,8
Villa de Leyva	128,0	8.672	46,6	12	33,7

*Censo Poblacional 2018 - Departamento Administrativo de Estadística (DANE) y Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de cada Municipio. **Proporción de encuestas por municipio N = 252.

Las regiones estudiadas cuentan con una proporción de población rural promedio del 59,3% para la Provincia Guanentá y del 66,5% para la región de Ricaurte Alto, denotando la vocación agrícola de estas comunidades. Es así como, se realizaron las encuestas y seguimientos con productores de tomate de manera individual, algunos de ellos pertenecientes a organizaciones locales; específicamente, en Boyacá a la Asociación de Productores Agropecuarios de Roa (ASOROA) de Sutamarchan, la Asociación de Tomateros de Santa Sofía o la Asociación de Productores del Distrito de Riego el Espinal de Sáchica. En Santander, algunos productores pertenecían a grupos convocados por el Centro Agroturístico del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) Regional Santander en San Gil. En la tabla 1-2, se presentan una comparación de los resultados de algunos factores que se tuvieron en cuenta en el marco de las encuestas implementadas, para la caracterización de los sistemas de producción de las dos regiones de estudio.

Tabla 1-2. Factores socioeconómicos y de producción de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio (Porcentajes y promedios). Resultados tabulados del total de encuestas, N = 252.

Factor socioeconómico (Unidades)	Campo abierto (Santander) n = 80	Invernadero (Boyacá) n = 172
<i>Proporción de género (%)</i>		
Mujeres	48,6	40,4
Hombres	51,4	59,6
<i>Rango de edad (Años)</i>	19 - 75	18 - 70
<i>Nivel de educación formal (%)</i>		
Ninguno	10,1	9,3
Primaria	50,6	45,4
Bachillerato	32,2	32,5
Técnico	4,7	2,9
Profesional	2,4	9,9
<i>Propietarios (%)</i>	77,5	69,1
<i>Experiencia en tomate (Años)</i>	3,9	5,4
<i>Cultiva tomate durante todo el año (%)</i>	36,2	99,0
<i>Cultiva en sociedad (%)</i>	13,7	30,9
<i>Mano de obra contratada (h m⁻²)</i>		
Mujeres	0,01	0,23
Hombres	0,3	0,55
<i>Mano de obra familiar (h m⁻²)</i>		
Mujeres	0,012	0,09
Hombres	0,098	0,26
<i>Capacitación manejo del cultivo (%)</i>	46,2	70,9
<i>Fuente de capacitación (%)</i>		
Casas comerciales	89,1	63,4
Universidades	5,4	0,6
Asistencia técnica particular	No	7,0
Entidades gubernamentales	< 5	No
<i>Comercialización en fresco (%)</i>	100,0	100,0
<i>Clasificación en la finca – poscosecha (%)</i>	91,2	61,0
<i>Piensa continuar produciendo tomate (%)</i>	90,3	98,1

Factor de producción (Unidades)	Campo abierto (Santander) n = 80	Invernadero (Boyacá) n =172
<i>Preparación del terreno (%)</i>		
Tractor	77,5	73,2
Manual	22,5	22,0
<i>Acolchados (%)</i>	No	2,4
<i>Riego (%)</i>	77,5	100
<i>Distribución del agua (%)</i>		
Gravedad	61,2	27,3
Bombas	38,8	72,7
<i>Sistema de riego (%)</i>		
Aspersión	58,7	No
Manual	18,8	No
Goteo y cintas	< 2	100
<i>Fuente de plántulas (%)</i>		
Semillero externo	92,5	97,7
Semillero propio	7,5	2,3
Reserva de semilla	5,0	No
<i>Rotación del cultivo (%)</i>		
Rotación	58,7	No
Cultivos asociados	10,0	No
<i>Podas (%)</i>		
Deshoje	<10	100
Frutos	No	21,5
<i>Tallos por planta</i>	5,8	1,0
<i>Frutos por racimo</i>	5,05	6,5

En las dos regiones, los productores son quienes toman las decisiones de manejo sobre los sistemas productivos, no es común la asistencia técnica específica. En general, cultivan tomate por su rentabilidad y en menor medida por aspectos como la experiencia e interés. Además, prefieren trabajar con fondos propios y en general consideran que el área cultivada en la región tiende a mantenerse constante a futuro (Tabla 1-2).

Las fincas de los sistemas productivos de tomate de Santander, se ubicaron en altitudes entre 1.000 a 1.930 msnm, en pendientes bajas (>11,01%) en el 71,2% de los predios. Los cultivos más comunes reportados fueron café (*C. arabica*), pimentón (*Capsicum annum*), lulo (*Solanum quitoense*), caña de azúcar (*S. officinarum*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y papaya (*Carica papaya*), se destacan dos especies de solanáceas, con plagas y enfermedades comunes al tomate. En cuanto a los sistemas productivos de Boyaca, las fincas se ubicaron en altitudes entre 2.000 a 2.675 msnm, el 59,3% y 36,0% de los predios estaban ubicados en pendientes bajas y medias, respectivamente. El tomate es el cultivo principal de la región seguido de cebolla (*Allium cepa*), maíz (*Zea mays*) y arveja (*Pisum sativum*).

Además de las formas de preparación del terreno presentadas en la tabla 1-2, en Boyacá también se hace uso de motocultor y tracción animal (<2%). En general, el 98,2% de los

productores transplanta directamente en suelo, y solamente tres fincas bajo invernadero producen en sistema hidropónico. Respecto a los acolchados, quienes lo realizan (cuatro fincas), utilizan plástico o residuos de origen vegetal (tamo o aserrín). El agua utilizada para el riego proviene de las lluvias, ríos y quebradas tributarios de la cuenca del río Fonce en la provincia Guanentá y de la cuenca del río Moniquirá en la región del Ricaurte Alto, además, en las dos regiones se acumula agua en reservorios.

Las variedades de tomate cultivadas más comunes a campo abierto son en orden descendente: Tayson (63,7%), Invictus, Yenn, Torrano, Mariana, Motoso, Sandocan, Tinto y Miramar. Mientras, las variedades cultivadas bajo invernadero más comunes son en orden descendente: Ichiban F1 (24,4%), Sofía, Sheila, Pietro, Indaba, Granitio, Fortuna, Shakira, Calima, Delos, B52, Bachue, Baron, Bravona, Marimba, Platino, Santa Clara, Torrano, Victoria y 4090. Según los seguimientos, a campo abierto, la primera cosecha se obtiene en promedio en la semana 10,3 con duración de 6,3 semanas, con rotación; por su parte, bajo invernadero, se mantiene una producción escalonada permanente, sin rotación, con promedio de 10,2 racimos por planta durante el ciclo.

Respecto a las preferencias de capacitación, en Santander prefieren a las casas comerciales (36,2%), las universidades (30%) y entidades gubernamentales (2%). Por su parte, en Boyacá prefieren la capacitación por parte de casas comerciales (41,3%), asistentes técnicos privados (15,1%), universidades (12,8%), asociaciones (1,7%), colegas (1,1%) y entidades gubernamentales (1,7%), mientras el 25,6% no manifiestan ninguna preferencia. A su vez, el 91,2% de los encuestados en Santander y el 36,6% en Boyacá, coinciden en que uno de los temas que preferiría para la capacitación es sobre manejo fitosanitario del cultivo y plaguicidas. En las dos regiones, la mano de obra es tanto familiar como contratada, la mayor cantidad de labores es realizada por hombres que por mujeres (Tabla 1-2) y se registró mano de obra familiar por parte de menores de edad, se destaca que en Boyacá hay mayor participación laboral de mujeres.

En cuanto a la poscosecha, en las dos regiones la totalidad de la producción se comercializa en fresco en canastillas sin tratamientos específicos. En los sistemas productivos de la provincia Guanentá la comercialización es principalmente hacia la misma región (55%), seguido por Bogotá (27,5%), Bucaramanga (15%) y Boyacá (2,5%). En los sistemas productivos de Ricaurte Alto, el 8,1% de los productores usan empaques

adicionales a las canastillas; la distribución del tomate es principalmente hacia supermercados y centrales de abastos (97,6%) y cadenas de supermercados (2,3%), de Tunja y Bogotá.

De forma particular, para los sistemas de agricultura protegida, la infraestructura es fundamental y en este sentido, el 98,4% de los invernaderos cuenta con ventilación natural en techos y paredes, la altura bajo la canal en la fachada de los invernaderos es en promedio de 3,0 m y se construyen en promedio cinco naves por finca. El material predominante para la estructura del invernadero es madera (94,0% de las fincas), y en menor medida metal (6%). Al interior, los postes de tutorado son en madera y se usa en promedio 108,6 Kg de guaya por finca, y 506,1 Kg de otras fibras (60,5% de algodón y 39,5% de polipropileno) para la conducción de la planta (Colgado), por su crecimiento indeterminado. Para la financiación, en su mayoría cuentan con créditos con bancos para infraestructura de invernaderos principalmente. A su vez, en este sistema, el 9,9% de los encuestados han parado de producir debido a problemas económicos, sanitarios, de infraestructura, carencia de agua, bajos precios o migración a otro cultivo, pero continuaron en su mayoría porque consideran que es un buen negocio, no tenían alternativa o para dar uso a la infraestructura.

Estas condiciones diferenciales descritas previamente en el manejo del cultivo llevan a tener variaciones en aspectos propios del tamaño de las áreas cultivadas, producción, ciclo de cultivo, productividad, manejo del agua y tiempo de ejecución de las distintas labores, en este sentido en la tabla 1-3, se presentan estos factores discriminados para las dos regiones producto de los seguimientos específicos realizados en las fincas.

Tabla 1-3. Factores de producción de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.

Factor de producción	Campo abierto (Santander)			Invernadero (Boyacá)		
	Media	Mediana	CV	Media	Mediana	CV
Area cultivada (m ²)	5.248,8	4.000	82,9	2.614,1	2.475	42,4
Densidad de plantas (plantas m ⁻²)	1,3	1,2	29,2	3,0	3,1	17,6
Duración del ciclo (días)	115,5	112,0	10,7	173,6	168,0	13,4
Ciclos (Año)	1,4	1	39,4	1,7	2,0	22,3
Productividad (t ha ⁻¹)	43,6	35,9	57,5	122,4	114,4	45,0
Riego (l m ⁻²)	464,3	237,5	136,9	603,2	495,2	65,0
Labores (h m ⁻²)	0,43	0,37	57,3	1,1	1,0	57,3

De esta manera, se evidencia que el área cultivada es mayor en la producción a campo abierto, siendo casi el doble que bajo invernadero, sin embargo, con la mitad de área aspectos como la densidad de plantas, ciclo de cultivo, ciclos por año y productividad son superiores en la producción bajo invernadero. El uso del agua ($l\ m^{-2}$) es mayor en la producción bajo invernadero, dado el confinamiento y aumento de la densidad de siembra, además, la mano de obra ($h\ m^{-2}$) se duplica, debido a la intensificación de este sistema de producción; lo cual es compensado en aspectos como una mayor productividad por unidad de área, que implica un uso eficiente del suelo y optimización de recursos, existiendo mayor variabilidad en general en Santander.

Aspectos fitosanitarios

Mediante los seguimientos en las fincas, se determinó que en la producción a campo abierto de la provincia Guantán, los principales agentes biológicos reportados relacionados con problemas fitosanitarios son goma (*P. infestans*) (35,5%), pasador del fruto (*N. elegantalis*) (19,4%), mosca blanca (*Bemisia tabaci*) (16,5%), *Alternaria* sp. (13,5%), minador (*Lyriomiza* sp.) (10,1%), Virus (1,4%), Ácaros (1%), *Fusarium* sp. (0,8%), *Spodoptera* sp (0,6%), *Phytium* sp. (0,4%), *Botrytis* sp. (0,2%), Grillos (0,2%), Nemátodos (0,2%), Trips (0,2%), siendo la mitad causantes de enfermedades y la otra mitad actuando como plagas.

Por su parte, en la producción bajo invernadero de la región de Ricaurte Alto, los principales agentes biológicos reportados fueron mosca blanca de los invernaderos (*T. vaporariorum*) (31,5%), gusano cogollero (*Spodoptera* sp.) (22,1%), *Phytoptora* sp. (16,7%), mildew polvoso (*Oidium* sp) (16,3%), *B. cinerea* (8,8%), *Alternaria solani* (1,0%), minador de la hoja (*T. absoluta*) (0,9%), *Fusarium* sp. (0,6%), *Phytium* sp. (0,6%), bacterias (0,4%), *Rhizoctonia solani* (0,3%), miriapodos (0,2%), trozadores (0,2%), virus (0,1%), nemátodos (0,1%), *Ralstonia solanacearum* (0,1%), ácaros (0,1%), siendo el 64,5% causantes de enfermedades y el 35,3% plagas.

Para el manejo de estos problemas fitosanitarios, se usa una amplia gama de productos de diferente origen en las dos regiones de estudio, de esta manera, en la tabla 1-4 se consignan los 121 principios activos reportados entre las encuestas y los seguimientos realizados, teniendo en cuenta su origen, grupo, tipo, categoría toxicológica y registro legal para la producción de tomate a nivel nacional e internacional.

Tabla 1-4. Productos reportados utilizados para el manejo fitosanitario en las regiones de estudio.

Grupo	Ingrediente activo / Especie	Tipo	Origen	Cat.	Reg.*	Reporte
Acetamida	Cimoxanilo	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Bs
Ácido Tetrónico	Spiromesifen	In	Sq	III	Si	Bs
Acilalaninas	Metalaxilo	Fu	Sq	II	Si	Se/Ss/Be
Agente Biológico	<i>Bacillus thuringiensis</i>	In	Bio	III	Si	Be
Agente Biológico	<i>Beauveria bassiana</i>	In	Bio	III	Si	Be/Bs
Agente Biológico	<i>Burkholderia Cepacia</i>	Fu	Bio	III	No	Be/Bs
Agente Biológico	<i>Metarhizium anisopliae</i>	In	Bio	IV	Si	Be
Agente Biológico	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	Ne	Bio	III	No	Bs
Agente Biológico	<i>Trichoderma harzianum</i>	Fu	Bio	III	Si	Be
Agente Biológico	<i>Trichoderma lignorum</i>	Fu	Bio	III	Si	Be/Bs
Alcohol etoxilado	Alquil Aril Polieter Alcohol	Cy	Sq	IV	Si	Bs
Alcohol etoxilado	Aril Polietilenglicol Eter	Cy	Sq	IV	Si	Bs
Alcohol etoxilado	Nonil Fenol Etoxilado	Cy	Sq	IV	Si	Bs
Aldehidos	Metaldehido	Mo	Sq	III	No	Be
Aminoglucósidos	Gentamicina	Ba	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Amonio Cuaternario	N-Alquil/Dimetil/Bencil/Amonio	Fu/Ba	Sq	IV	Si	Ss
Anilino pirimidina	Pirimetanil	Fu	Sq	III	Si	Be/Bs
Antibiótico	Kasugamicina	Fu/Ba	Sq	III	Si*	Se/Ss/Be/Bs
Antibiótico	Oxitetraciclina	Ba	Sq	III	Si*	Ss
Antibiótico	Validamicina	Fu	Sq	IV	No*	Ss/Be/Bs
Avermectina	Abamectina	Ac	Sq	II	Si	Se/Be/Bs
Avermectina	Benzoato Emamectina	In	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Benzimidazol	Benomil	Fu	Sq	III	Si*	Ss/Be/Bs
Benzimidazol	Carbendazim	Fu	Sq	III	Si*	Ss/Be/Bs
Benzimidazol	Metil thiofanato	Fu	Sq	II	No	Be
Benzimidazol	Tiabendazol	Fu	Sq	III	No	Se/Ss/Be/Bs
Benzoilurea	Diflubenzuron	In	Sq	II	Si	Ss
Benzoilurea	Lufenuron	In	Sq	III	Si	Ss/Be/Bs
Benzoilurea	Novaluron	In	Sq	II	Si*	Ss
Benzonitrilo	Clortalonil	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Betaglucanos	Aminoácidos	Ir	Sq	-	Si	Ss
Bipiridilo	Paraquat	He	Sq	I	Si*	Ss/Bs
Carbamato	Carbofuran	In	Sq	I	No*	Se/Ss/Be
Carbamato	Carbosulfan	In	Sq	I	No*	Ss/Be
Carbamato	Metiram	Fu	Sq	III	Si	Ss/Bs
Carbamato	Metomilo	In	Sq	I	No	Se/Ss/Be/Bs
Carbamato	Propamocarb	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Carbamato	Propineb	Fu	Sq	III	Si*	Se/Ss/Be/Bs
Carbamato	Tiodicarb	In	Sq	II	No*	Ss
Carboxamida	Boscalid	Fu	Sq	III	Si	Bs
Carboxamida	Carboxina	Fu	Sq	III	No	Se/Ss/Be/Bs
Carboxamida	Furametpir	Fu	Sq	II	No	Be
Ciclohexanodiona	Cletodin	He	Sq	III	Si	Bs
Citratos Reguladores	Citratos Reguladores de pH	Cy	Sq	IV	Si	Bs
Cloronicotinilico	Acetamiprid	In	Sq	II	Si	Se/Be/Bs
Copolimero	Polieter	Cy	Sq	IV	Si	Bs
Diamida	Flubendiamide	In	Sq	III	Si	Ss/Be/Bs
Diamida Antranílica	Clorantraniliprol	In	Sq	III	Si	Se/Ss
Dicarboxamida	Iprodione	Fu	Sq	II	Si*	Be/Bs
Dicarboxamida	Procimidona	Fu	Sq	II	No*	Be/Bs
Ditiocarbamato	Mancozeb	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Espinosinas	Spinetoram	In	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Espinosinas	Spinosad	In	Sq	III	Si	Be/Bs
Estrobilurinas	Azoxistrobin	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Bs
Estrobilurinas	Trifloxistrobin	Fu	Sq	III	Si	Bs
Extracto vegetal	Ajo-Ají / Capsaicina	In	Bot	IV	Si	Se/Ss/Be
Extracto vegetal	<i>Azadirachta indica</i>	In	Bot	III	No	Bs
Extracto vegetal	<i>Lonchocarpus utilis</i> / Rotenona	In	Bot	-	No	Be

Fenil éter	Piriproxifen	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Fenil Pirazoles	Fipronil	In	Sq	II	Si*	Ss
Fosfanatos	Fosfitos de Potasio	Ir	Min	-	No	Be/Bs
Fosfonoglicina	Glifosato	He	Sq	III	No	Ss
Ftalimida	Captan	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Ftalimida	Folpet	Fu	Sq	II	No	Se/Be
Guanidina	Iminoctadine	Fu	Sq	III	Si*	Bs
Halógeno	Yodo	Fu/Ba	Sq	III	Si	Be/Bs
Imidazol	Fenamidona	Fu	Sq	III	Si*	Be/Bs
Inorgánico	Azufre	Fu	Min	III	Si	Se/Be/Bs
Inorgánico	Azufre+Cal Agrícola	Fu	Min	III	Si	Be
Inorgánico	Hidroxido cúprico	Fu	Sq	III	Si	Bs
Inorgánico	Hipoclorito de Ca	Fu/Ba	Sq	I	No	Be
Inorgánico	Oxicloruro de Cu	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be
Inorgánico	Sulfato Cu Pentahidratado	Fu	Sq	III	Si	Bs
Inorgánico	Sulfato Cupríco	Fu	Sq	III	Si	Be
Lactonas Macroclícas	Milbemectina	Ac	Sq	II	No	Bs
Mandelamidas	Mandipropamida	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Monoterpenoide	Geraniol	In	Bot	-	No	Bs
Morfolinas	Dimetomorf	Fu	Sq	III	Si	Ss/Se/Be/Bs
Neonicotinoide	Clotianidina	In	Sq	III	No*	Be/Bs
Neonicotinoide	Imidacloprid	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Neonicotinoide	Tiacloprid	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Neonicotinoide	Tiametoxam	In	Sq	III	Si*	Se/Ss/Be/Bs
Nereistoxinas	Cartap	In	Sq	III	No*	Bs
Nereistoxinas	Tiociclám hidrogenoxalato	In	Sq	II	Si*	Se/Ss/Be/Bs
Orgánico	Ceniza+Jabon	In	Cul	-	Na	Be
Organofosforado	Acefato	In	Sq	III	Si*	Ss/Be/Bs
Organofosforado	Clorpirifos	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Organofosforado	Dimetoato	In	Sq	II	No*	Se/Ss/Be
Organofosforado	Fosetil Aluminio	Fu/Ba	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Organofosforado	Malathion	In	Sq	III	Si	Be
Organofosforado	Metamidofos	In	Sq	IA	No*	Se/Ss/Be/Bs
Organofosforado	Profenofos	In	Sq	II	No*	Se/Ss/Be
Oxadiacinas	Indoxacarb	In	Sq	II	No	Se/Ss/Be/Bs
Oxazoles	Famoxadona	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss
Piperazinas	Triforina	Fu	Sq	IV	No*	Ss/Be/Bs
Piretroide	Alfacipermetrina	In	Sq	III	Si	Bs
Piretroide	Beta Cipermetrina	In	Sq	II	Si*	Bs
Piretroide	Bifentrina	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Piretroide	Cipermetrina	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Piretroide	Deltametrina	In	Sq	II	No	Ss/Be
Piretroide	Gamma Cialotrina	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Bs
Piretroide	Lambda Cialotrina	In	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Piretroide	Permetrina	In	Sq	III	No*	Se/Ss/Be/Bs
Pirimidina	Fenarimol	Fu	Sq	IV	No*	Be/Bs
Pirroles	Clorfenapir	In	Sq	II	Si*	Be/Bs
Sulfamida	Diclofluanid	Fu	Sq	III	No*	Be
Sulfito éster	Propargite	Ac	Sq	III	No*	Be
Tiadiazinas	Buprofezin	In	Sq	III	No	Be/Bs
Tiourea	Diafentiuron	In	Sq	III	No*	Be/Bs
Triazina	Ciromazina	In	Sq	II	Si	Ss/Be/Bs
Triazina	Metribuzina	He	Sq	III	Si	Bs
Triazoles	Difenoconazol	Fu	Sq	II	Si	Se/Ss/Be/Bs
Triazoles	Epoxiconazol	Fu	Sq	III	No	Be/Bs
Triazoles	Flusilazol	Fu	Sq	II	Si*	Be
Triazoles	Flutriafol	Fu	Sq	III	Si	Be/Bs
Triazoles	Hexaconazol	Fu	Sq	III	No*	Be/Bs
Triazoles	Miclobutanil	Fu	Sq	III	Si	Se/Ss/Be/Bs
Triazoles	Penconazol	Fu	Sq	III	No	Be/Bs
Triazoles	Tebuconazol	Fu	Sq	III	Si	Ss/Be/Bs

Triazoles	Tetraconazol	Fu	Sq	II	No	Be/Bs
Triazoles	Triadimenol	Fu	Sq	III	Si	Be/Bs

Grupo: químico u otro, **Tipo:** Acaricida (Ac), Bactericida (Ba), Coadyuvante (Cy), Fungicida (Fu), Herbicida (He), Inductor de resistencia (Ir), Insecticida (In), Molusquicida (Mo). **Origen:** Biológico (Bio), Botánico (Bot), Mineral (Min), Síntesis química (Sq), **Cat.:** Categoría Toxicológica OMS, **Reg.:** Registro ICA para Tomate (Registros Nacionales 2010/2019), * No aprobado por CEE Regulación 1107/2009 (91/414) European Commission EU Pesticide Database. **Reporte:** Santander encuesta (Se), Santander seguimiento (Ss), Boyacá encuesta (Be), Boyacá seguimiento (Bs).

De manera específica en la producción a campo abierto, se reportaron principalmente productos de síntesis química (97,0%), de origen botánico (1,5%), y origen mineral (1,5%). De estos, según el tipo de blanco biológico fueron insecticidas (32 ingredientes activos – i.a.), fungicidas (24 i.a.), fungicidas/bactericidas (3 i.a.), bactericidas (2 i.a.), herbicidas (2 i.a.), acaricida (1 i.a.) e inductor de resistencia (1 i.a.) (Tabla 2), su método de aplicación es 99,7% foliar y 0,3% en “drench”. Respecto a los principios activos específicos, se reportaron 65 distribuidos en 36 grupos diferentes, siendo los grupos más frecuentes de origen químico: Carbamatos (7 i.a.), Organofosforados (6 i.a.) y Piretroides (6 i.a.), con categorías toxicológicas I y IA (5 i.a.), II (23 i.a.), III (32 i.a.), IV (4 i.a.) (Tabla 1-4).

De los 65 productos reportados, 49 cuentan con Registro ICA para tomate, es decir 16 se estarían aplicando de manera irregular frente a la legislación agrícola colombiana, respecto a la legislación internacional, usando como referente la normatividad de la Unión Europea (CEE); seleccionada dado que es la que cuenta con mayor información accesible a nivel mundial; 45 i.a. están aprobados según la regulación CEE, es decir 20 i.a. se están usando en Colombia que restringirían el mercado internacional. Se resalta además, el conflicto de normas nacionales e internacionales, toda vez que 11 i.a. cuentan con registro ICA, pero no son aprobados en la CEE (Tabla 1-4).

Teniendo en cuenta los seguimientos en las fincas a campo abierto, se pudo identificar 10 i.a. adicionales a los reportados en la encuesta, uno de estos paraquat, que cuenta con categoría toxicológica I (Tabla 1-4), además se resalta que en promedio se aplica 816,4% menos cantidad de i.a. respecto a las dosis reportadas en las encuestas y verificadas en los seguimientos para los i.a. comunes reportados. Por último, los ingredientes activos más frecuentes aplicados en los sistemas a campo abierto de la provincia Guantentá, corresponden a tres insecticidas, dos fungicidas y un fungicida/bactericida y en orden de frecuencia son: tiametoxam, mancozeb, piriproxifen,

metomilo, dimetomorf y fosetil aluminio, uno de estos sin registro ICA para tomate, y uno está prohibido por la CEE (Tabla 1-4).

Respecto a la producción bajo invernadero, los productos más comunes según su origen fueron de síntesis química (86,5%), seguidos por los de origen biológico (6,3%), botánico (3,6%), mineral (2,7%), y orgánico (0,9%). Según el blanco biológico fueron en orden fungicidas (48 i.a.), insecticidas (44 i.a.), coadyuvantes (5 i.a.), fungicidas/bactericidas (4 i.a.), acaricidas (3 i.a.), herbicidas (3 i.a.), bactericida (1 i.a.), molusquicida (1 i.a.), nematocida (1 i.a.) e inductor de resistencia (1 i.a.). El método de aplicación fue 95,9% foliar, 3,3% en “drench”, 0,5% directo al suelo y 0,3% mediante fertirrigación. En total, se reportaron 111 principios activos de 52 grupos diferentes, siendo los grupos más frecuentes: Triazoles (10 i.a.), Piretorides (8 i.a.), Organofosforados (7 i.a.), Inorgánicos (7 i.a.), Agentes de control biológico (7 spp.) y Carbamatos (6 i.a.), distribuidos en categorías toxicológicas I y IA (6 i.a.), II (28 i.a.), III (63 i.a.), IV (10 i.a.) (Tabla 1-4). Entre los 111 productos reportados, 73 tienen Registro ICA para tomate, es decir 38 se estarían aplicando de manera irregular; respecto a la legislación internacional (CEE) 80 i.a. están aprobados, en este sentido 31 i.a. se están usando con efectos restrictivos a la exportación. Se resalta también, el conflicto de normas nacionales e internacionales, dado que 14 i.a. tienen registro ICA, pero no por la CEE (Tabla 1-4).

Con la información de los seguimientos en las fincas bajo invernadero, se pudo identificar 22 i.a. adicionales a los reportados en la encuesta, uno de estos paraquat (Tabla 1-4). Al igual que en el caso de la producción a campo abierto, es de restaltar que en promedio se aplica 1.005,9% menos cantidad de i.a. respecto a las dosis reportadas en las encuestas y verificadas en los seguimientos. Esta situación, común en los dos sistemas de producción, indica que los análisis de riesgo de plaguicidas calculados a partir exclusivamente de encuestas son sobreestimados, esto se abordará en el capítulo 3 del presente documento. Adicionalmente, los ingredientes activos más frecuentes aplicados en los sistemas a bajo invernadero de la región de Ricaurte Alto, corresponden a cinco insecticidas y un fungicida, en orden: tiociclam hidrogenoxalato (En adelante: tiociclam), imidacloprid, metomilo, propineb, indoxacarb y clorfenapir, dos de estos sin registro ICA para tomate y tres prohibidos por la CEE (Tabla 1-4).

Como medidas de manejo fitosanitario adicionales en la producción de Ricaurte Alto, el 25% utilizan algún tipo de malla en los laterales del invernadero, como las antipulgón por ejemplo. A su vez, el 87,8% de los operarios hace uso de implementos de protección para plaguicidas, principalmente el 79% de los operarios usan máscara y overol y el 5,8% lo complementa con guantes; mientras en la provincia Guanentá, el uso de implementos específicos para protección personal no fue reportado, solamente ropa de trabajo que usan exclusivamente para las aplicaciones. Por último, se destaca en las dos regiones el programa Campo Limpio sobre disposición de envases y empaques de plaguicidas, con puntos de recolección en las veredas, que ha sido acogido por más del 96% de los productores en las dos regiones, dado que ha sido vinculado a políticas locales.

Características del medio físico de los sistemas productivos a campo abierto y bajo invernadero

Clima: el departamento Santander se localiza en la zona nororiental del país, donde las actividades agrícolas se desarrollan en una serie de valles, colinas y montañas. Dentro de este departamento se destaca la provincia Guanentá por su producción de tomate (Bojacá et al., 2013), ésta presenta un relieve estructural, generando abundantes microclimas y cambios climáticos en cortas distancias, donde predomina el clima húmedo premontano, en general con temperatura media de 22°C, precipitaciones entre 1.600 y 2.500 mm año⁻¹ y humedad relativa del 50% (Martínez et al., 2012; Solano et al., 2012). De forma detallada, el área de estudio en la provincia Guanentá cuenta con una precipitación promedio de 2.457 ± 125 mm en un régimen bimodal de lluvias, con una intensa época seca entre los meses de diciembre-febrero y una moderada entre junio-agosto, con una oferta hídrica suficiente la mayor parte del año. La temperatura promedio anual es de 18,9 ± 1,0 °C y la diaria entre 19,5 y 22,8 °C, con máximas de 23,6 °C. Por otra parte, la humedad relativa es en promedio de 81 ± 2,0 %, y la radiación solar de 16,45 ± 1,07 MJ m⁻² d⁻¹ (Gil et al., 2019).

En cuanto al departamento de Boyacá, está situado en la zona central del país, allí se encuentra la región del Ricaurte Alto, siendo la de mayor producción de tomate bajo invernadero de Colombia (Bojacá et al., 2013). En esta región predomina el clima húmedo premontano, con temperatura media de 21°C y precipitación entre 1.800 y 2.400 mm año⁻¹. Además, incluye zonas en vía de desertificación, las cuales se caracterizan por el clima seco, vegetación con predominio de xerofíticas, el paisaje intensivamente

erosionado y la disminución de los recursos hídricos superficiales (Cortés, 2004). Datos climáticos específicos del área de estudio, reportan precipitaciones promedio de 1.112 ± 78 mm en un régimen bimodal de lluvias, con épocas secas entre los meses de diciembre-febrero y junio-agosto, con oferta hídrica suficiente para el cultivo los demás meses del año. En promedio, la temperatura anual de la región es de $16,5 \pm 1,1$ °C y diaria entre $19,5$ y $22,8$ °C, con máximas de $23,6$ °C. A su vez, la humedad relativa es en promedio de $75 \pm 2,5$ %, y la radiación solar de $15,52 \pm 1,12$ MJ m⁻² d⁻¹ (Gil et al., 2019).

Suelo: en la provincia Guanentá, las áreas de producción agrícola, se desarrollan principalmente bajo un modelado del relieve denudativo, en unidades geomorfológicas como pendientes y colinas, con presencia característica de rocas sedimentarias arenosas, arcillosas y calcáreas, que dan origen a suelos con bajos niveles de arcillas y presencia de areniscas, con alturas de 1.000 a 2.100 msnm (Ramírez, 2010; Martínez et al., 2012). En promedio, las fincas productoras se ubican en pendientes del 2,10%, y los suelos son de texturas generalmente francas, conformados en promedio por 44,86% de arena, 17,66% de arcilla y 37,48% de limo; respecto a propiedades químicas promedio del suelo, el pH es de 5,09, el Carbono orgánico del 2,10%, y los contenidos de Nitrógeno (N-NO₃), Fósforo (P₂O₅) y Potasio (K₂O) de 5,13, 15,22 y 158,05 mg Kg⁻¹, respectivamente (Gil et al., 2019).

Por su parte, la región del Ricaurte Alto, se encuentra localizada la asociación Leyva, en zonas de relieve ondulado y colinado, a una altura aproximada de 2.200 a 2.600 msnm. Se presentan suelos superficiales a moderadamente profundos. Adicionalmente presentan perfiles con horizontes A y AC (Municipio de Villa de Leyva, 2004). El desarrollo del perfil de tipo A-C, significa que no existe una diferenciación marcada de horizontes. La asociación Santa Sofía presenta un relieve inclinado fuertemente quebrado donde el material parental está compuesto por lutitas y algunas areniscas. Adicionalmente estos suelos presentan erosión de surcos, de grado ligero a moderado, pedregosidad superficial e influencia coluvial (Naizaque, 2008). En esta zona, se presentan suelos desarrollados a partir de arcillas, localizados en el cuerpo de los abanicos, o en áreas moderadamente erosionadas de las aldeas transicionales entre el clima frío húmedo al seco (Naizaque, 2008). En general, las fincas productoras se ubican en pendientes del 5,87%, y los suelos con texturas franco arcillosas, están conformados por 27,53% de arena, 28,75% de arcilla y 43,55% de limo; con propiedades químicas

promedio de pH de 5,93, Carbono orgánico del 1,90%, y contenidos de Nitrógeno (N-NO₃), Fósforo (P₂O₅) y Potasio (K₂O) de 4,44; 71,27 y 219,10 mg Kg⁻¹, respectivamente (Gil et al., 2019).

Descripción de los sistemas de producción de tomate a campo abierto y bajo invernadero

Los sistemas productivos de tomate a campo abierto dependen plenamente de los factores ambientales. Generalmente, el semillero es externo a la finca, la infraestructura utilizada comprende el esquema de tutorado de la planta, sumado al uso de sistemas de riego. En el manejo del suelo es común el uso de correctivos como la Cal, y en el manejo fitosanitario se destaca el uso de plaguicidas, además, se realiza rotación de cultivos. En el esquema explicativo, basado en una representación sistémica de ciclo de vida, se representan los límites del sistema desde las materias primas utilizadas hasta la finca, así como los diferentes subsistemas involucrados (Figura 1-1).

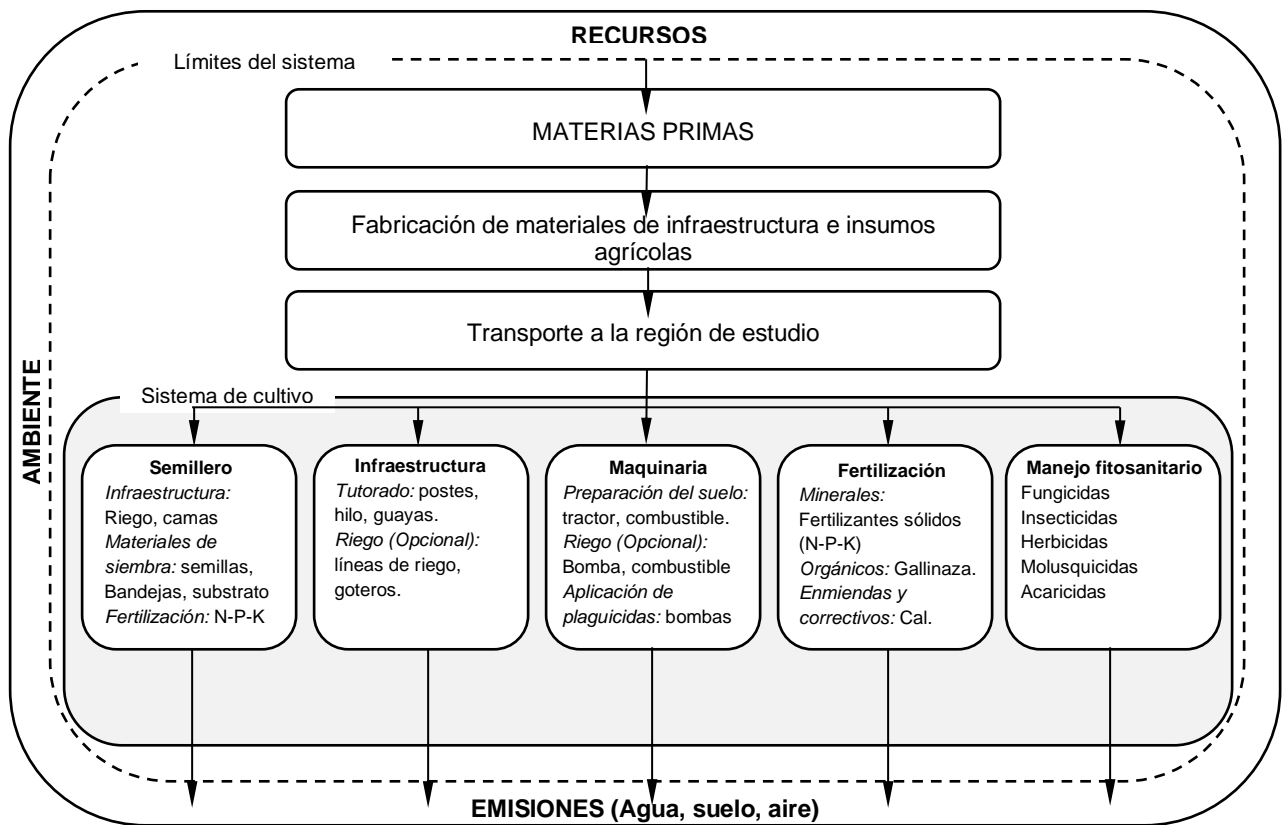


Figura 1-1. Diagrama de flujo del sistema de producción de tomate a campo abierto en la provincia Guantentá (Santander). Basado en Bojacá et al. (2014).

A su vez, los componentes básicos de los sistemas productivos bajo invernadero, son descritos en la figura 1-2, se destaca el establecimiento de estructuras con cubiertas plásticas, que implican el aislamiento del cultivo, con influencia regulada de las condiciones ambientales. Las plántulas provienen en su mayoría de empresas de la región dedicadas a este fin, a su vez, la infraestructura se refleja en el invernadero, así como sistemas de tutorado y riego, para el manejo de la nutrición vegetal es común el uso de fertirriego, y en el manejo fitosanitario se basa en el uso de plaguicidas. En el esquema sistémico, con límites desde las materias primas hasta la finca, incluye los diferentes subsistemas, destacando el manejo de residuos que se realiza para el semillero y la infraestructura (Figura 1-2). Las emisiones de residuos de plaguicidas del subsistema de manejo fitosanitario, tanto a campo abierto como bajo invernadero, serán objeto de análisis en el siguiente capítulo.

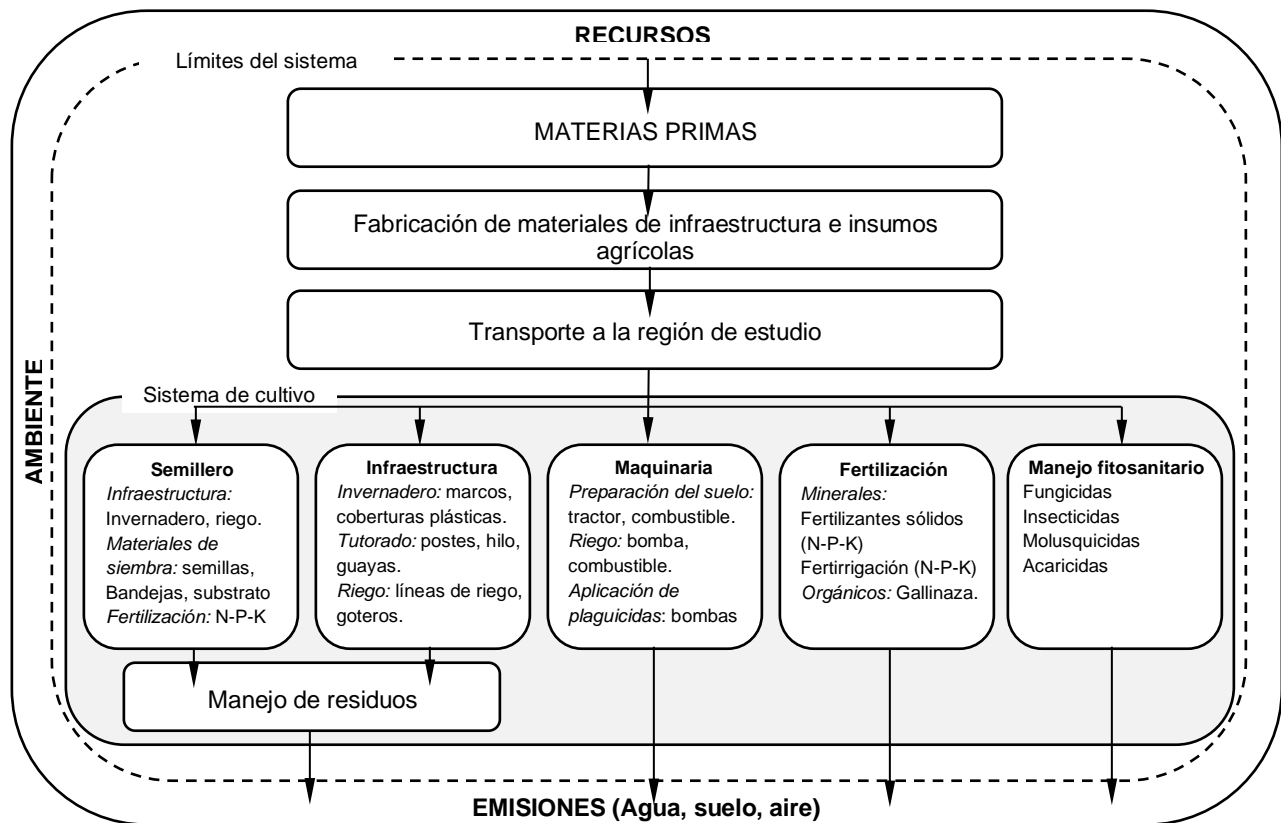
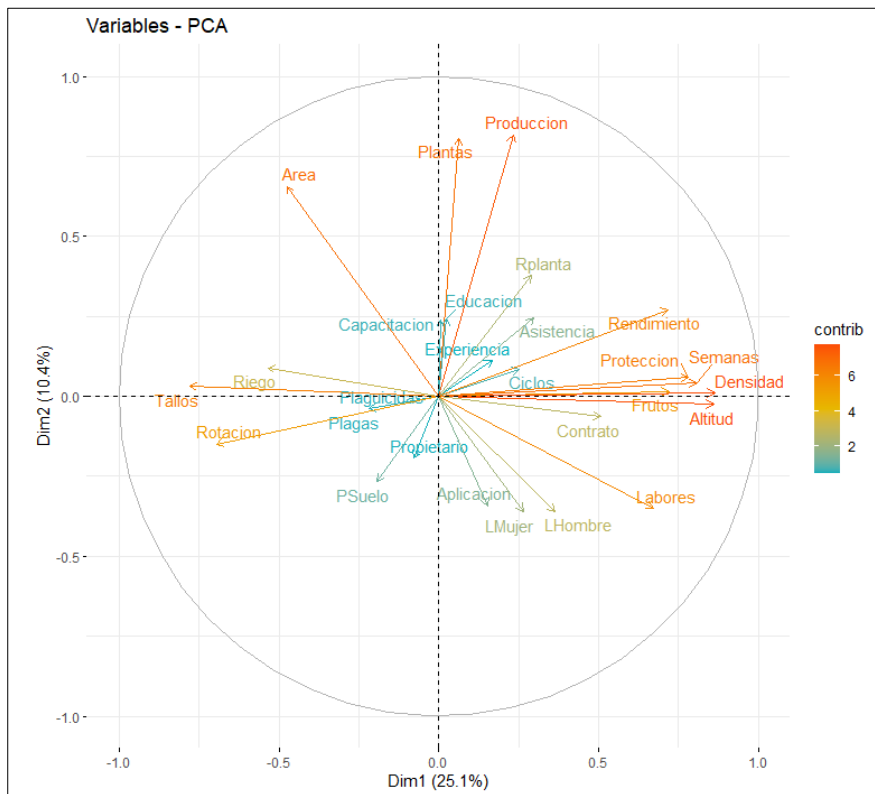


Figura 1-2. Diagrama de flujo del sistema de producción de tomate bajo invernadero en Ricaurte Alto (Boyacá). Adaptado de Bojacá et al. (2014).

Análisis multivariado general de los sistemas productivos y regiones.

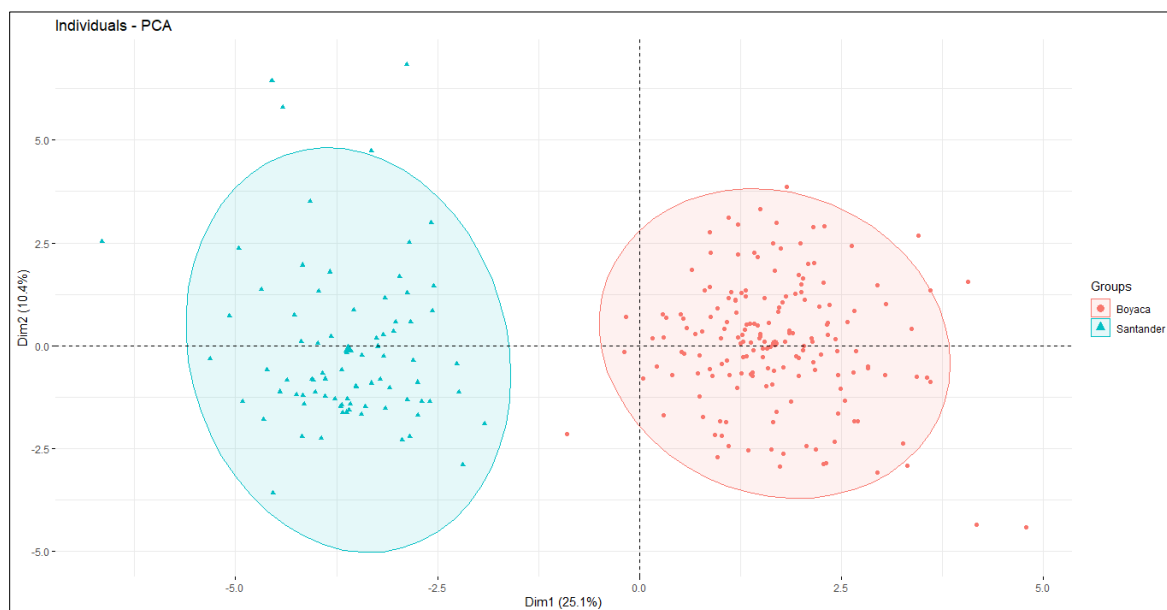
Teniendo en cuenta las 27 variables de las encuestas tanto en aspectos técnicos de los sistemas de producción como socioeconómicos, mediante el ACP general se determinó que la agrupación de las variables en las dos primeras dimensiones explica el 35% de la variabilidad total, por lo cual, se incluyó en el análisis las siguientes tres diimensiones del ACP, como complemento. Esta situación denota dispersión de la variabilidad y baja redundancia entre variables (Gráfica 1-1).



Dimensión	Dimensión 1 (25,1%) **	Dimensión 2 (10,4%)	Dimensión 3 (8,9%)	Dimensión 4 (7,1%)	Dimensión 5 (6%)
Variable*	Densidad >10%	Producción >23%	Plaguicidas>31%	Capacitación >27%	Rendimiento planta >22%
	Altitud	Plantas	Plagas	Asistencia	Asistencia
	Semanas	Área	Aplicación	Rendimiento planta	Capacitación
	Protección	Rendimiento planta	Ciclos	Producción	Preparación suelo
	Tallos	Labores hombre	Producción	Rendimiento	Rendimiento
	Frutos	Labores mujer	Asistencia	Educación	Labores mujer
	Rendimiento	Labores	Rendimiento planta	Plagas	Plantas
	Rotación	Aplicación	Rendimiento	Labores hombre	Labores hombre
	Labores	Rendimiento	Educación	Plaguicidas	Propietario
	Riego <4%	Preparación suelo<4%	Labores mujer <2%	Protección <4%	Riego < 4%

Gráfica 1-1. Contribución de las variables al ACP para los sistemas de producción de tomate y regiones: campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá).*En orden descendente del porcentaje de contribución a la Dimensión. **Porcentaje de explicación de la variabilidad.

Se puede interpretar que, las primeras cinco dimensiones del ACP explican en total el 57,5% de variabilidad, siendo las principales variables en cada una: i) Dimensión 1: densidad de siembra, altitud, semanas; ii) Dimensión 2: producción, plantas, área; iii) Dimensión 3: Plaguicidas, plagas, aplicación; iv) Dimensión 4: capacitación, asistencia, rendimiento planta; v) Dimensión 5: rendimiento planta, asistencia y capacitación. Es decir que, hasta la Dimensión 3 las principales variables que explican la variabilidad corresponden a variables de producción, y partir de la Dimensión 4 toman relevancia las variables socioeconómicas, no obstante, con una explicación de la variabilidad menor al 7,1% (Gráfica 1-1). Por último, las variables pertenecientes la dimensión uno del ACP que explica el 25,1% de la variabilidad general, están relacionadas entre si y son responsables de agrupaciones entre fincas correspondientes a cada región y sistema productivo (Gráfica 1-2).

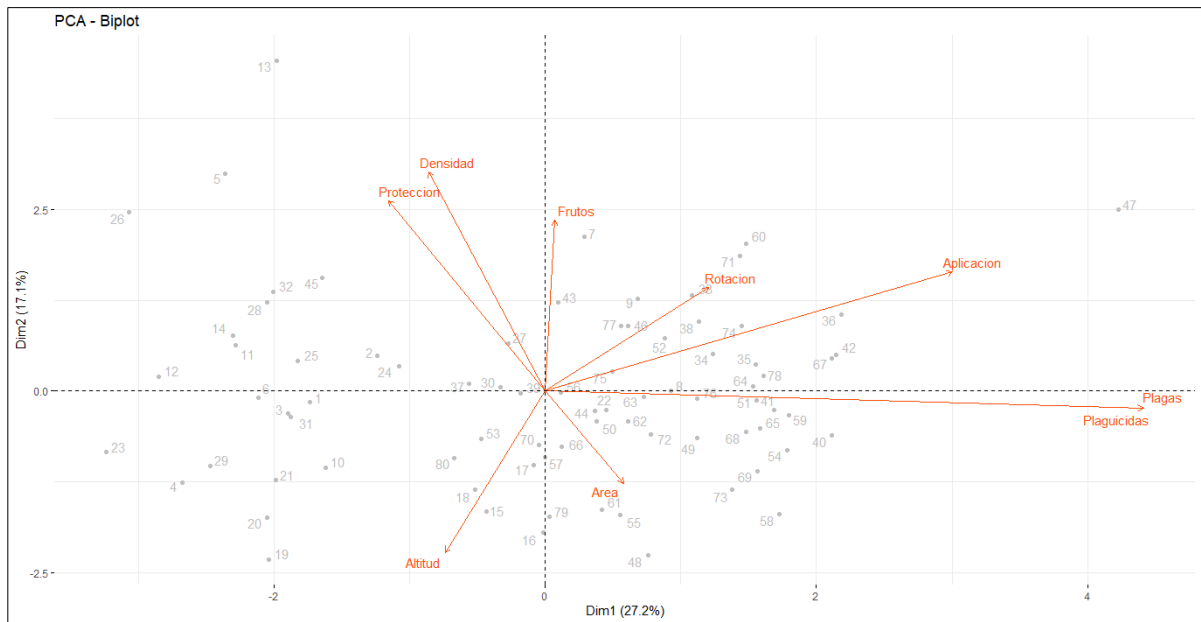


Gráfica 1-2. Agrupaciones generales de las fincas para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá), mediante el ACP.

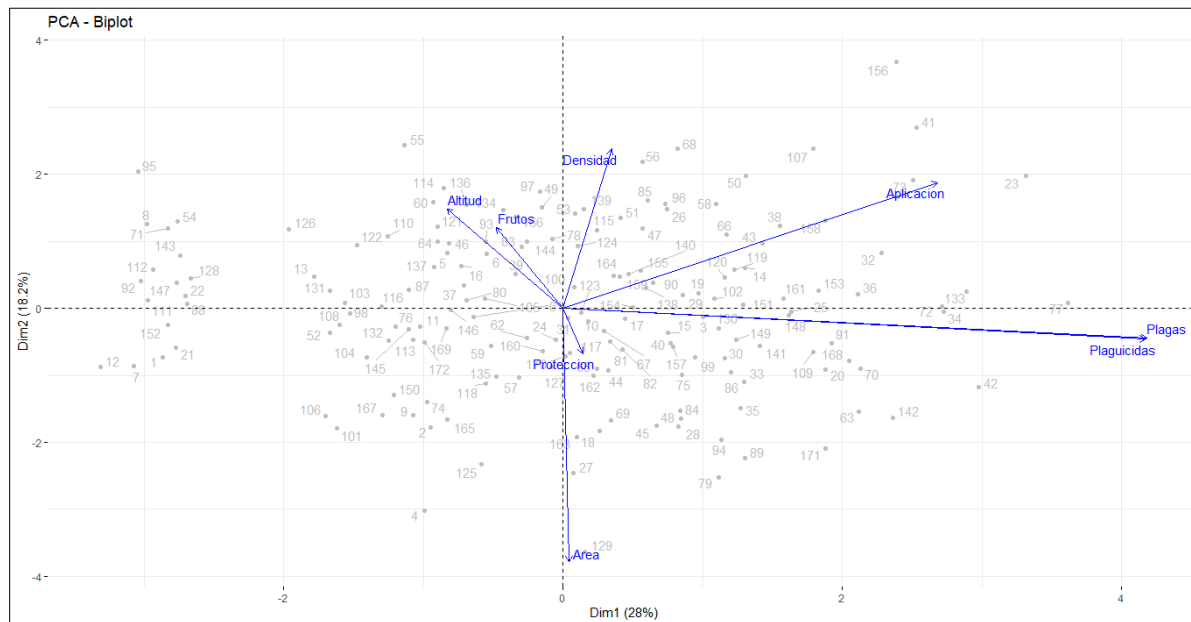
Mediante esta visión sistémica general, se establece que existen aspectos de los sistemas productivos y socioeconómicos diferentes entre las regiones, y otros que pueden ser compartidos como la experiencia en el cultivo, nivel educativo, capacitación recibida, propiedad, e incluso el uso de plaguicidas y las plagas.

Análisis multivariado regional enfocado en aspectos fitosanitarios

Teniendo en cuenta la información obtenida del ACP general de los sistemas productivos y regiones, se realizaron ACP para cada región por separado y uno integrado, enfocados en 10 variables relacionadas con el uso de plaguicidas. Para el ACP aplicado a los sistemas productivos a campo abierto en Santander, se encontró que las dos dimensiones contempladas recogen el 44,3% de explicación de la variabilidad, principalmente las variables plaguicidas, plagas y aplicación con el 27,2%, así como las variables densidad de siembra, uso de implementos de protección para plaguicidas, número de frutos por planta y altitud con el 17,1%. A su vez, no se encontraron tendencias ni agrupaciones denotando dispersión entre las medidas implementadas en las fincas (Grafica 1-3). Una situación similar se determinó para el ACP aplicado para los sistemas productivos bajo invernadero en Boyacá, donde las dos dimensiones contempladas recogen el 46,2% de explicación de la variabilidad, específicamente las variables plagas, plaguicidas y aplicación con el 28%, así como las variables área cultivada y densidad de siembra con el 18,2%. Tampoco se encontraron tendencias ni agrupaciones, con dispersión de la información obtenida (Grafica 1-4).



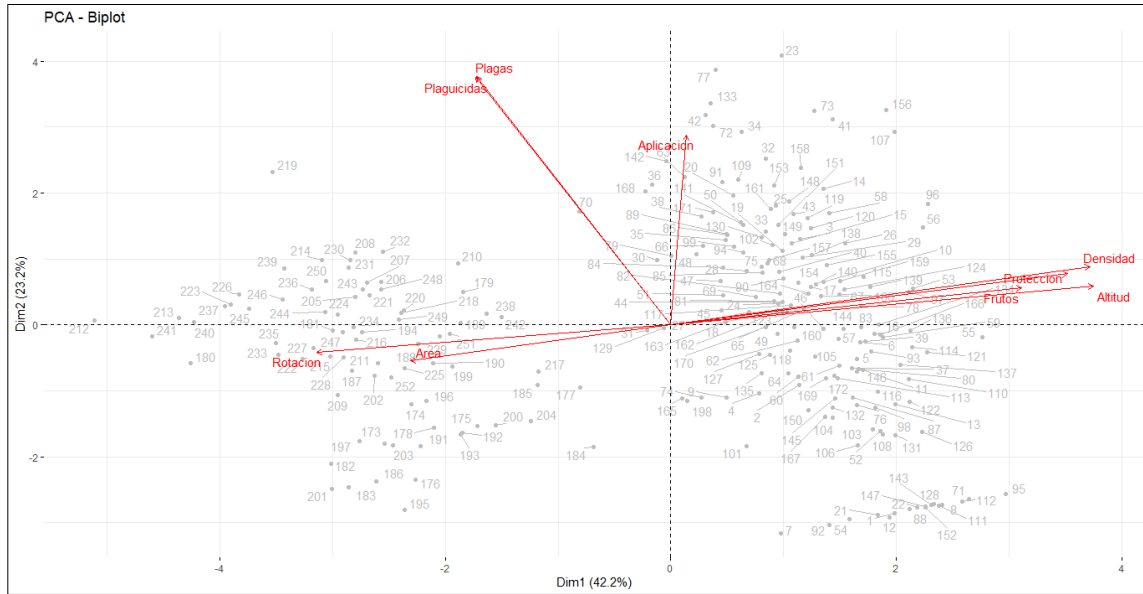
Gráfica 1-3. ACP para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.



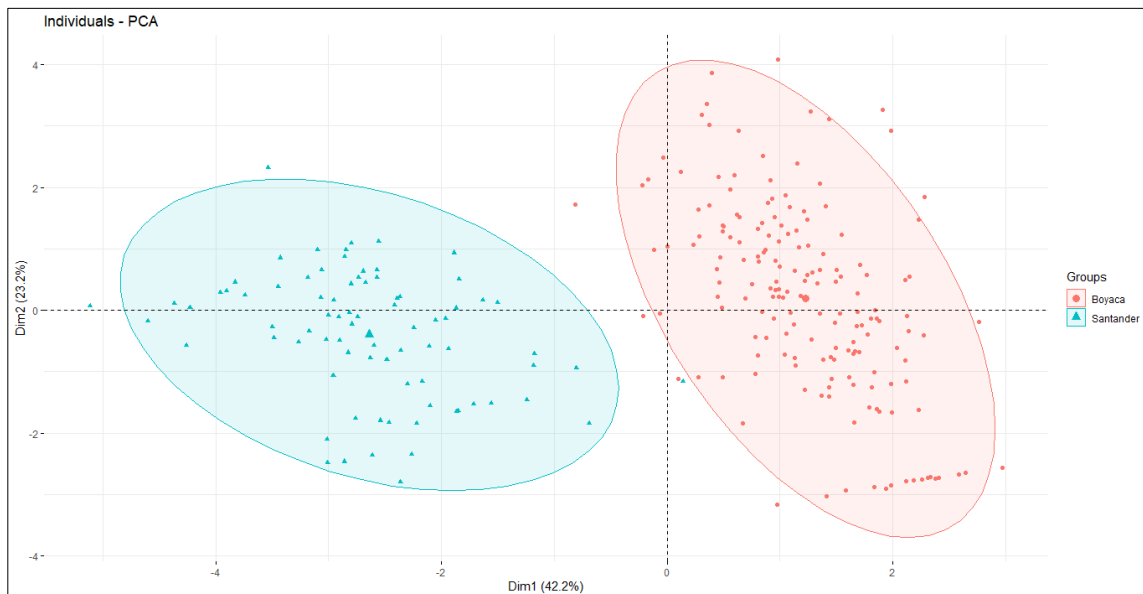
Gráfica 1-4. ACP para los sistemas de producción de tomate bajo invernadero (Boyacá), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.

Por último, en el ACP integrado para las dos regiones y sistemas productivos de tomate, las dos dimensiones contempladas recogieron el 65% de variabilidad total, siendo el ACP más ajustado, con redundancia entre las variables de las dos dimensiones, donde las variables plagas, plaguicidas y aplicación de plaguicidas recogen el 23,2%, mientras las variables altitud, densidad de siembra, uso de implementos de protección, rotación de cultivos y número de frutos por planta, explican el 42,2% (Grafica 1-5), además, son responsables de las agrupaciones entre fincas de la misma región (Grafica 1-6).

En este sentido, se corrobora con evidencia estadística la agrupación de las dos regiones, que amerita análisis independientes. A su vez, las agrupaciones no están directamente definidas por las plagas, los plaguicidas y las aplicaciones, por lo cual las medidas que se implementen respecto al manejo fitosanitario pueden ser transversales para los dos sistemas de producción y regiones. No obstante, las variables uso de implementos de protección y rotación de cultivos, si son variables que agrupan y deben contemplarse para las medidas manejo fitosanitario alternativo dependiendo del sistema de producción y región. Además, no es posible definir fincas típicas para ningún sistema productivo, de esta manera, los análisis posteriores deben incluir fincas al azar para recoger la variabilidad de las regiones.



Gráfica 1-5. ACP para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.



Gráfica 1-6. Agrupaciones de fincas para los sistemas de producción de tomate a campo abierto (Santander) e invernadero (Boyacá), con variables relacionadas con el uso de plaguicidas.

1.4 Discusión

Los productores de tomate de las dos regiones de estudio son desde adultos jóvenes hasta adultos de la tercera edad, con una mayor proporción de hombres que mujeres, la

mayoría con educación formal de primaria y bachillerato, presentándose una menor proporción como técnicos o profesionales, y aún se presenta analfabetismo. En general, son propietarios de las fincas productoras, y cuentan con amplia experiencia en la producción convencional de tomate, bien sea a campo abierto o bajo invernadero. La producción de tomate está arraigada las dos regiones, sin tendencia a su abandono, la mano de obra familiar es común en los dos sistemas productivos, con mayor empleo para mujeres rurales en la región de Ricaurte Alto, no es evidente la conformación de organizaciones rurales, principalmente en Santander.

Por otra parte, los sistemas productivos de tomate colombianos se desarrollan en condiciones contrastantes, en relieves quebrados y menor altitud para las fincas a campo abierto, en comparación con las fincas bajo invernadero. Respecto a las condiciones climatológicas, en la producción a campo abierto la precipitación es el doble que la producción bajo invernadero, mientras que las variables temperatura, humedad relativa y radiación solar, también son ligeramente superiores. En general, los cultivos a campo abierto tienen su mejor desarrollo productivo entre los 900 y 1.800 msnm con temperaturas entre 20 y 25 °C (Vallejo et al., 2004). En contraste, el sistema bajo invernadero, implica un mayor grado de independencia de los factores climáticos externos como temperatura, lluvia, viento y humedad relativa, adicionalmente, permite ejercer mayor control de los procesos fisiológicos de la planta relacionados con la demanda de agua y la evapotranspiración, así como la absorción de nutrientes y minerales (Vallejo et al., 2004, Jaramillo et al., 2006).

A su vez, los suelos de la provincia Guanentá son arenosos, ácidos, con bajos contenidos de carbono, mientras los suelos de la región del Ricaurte Alto tienden a ser arcillosos, ligeramente ácidos y con menor contenido de carbono, sin embargo, los contenidos nutricionales son suficientes para la producción agrícola en ambas regiones. Es así como las condiciones edafológicas encontradas resultan favorables, dado que la planta de tomate presenta un desarrollo óptimo en suelos sueltos, drenados, que permitan la penetración y desarrollo de raíces superficiales, además, altamente porosos para favorecer la dinámica del agua, siendo cultivos con alta demanda hídrica intolerantes a su sobresaturación (Vallejo et al., 2004). Las texturas indicadas del suelo deben ser francas a franco arcillosas, libre de rocas y con distribución uniforme, respecto a aspectos químicos, con materia orgánica por encima del 5%, alto contenido de

nutrientes, y pH entre 5,8 a 6,8 (Jaramillo et al., 2006), estas condiciones óptimas se encontraron en ambas regiones, a excepción de los contenidos de materia orgánica.

La infraestructura es una característica contrastante evidente entre los dos agroecosistemas, siendo mayor en la producción de la región de Ricaurte Alto, teniendo en cuenta la implementación de invernaderos. Para el manejo del agua, en las dos regiones se utilizan sistemas de riego, generalmente mediante aspersión en campo abierto y goteo bajo invernadero, haciendo uso de gravedad y bombas, respectivamente. La implementación de esta infraestructura, se justifica en la medida que los sistemas de producción bajo condiciones protegidas, favorecen la productividad, rentabilidad y calidad del producto, se realizan mediante estructuras levantadas y cobertura de plástico, con el objetivo de evitar el impacto de la lluvia sobre el cultivo, el manejo tecnológico es el mismo que a campo abierto (Jaramillo et al., 2006, Miranda et al., 2009). Como se evidenció en el presente estudio la producción es el doble bajo invernadero, lo cual valida el beneficio de este sistema en términos de productividad, sin embargo, sigue siendo una productividad inferior respecto a la producción mundial reportada (FAO, 2019).

Los dos sistemas de producción corresponden a monocultivos, con la diferencia que en la producción a campo abierto se realizan rotaciones con otras especies vegetales durante el año. La conducción de la planta a campo abierto implica el mantenimiento de más tallos, sin podas permanentes, a diferencia de la producción bajo invernadero donde se mantiene un solo tallo, con dehojes y podas regulares. La variedad predominante en campo abierto fue Tayson y bajo invernadero Ichiban F1. Además, la mano de obra bajo invernadero es el doble que la requerida a campo abierto, teniendo en cuenta aspectos como el mantenimiento de la infraestructura. La capacitación es en los dos casos en su mayoría ofrecida por casas comerciales de agroquímicos, esto puede estar relacionado con la amplia gama de productos de síntesis química que se aplican.

En la producción a campo abierto los problemas fitosanitarios son enfermedades y plagas por igual, mientras bajo invernadero corresponden en su mayoría a enfermedades. En las dos regiones la principal enfermedad es causada por el hongo *P. infestans*, mientras las principales plagas corresponden a *N. elegantalis* y *T. vaporariorum* a campo abierto y bajo invernadero, respectivamente, reportadas ampliamente en diferentes trabajos, (Berlinger et al, 1986; Bojaca et al., 2012; Fuentes et

al., 2014). Respecto a los productos que se usan para su manejo, es también balanceado el uso de insecticidas y fungicidas en la producción a campo abierto, coherente con el ataque de plagas y enfermedades, sin embargo, en la producción bajo invernadero, es mayor el uso de insecticidas, a pesar de reportarse más enfermedades, esto puede ser por la incidencia y severidad de los ataques de plagas en la región, porque sus ciclos de vida pueden verse potenciados por los cambios evidentes de temperatura y humedad al interior de los invernaderos (Berlinger et al., 1986).

Para este manejo fitosanitario, se aplica mayor cantidad de i.a. en la producción bajo invernadero que a campo abierto (Tabla 1-4), esto podría interpretarse como una mayor dependencia a los insumos externos en la producción bajo invernadero, o bien por el poder adquisitivo de los agricultores en la región de Ricaurte Alto. En las dos regiones, el uso de productos de síntesis química es predominante, únicamente en la producción bajo invernadero se reporta el uso de agentes de control biológico, dado que este tipo de manejo se favorece en condiciones protegidas (Berlinger et al., 1986), se destaca que en las dos regiones se hace uso de productos de origen botánico. Según Bojacá et al. (2012), en las mismas regiones de estudio del presente trabajo, específicamente en la producción bajo invernadero, los productores usan en promedio de $6,6 \pm 2,6$ i.a. durante la etapa de crecimiento del cultivo, haciendo uso de la diversidad de i.a. aplicados en la región.

Los PSQ disminuyen las pérdidas de producción, así como en procesos de poscosecha (Fenik et al., 2011). En las dos regiones se repite el uso de grupos químicos como Organofosforados, Carbamatos y Piretroides, siendo Carbamatos el grupo más frecuente a campo abierto y Triazoles bajo invernadero, en cuanto a los i.a. más usados corresponden a tiametoxam y tiociclam a campo abierto y bajo invernadero, respectivamente coincidiendo con los resultados reportados por Bojacá et al. (2012) para el sistema bajo invernadero; estos dos i.a. cuentan con registro ICA para tomate, pero están prohibidos por la CEE. El i.a. metomilo es común en las dos regiones entre los más usados, el cual no cuenta con registro ICA para tomate. Se hace uso de productos de síntesis química de todas las categorías toxicológicas, siendo las más usadas las categorías II y III, siendo preocupante todavía el uso de i.a. categoría I y IA, prohibidos a nivel internacional (CCE, 2019), teniendo en cuenta, además, el uso limitado de implementos de protección personal por parte de los encuestados.

Esta no es una problemática reciente, el uso de PSQ en Colombia se remonta a la década de los años 50, cuando se comenzaron a utilizar los Organoclorados principalmente el diclorofeniltricloroetano (DDT) y sus derivados, arsenicales, Organofosforados y Ditocarbamatos. Entre los años 60 y 80 comienzan a aparecer los primeros problemas de resistencia de plagas, lo cual motivó el desarrollo y uso de nuevos plaguicidas prohibiendo el uso además de los que contenían mercurio, desde los años 80 hasta los 90 se intensifica el uso de fungicidas y herbicidas (Idrovo, 2000). En las regiones de estudio evaluadas, se reportan i.a. que llevan más de tres décadas en el mercado como mancozeb, compuestos de azufre, oxiclورو de cobre, captan, paraquat, glifosato, propanil, clorpirifos, carbofuran y triazinas.

En este sentido, el uso de estos compuestos en las regiones de estudio podría conducir a problemas de contaminación de aguas, degradación de suelos, afectando así microorganismos benéficos para este, contaminación de aire y de vegetación no objetivo y daño a organismos no objetivo (Aktar et al., 2009). Adicionalmente, en los humanos se pueden generar patologías y toxicidad gracias a la residualidad de las sustancias químicas por absorción de agentes anticolinesterásicos la cual ocurre por inhalación, ingestión y/o a través de la piel (Cárdenas et al., 2010). Teniendo en cuenta además, que los diferentes PSQ reportados, se caracterizan por tener categorías toxicológicas de moderadas a altas de tal forma que pueden causar efectos directos en la salud y hasta la muerte bajo usos inadecuados. Debe respetarse entonces los periodos de carencia en las aplicaciones, es decir el tiempo entre la aplicación de la molécula y la cosecha, tiempo en el cual se debe haber degradado el i.a. y los coadyuvantes.

1.5 Conclusiones

Los productores de tomate en las dos regiones, son pequeños agricultores que han logrado producción permanente, gracias su experiencia y la de los diferentes actores que intervienen en los procesos, sin embargo, la capacitación e implementación de herramientas tecnológicas esta siendo abordada por agentes con sesgo hacia una producción dependiente de agroinsumos, y esto se ve reflejado de manera evidente en el manejo fitosanitario.

En los distintos procesos se emplea mano de obra contratada de la misma región, no obstante, existe una proporción de mano de obra familiar, siendo el cultivo parte de la vida cotidiana de las familias, esto implica que para lograr alguna respuesta cultura, se debe involucrar a los distintos miembros de la familia, y en esa medida lograr cambios a largo plazo para los sistemas de producción actuales.

La producción de tomate en las regiones de Santander y Boyacá estudiadas, cuenta con unas condiciones agroecológicas propicias para el desarrollo del cultivo, con algunas restricciones reflejadas en aspectos de infraestructura y propiedades de los suelos, que son manejadas por los agricultores, pero estas medidas son susceptibles de mejora.

En los sistemas productivos de tomate, tanto a campo abierto como bajo invernadero, el manejo fitosanitario se basa principalmente en el uso de productos de síntesis química, implementando una amplia gama de ingredientes activos, en mayor cantidad bajo invernadero. Estos productos, corresponden en proporciones similares a fungicidas e insecticidas, con categorías toxicológicas moderadas en su mayoría, sin embargo, aún se hace uso de productos con categoría extremadamente tóxica.

Mediante los seguimientos, se encontró que la dosis de aplicación de plaguicidas es generalmente ocho y hasta diez veces menor que la reportada en una encuesta, e incluso se aplican plaguicidas no reportados en las encuestas, esto es un punto a tener en cuenta con respecto a la veracidad de la información que aportan los agricultores que se usa para análisis ambientales. Además, se requiere una revisión a la legislación, así como al seguimiento y control de la misma, dado que se evidencia el uso de productos sin registro para tomate y contradicciones en los registros nacionales e internacionales. Por último, el uso de productos diferentes a los de síntesis química es prácticamente nulo en la provincia Guanentá, e incipiente en la región del Ricaurte Alto.

Mediante el análisis multivariado fue evidente la agrupación de los dos sistemas de producción, sin embargo, al interior de cada región la dispersión de información es alta, por lo cual, las soluciones locales (finca) como las que se plantean desde la agroecología son una alternativa para generar un cambio hacia la disminución de uso de plaguicidas y tendencia hacia la intensificación ecológica.

2 Capítulo: Destino ambiental de plaguicidas en regiones productoras de tomate de Santander y Boyacá

2.1 Introducción

Desde la llamada “Revolución Verde”, se evidencia la masificación de la producción y uso de PSQ, con su descarga deliberada a los agroecosistemas. En este panorama, cerca del 10% del volumen aplicado llega al organismo objetivo, mientras el resto es depositado en áreas y organismos no objetivo, como resultado, se detectan en suelo, aire, aguas superficiales y subterráneas, sedimentos, en vegetales y alimentos (Ortíz et al., 2011). Este resultado se contempla como su destino ambiental, entendido como el lugar donde se aloja una sustancia química después de ser liberada al ambiente, que incluye su transporte, distribución y degradación en los diferentes compartimientos: agua, aire, suelo, sedimento, biota y en sus interfaces (Verschueren, 1983).

Para determinar el destino ambiental de plaguicidas, además de conocer sus propiedades químicas y físicas, es necesario adelantar muestreos o monitoreos cuyos objetivos generales son proteger la salud, mejorar el manejo de los recursos agrícolas y de alimentos y prevenir pérdidas económicas (Fierro & Téllez 1997; FAO, 1999). En este proceso se determinan residuos de plaguicidas, siendo cualquier sustancia especificada presente en alimentos, productos agrícolas o alimentos para animales como consecuencia del uso de un plaguicida. Este término incluye cualquier derivado de un plaguicida, como productos de conversión, metabolitos, productos de reacción o las impurezas que se considera que tienen una importancia toxicológica, estos pueden provenir de fuentes desconocidas, así como los usos conocidos del producto químico (FAO/WHO, 2019), la anterior definición se centra en el producto comercializado pero puede extrapolarse a los demás compartimientos ambientales, suelo, agua, aire y biota.

Dado que el énfasis en el análisis de residuos de plaguicidas se ha centrado en alimentos, diferentes órganos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) a través del *Codex Alimentarius* (FAO/WHO) o la Comisión Europea (EU), entre otros, lo abordan, teniendo como propósito la seguridad alimentaria y el consumo de alimentos inocuos para la salud humana. A su vez, determinan los Límites Máximos de Residuos - LMR que son la concentración máxima legalmente permitida en la superficie o parte interna de productos de alimentación para consumo humano y de piensos. Estos no representan límites de toxicidad sino límites toxicológicamente aceptables, por lo cual exceder estos límites representa una violación a la aplicación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) (WHO, 1997; FAO/WHO, 2019). En este contexto, exceder los LMR implicaría que aspectos previos a la cosecha puedan incidir en los diferentes compartimentos ambientales.

Desde hace más de tres décadas, en Europa se han realizado monitoreos para la detección de residuos de plaguicidas en alimentos, incluido tomate, encontrando violaciones de los LMRs definidos por la EU (Sadlo, 1997; Fenoll et al., 2007; Ravelo-Pérez et al., 2008). De la misma manera, en América se han realizado estudios de residuos en alimentos con el mismo enfoque aplicando los LMRs de la FAO (Katz & Winter, 2009; Penido et al., 2009; Jardim & Caldas, 2012). En Colombia los primeros estudios sobre residualidad de plaguicidas, fueron sobre Organoclorados (Gallego, 1973; Londoño & Barreto, 1982), y específicamente en tomate sobre Organofosforados en Cundinamarca y Boyacá (Urrego & Cachique, 1986), posteriormente, se ha estudiado el efecto de los plaguicidas sobre la salud humana, validaciones de metodologías de detección en laboratorio y presencia de plaguicidas en diferentes productos en Cundinamarca, Huila, Cauca, Santander, Quindío y Bogotá (Idrovo, 2000; Guerrero, 2003; Castro et al. 2004; Farias et al., 2004; Murcia & Stashenko, 2008; Gutiérrez & Londoño, 2009).

En la última década, en el país se han realizado estudios sobre evaluación de riesgo en la salud humana en Caldas, también en la validación de técnicas de detección (Páez, et al., 2011; Ahumada & Guerrero, 2010; Ahumada et al., 2013) y monitoreos en alimentos en regiones de Santander, Boyacá, Bogotá y Quindío (Bojacá et al., 2013, Arias et al., 2014; Ávila-Orozco et al., 2017). De esta manera, la mayor parte de los estudios sobre plaguicidas en sistemas de producción agrícola a nivel mundial se han enfocado en su

detección y cuantificación en alimentos. Sin embargo, desde los años 50 se iniciaron investigaciones sobre éste tipo de problemáticas no solo en los productos de consumo humano, sino también en otros compartimentos ambientales como suelo, agua, aire y otros organismos, que pueden afectarse por su uso inadecuado (Blazquez, 1973; Goss & Wauchope, 1990).

De esta manera, aumentaron las investigaciones relacionadas con la presencia de plaguicidas en el follaje, de diferentes cultivos a nivel mundial (Iwata et al. 1977; El-Shahawi, 1997; Wang & Liu, 2007), así como en suelo (Kolankaya et al., 1989; Juraske et al., 2011; Ahumada et al., 2013; Mosquera-Vivas et al., 2018), además, en aguas y sedimentos de ecosistemas lóticos y lenticos continentales, incluso en ecosistemas marinos, principalmente sobre Organoclorados (Zamar et al., 2012; Mojica & Guerrero, 2013; Carazo-Rojas et al., 2018); estas investigaciones, han demostrado la presencia de plaguicidas en diferentes compartimientos ambientales.

El anterior panorama, muestra investigaciones aisladas sobre residuos de plaguicidas en diferentes compartimientos ambientales y regiones rurales, donde la presión de agroquímicos es alta. Por otra parte, falta de diagnóstico, vigilancia y monitoreo de plaguicidas en alimentos y en otros componentes del medio biofísico local. Es así como la generación de conocimiento en esta materia es necesaria, con trabajos que incluyan una visión holística, para facilitar la identificación de los puntos de acción. Por tal razón, el objeto del presente capítulo fue determinar residuos de plaguicidas en diferentes compartimientos ambientales: frutos, plantas, suelo, agua y sedimentos, de la provincia Guanentá (Santander) y región de Ricaurte Alto (Boyacá) y ligadas a sistemas productivos de tomate, como aporte a la comprensión del destino ambiental de plaguicidas en agroecosistemas de tomate colombianos.

2.2 Metodología

Área de estudio

Las regiones de estudio correspondieron a las mismas del Capítulo 1: la región Ricaurte Alto (Boyacá) en agroecosistemas de tomate bajo invernadero, de los municipios de Villa de Leyva, Santa Sofía y Sutamarchán; así como los ríos Funza, Sutamarchán, Leiva y

Monquirá de los municipios de Tinjacá, Sutamarchán, Sáchica, y Santa Sofía, respectivamente. Por otro lado en la provincia Guanentá (Santander) en agroecosistemas de tomate a campo abierto de los municipios de Valle de San José, Pinchote, Curití, San Gil y Páramo; así como en la quebrada la Tolosa, el río Mogoticos, la quebrada Curití y el río Fonce, de los municipios de Páramo, Valle de San José, Curití y San Gil, respectivamente. En todos los casos, se tuvo en cuenta que en el muestreo al azar no se debe tener conocimiento previo de los niveles residuales o evidencia de residuos de plaguicidas ilegales y debe seguir los lineamientos específicos sugeridos por la FAO (Fierro & Téllez 1997; FAO, 1999), además de procedimientos específicos de la EPA para suelos y aguas.

Fase de campo

Inicialmente, en 2011 se colectaron semanalmente frutos listos para comercialización en fincas al azar entre las que se hicieron seguimientos previamente (Cap. 1) de Santander y Boyacá, durante el ciclo de producción. Es así como, se colectaron 52 muestras independientes de 1.000 g cada una, de seis fincas de Santander y de igual manera 212 muestras de nueve fincas de Boyacá, la diferencia del número de muestras se debió a la duración de los ciclos de cultivo Santander (62 días) y Boyacá (107 días), al número de fincas seleccionadas y características fisiológicas de las variedades (Bojacá et al., 2013), además de las características propias de manejo en cada región.

Para abarcar otros compartimentos ambientales en las regiones, como el suelo y las hojas del cultivo, en 2013 se seleccionaron ocho fincas adicionales, seleccionadas al azar entre las que se hizo seguimientos previos (Cap. 1), donde se colectaron 16 muestras de suelos y 16 muestras de hojas, de 1.000 g cada una, en cuatro fincas en Ricaurte Alto y de igual manera 16 muestras de suelos, y 16 muestras de hojas, de 1.000 g cada una, en cuatro fincas en la provincia Guanentá (Garzón, 2014). Como complemento, en ese mismo año en las mismas fincas y regiones también se colectaron 32 muestras de frutos de 1.000 g cada una (16 en cada región), sobre las cuales se realizó el análisis de residuos de plaguicidas en cáscara y pulpa por separado, así como del fruto completo (Ayarza, 2014). Con el fin de evaluar el agua como compartimento ambiental, se seleccionaron las corrientes de agua más representativas de las regiones de estudio y durante 2015 se colectaron ocho muestras de agua de 1.000 ml cada una, y ocho muestras de sedimento de 1.000 g cada una, en cuatro ríos de la región de Ricaurte

Alto (Aux, 2016) y de igual forma, ocho muestras de agua de 1.000 ml cada una, y ocho muestras de sedimento de 1.000 g cada una, en cuatro ríos y quebradas de la Provincia Guantán, la mitad de las muestras en época de lluvias (Abril-mayo), y la otra mitad en época seca (Julio-Agosto), coincidente con el régimen bimodal de las dos regiones.

Es decir que, en total se colectaron y analizaron 392 muestras compuestas discriminadas de la siguiente manera: 296 muestras de frutos (228 de Boyacá y 68 de Santander), 32 muestras de hojas (16 de Boyacá y 16 de Santander), 32 muestras de suelo (16 de Boyacá y 16 de Santander), 16 muestras de agua (8 de Boyacá y 8 de Santander) y 16 muestras de sedimento (8 de Boyacá y 8 de Santander), para la determinación de residuos de plaguicidas.

Toma de muestras

Para la toma de muestras, se diseñaron e implementaron muestreos en las fincas seleccionadas de manera concertada con los productores, directamente en el cultivo incluyendo frutos, hojas y suelos, así como agua y sedimentos de corrientes de agua aledañas a los cultivos, acatando las consideraciones y parámetros de monitoreo establecidos por la FAO, el *Codex Alimentarius* CAC/GL 33 (FAO, 1999), la EPA (1998) y otras consideraciones específicas para aguas (Stephenson et al., 2013). Es así como, en las dos regiones de estudio se muestrearon lotes con un área aproximada de 2.000 m², y en cada finca se colectaron muestras compuestas de frutos, hojas y suelo, según fuera el caso. A su vez, los muestreos de agua y sedimento se llevaron a cabo en estaciones de monitoreo de 1.000 m longitudinales sobre el cauce del río o quebrada (Figura 2-1).

Los *frutos* se colectaron realizando recorridos en zigzag al interior del lote, tomando máximo un fruto en punto de cosecha por planta, utilizando guantes de nitrilo para evitar la contaminación de las muestras y depositándolos en bolsas plásticas de cierre hermético, hasta completar una muestra compuesta de 1.000 g. Las *hojas* se colectaron de forma aleatoria en la planta tomando folíolos del tercio superior, medio e inferior y retoños (chupones), utilizando guantes de nitrilo para evitar la contaminación de las muestras y depositándolas en bolsas plásticas de cierre hermético, realizando un transecto en zigzag al interior del mismo lote de cultivo; se tomó diferente número de hojas hasta completar una muestra compuesta de 1.000 g.

Según la EPA (1998), el número mínimo de muestras de suelo requeridas para análisis de destino ambiental de plaguicidas deber ser seis. Las muestras de *suelo* se obtuvieron de los primeros cinco cm del perfil, cerca de la rizósfera de las plantas de tomate, realizando transectos en zigzag, utilizando palas desinfectadas con NaClO al 10% antes de cada toma y depositadas en bolsas plásticas herméticas, en cada punto del transecto se tomaron cerca de 100 g de suelo, hasta obtener 1.000 g de muestra compuesta.

Para las muestras de agua y sedimento, el monitoreo se realizó en dos momentos, uno en el primer semestre y otro en el segundo semestre del año, según el régimen de lluvias histórico (época de lluvias y época seca), para este fin se establecieron cuatro estaciones de monitoreo por región. Cada estación contaba con cuatro puntos de muestreo separados cada 250 m sobre el cauce del río o quebrada. De cada estación se obtuvo cuatro submuestras de 250 ml, en botellas color ambar que se sumergieron en el cuerpo de agua contra corriente a 20 cm de profundidad, manteniéndose allí por 30 segundos, evitando el contacto con materiales que interfirieran con la muestra (Stephenson et al., 2013), posteriormente se mezclaron hasta completar 1.000 ml agua, en una botella ambar con tapón y sello. Las muestras de sedimento se colectaron con barreno, tomando cuatro submuestras de 250 g por estación, depositadas en bolsas de polietileno herméticas hasta completar 1.000 g de sedimento (Mejías & Jerez, 2006).

En los mismos puntos de muestreo de las corrientes de agua, se determinaron los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua: saturación de oxígeno, oxígeno disuelto (OD), pH, alcalinidad, dureza, conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), CO₂, análisis microbiológicos en agua de coliformes y *Escherichia coli*, y en el sedimento se determinó el pH. En total se analizaron 64 muestras para cada parámetro (32 en Boyacá y 32 en Santander). Todas las muestras provenientes de los lugares de muestreo tanto de frutos, hojas, suelo agua y sedimento fueron codificadas según el tipo de análisis a realizar y transportadas en neveras de icopor refrigeradas manteniendo una temperatura de 4°C aproximadamente, para su posterior análisis en laboratorio, en tiempos entre 24 y 48 horas. Para el caso de los residuos de plaguicidas hasta el Laboratorio de Inocuidad Química (LIQ) del Centro de Bio-Sistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (C-Bios), ubicado en Chía (Cundinamarca) o Fytolab Colombia S.A.S en Cota (Cundinamarca). Las muestras de DQO se llevaron a Laboratorios Prodycon S.A y las muestras de Coliformes al Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental del C-Bios.

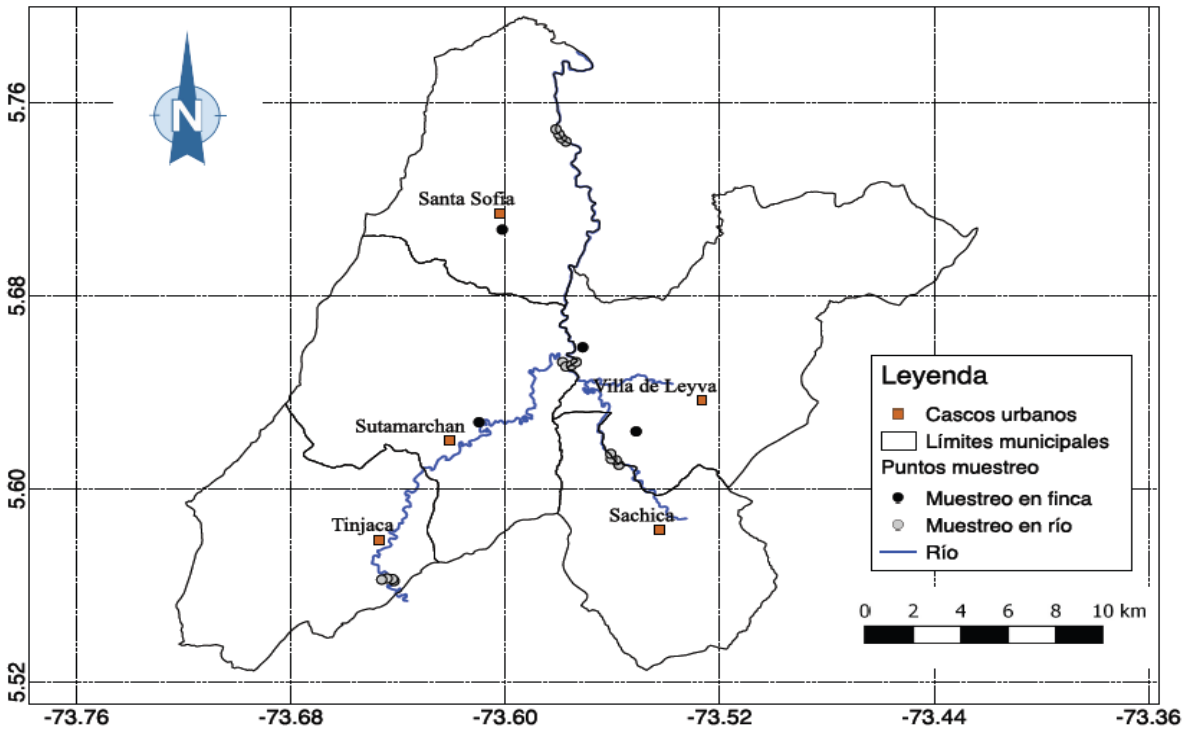
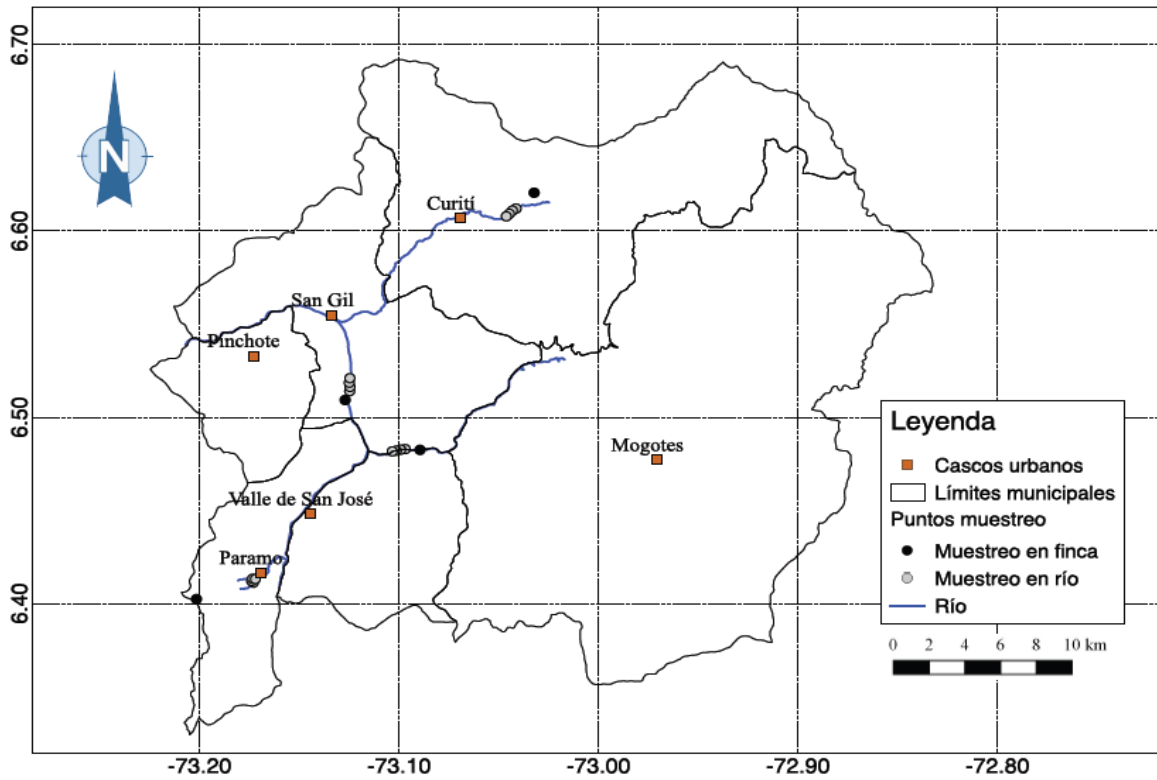


Figura 2-1. Mapa de los puntos de muestreo de material vegetal, suelos, aguas y sedimentos en las regiones de estudio. Arriba provincia Guantán (Santander), abajo región Ricaurte Alto (Boyacá).

Fase de laboratorio

El análisis de frutos, hojas y suelo se realizó siguiendo las metodologías de Ahumada & Zamudio (2011) y Ahumada et al. (2013). En primera instancia se procesaron las muestras, dependiendo de la matriz, posteriormente se realizó la extracción por medio del método QuEChERS (acrónimo de: *Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, y Safe*) modificado y finalmente la detección y cuantificación de los plaguicidas mediante cromatografía líquida ultrarrápida acoplada a espectrometría de masas (UFLC-MS).

De manera específica, el método QuEChERS consistió en pesar 10 g de muestra homogeneizada en un tubo de centrífuga. Luego adicionar TPP, dejar en reposo por 10 min, adicionar 10 mL de acetonitrilo acidificado con ácido acético al 1% (V/V), 4 g de MgSO₄ anhidro y 1 g de AcONa, para luego agitar manualmente por 1 min. Posteriormente, se llevó al baño de ultrasonido por 10 min, se centrifugó a 4.500 rpm por 5 min, con ayuda de una pipeta, se tomaron 10 ml del sobrenadante (Solución A), los cuales se transfirieron a un tubo de centrifuga de 15 ml. Para el proceso de limpieza, por cada mililitro de extracto (Solución A) se adicionaron 25 mg de PSA (amina primaria/secundaria) y 150 mg de MgSO₄ anhidro, se agitó manualmente por 30 s y se centrifugó por 2 min a 4.500 rpm. Finalmente, el sobrenadante se filtró a través de una membrana de 0,22 µ m de PTFE (Solución B), se transfirió a un vial de cromatografía donde se adicionó el estándar interno (E.I.) (Ahumada & Zamudio, 2011; Ahumada et al., 2013), el método de extracción varía dependiendo de la matriz de análisis (frutos, hojas o suelo).

El análisis cromatográfico se llevó a cabo en un cromatógrafo líquido ultrarrápido Shimadzu Prominence (Maryland, CA, EUA), acoplado a un detector selectivo de masas LCMS-2020. Se empleó un generador de nitrógeno ABN2ZE Peak Scientific (Billerica, USA). El cromatógrafo contó con un inyector automático SIL20A UFLC 7673 Shimadzu (Maryland, CA, EUA), una bomba binaria de alta presión, un sistema de desgasificación en línea y un horno para el control de la temperatura de la columna. El control del sistema cromatográfico y la toma y procesamiento de datos se realizó con el software Lab Solutions versión 3.5. Los análisis se realizaron en una columna Shim Pack (6 cm x 2 mm d.i., tamaño de partícula de 2,1 µm y fase estacionaria C₁₈), en modo de gradiente lineal con ácido fórmico al 0,1% (P/V) y acetato de amonio 5 mM en agua Milli-Q (A). La fase orgánica que se empleó fue acetonitrilo (B). El tiempo total de análisis fue de 12 min.

Se trabajó con estándares de plaguicidas de pureza mayor al 95%, proveniente de las casas comerciales Dr Ehrenstorfer y Chemservice. (Ahumada & Zamudio, 2011; Ahumada et al., 2013).

Tabla 2-1. Plaguicidas analizados en laboratorio en frutos, hojas y suelo.

Ingrediente Activo	Numero CAS	LD* (mg kg ⁻¹)	LC* (mg kg ⁻¹)	LMR Codex* (mg kg ⁻¹) ^a	LMR UE** (mg kg ⁻¹) ^b
Acefato	30560-19-1	0,005	0,015	1	0,01
Atrazina	1912-24-9	0,005	0,015	0,01	0,05
Azinfos-Metilo	86-50-0	0,007	0,022	1	0,05
Azoxistrobin	131860-33-8	0,002	0,007	3	3
Benalaxilo	71626-11-4	0,005	0,015	0,2	0,5
Carbendazim	10605-21-7	0,002	0,007	0,5	0,3
Carbofuran	1563-66-2	0,004	0,015	0,01	0,002
3OH-carbofuran	16655-82-6	0,007	0,022	0,01	0,002
Cimoxanil	57966-95-7	0,067	0,225	0,01	0,4
Clorfenapir	122453-73-0	0,112	0,374	0,01	0,01
Diazinon	333-41-5	0,022	0,075	0,5	0,01
Difenoconazol	119446-68-3	0,09	0,3	0,5	2
Dimetoato	60-51-5	0,004	0,015	0,01	0,01
Dimetomorf	110488-70-5	0,005	0,015	0,01	1
Hexaconazol	79983-71-4	0,007	0,022	0,01	0,01
Imazalil	35554-44-0	0,005	0,015	0,01	0,5
Imidacloprid	138261-41-3	0,002	0,007	0,5	0,5
Indoxacarb	173584-44-6	0,011	0,037	0,5	0,5
Metalaxilo	57837-19-1	0,002	0,008	0,5	0,3
Metomilo	16752-77-5	0,005	0,015	1	0,01
Metoxifenozida	161050-58-4	0,004	0,015	2	2
Monocrotofos	6923-22-4	0,005	0,015	0,01	0,01
Oxamilo	23135-22-0	0,004	0,015	2	0,01
Pirimetanil	53112-28-0	0,002	0,007	0,7	1
Pirimicarb	23103-98-2	0,005	0,015	0,01	0,5
Spinosad A	131929-63-0	0,009	0,03	0,3	0,7
Spinosad D	131929-63-0	0,009	0,03	0,3	0,7
Tebuconazol	107534-96-3	0,011	0,037	0,7	0,9
Tiabendazol	148-79-8	0,002	0,008	0,01	0,01
Tiociclam	31895-22-4	0,03	0,1	0,01	0,01

*LD: Límite de Detección. **LC: Límite de Cuantificación (sensibilidad de las metodologías de laboratorio implementadas para el análisis en material vegetal y suelos). ^a Según *Codex Alimentarius* Pesticides Residues in Food Online Database (FAO/WHO, 2019), acogidos por la legislación colombiana mediante Resolución 2906 de 2007 del Ministerio de la Protección Social. ^b Según Commission Amending Regulation, European Commission, EU Pesticide database (EU, 2019).

Los resultados se consignaron en reportes periódicos registrando los residuos de plaguicidas en concentraciones de mg kg⁻¹. Con estos métodos se analizaron 30 i.a., de los cuales 21 i.a. fueron reportados en las encuestas y seguimientos previos (Tabla 2-1).

Los análisis de las muestras de agua y sedimento se realizaron, por medio análisis multiresiduo con cromatografía líquida y cromatografía de gases acopladas a espectrofotometría de masas de la siguiente manera: En primer lugar se realizó la extracción del plaguicida, para lo cual se empleó el método extracción líquido – líquido, el cual consiste en el uso de un disolvente orgánico como el hexano o el diclorometano el cual se adiciona en un embudo de decantación para lograr la separación de las dos fases con la consecutiva separación total del plaguicida en la fase orgánica (Hernández et al., 1995). Posteriormente se realiza un “clean- up” o eliminación de residuos, luego se hace la separación de plaguicidas individuales y si se registra la presencia de estos, se procede a determinar la cantidad en la que se encuentra cada uno. (Hernández et al., 1995). En el caso de los sedimentos se empleó el método de extracción de Luke modificado de acuerdo al Pesticide Analytical Manual Sec 302 (FDA, 2018).

Para la determinación analítica se empleó cromatografía de gases acoplada a un espectrofotómetro de masas (GC/MS/MS) usando Helio como gas de arrastre y una columna capilar, indicando que el instrumento empleado fue un Cromatógrafo con Auto-muestreador Agilent y el espectrofotómetro marca Waters y también cromatografía líquida acoplada a un espectrofotómetro de masas (LC/MS/MS) usando acetonitrilo – agua como fase móvil y una columna C₁₈, empleando un Cromatógrafo y espectrofotómetro Waters, los patrones empleados se preparan partiendo de plaguicidas en estado puro (Fytolab, 2015). El detector empleado es MS/MS que es altamente selectivo debido a que se realiza una selección de masas en los cuadrupolos. Se usó monitoreo de reacciones múltiples (MRM) lo cual implica que en los cuadrupolos se monitorean los iones producidos y se selecciona iones padre e hijo para hacer la detección. Se emplearon dos transiciones (dos iones padre y dos iones hijo) para hacer la confirmación, siendo un método altamente selectivo y confiable. La incertidumbre de medición es conforme con SANCO/12571/2013E13, de esta manera, se analizaron 490 i.a. (Fytolab, 2015), que incluyeron los de la tabla 2-1.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos del agua, las mediciones de Conductividad eléctrica ($\mu\text{s ml}^{-1}$), pH (Log), OD (mg l^{-1}) y Saturación de Oxígeno (%) se realizaron *in situ* con sonda multipropósito (oxímetro, potenciómetro y conductímetro) marca Mettler Toledo Y.S I. Los análisis de Alcalinidad ($\text{mg l}^{-1} \text{CaCO}_3$), Dureza ($\text{mg l}^{-1} \text{CaCO}_3$) y CO_2 (mg l^{-1}), también se llevaron a cabo *in situ* siguiendo los procedimientos estándar para

exámenes de aguas y aguas residuales (Standard Methods, 2005). Para determinación de la Demanda Química de Oxígeno - DQO (mg l^{-1}), las muestras fueron fijadas con H_2SO_4 en campo y llevadas a laboratorio, donde se empleó el método colorimétrico de reflujo cerrado (SM 5220 D) (Standard Methods, 2005). Finalmente, para el análisis de microorganismos coliformes en aguas, se emplearon muestras contenidas en viales de vidrio tomadas directamente en campo y llevadas refrigeradas a laboratorio donde se empleó la técnica de conteo en placa Petrifilm 3M, siguiendo el protocolo propuesto por Cossetini (2006).

Por último, para los plaguicidas detectados en los muestreos, se recopilaron las propiedades fisicoquímicas relevantes en el análisis de destino ambiental de cada i.a., además los LMR y legislación, consultando las bases de datos internacionales de *Codex Alimentarius (FAO/WHO)*, *EU Pesticide Database*, *Pesticide Properties Database (PPDB)* y *PAN Pesticide Database, Integrated Risk Information System (IRIS)* y nacionales del Instituto Colombiano Agropecuario ICA, y la Autoridad de Licencias Ambientales ANLA. El tratamiento estadístico de los datos se realizó mediante métodos descriptivos, con medidas de tendencia central, mediante el software estadístico R (R Core Team, 2017).

2.3 Resultados

Residuos de plaguicidas en frutos de tomate

En el muestreo de frutos listos para comercialización del año 2011, en total se detectaron 13 i.a., 10 i.a. (siete insecticidas y tres fungicidas) en los agroecosistemas a campo abierto, siendo los más frecuentes acefato y carbofuran, mientras en los sistemas de producción bajo invernadero se detectaron 11 i.a. (cinco insecticidas y seis fungicidas), siendo los más frecuentes pirimetanil, carbendazim y acefato (Tabla 2-2). Del total de las muestras analizadas se detectó y cuantificó al menos un i.a. en el 67,3% de las muestras provenientes de campo abierto y en el 67,9% de las muestras procedentes de invernaderos. A su vez, el 55,7 % de las muestras de campo abierto superaron los LMR para los insecticidas acefato, carbofuran, metomilo y tiociclam, por su parte, el 25,9% de las muestras provenientes de invernaderos superaron los LMR en los insecticidas acefato, metomilo y tiociclam, así como los fungicidas cimoxanil, hexaconazol.

Tabla 2-2. Residuos de plaguicidas en muestras de frutos de tomate provenientes de las regiones de estudio en el muestreo de 2011.

Ingrediente activo	Campo abierto					Invernadero				
	M.P	%	Media mg Kg ⁻¹	Rango mín-máx	>LMR ^{a,b}	M.P	%	Media mg Kg ⁻¹	Rango mín-máx	>LMR ^{a,b}
Acefato	16	30,8	0,08	0,04-0,34	16 ^b	29	11,7	0,07	0,04-0,42	29 ^b
Carbendazim	2	3,8	0,01	0,01	0	58	23,4	0,03	0,01-0,27	0
Carbofuran	10	19,2	0,03	0,02-0,04	10 ^{a,b}	-	-	-	-	-
Cimoxanil	-	-	-	-	-	1	0,4	1,05	1,05	1 ^{a,b}
Dimetomorf	-	-	-	-	-	16	6,5	0,01	0,01	0
Hexacononazol	-	-	-	-	-	13	5,2	0,66	0,10-2,23	13 ^{a,b}
Imidacloprid	1	1,9	0,28	0,28	0	27	10,9	0,32	0,28-0,485	0
Indoxacarb	3	5,8	0,07	0,02-0,14	0	18	7,2	0,03	0,01-0,11	0
Metalaxilo	2	3,8	0,075	0,07-0,08	0	20	8,1	0,02	0,01-0,09	0
Metomilo	1	1,9	0,06	0,06	1 ^b	5	2,0	0,21	0,02-0,24	5 ^b
Metoxifenoazida	4	7,7	0,03	0,03	0	-	-	-	-	-
Pirimetanil	4	7,7	0,01	0,01	0	66	26,6	0,03	0,01-0,35	0
Tiociclam	2	3,8	0,18	0,15-0,21	2 ^{a,b}	7	2,8	0,14	0,10-0,22	7 ^{a,b}

^a Según *Codex Alimentarius* (FAO/WHO, 2019). ^b Según EU Pesticide database (EU, 2019). **M.P.:** Muestras positivas, **Mín-Máx:** Mínimo-Máximo, **>LMR:** Excede los LMR. Adaptado de Bojacá et al. (2013).

Por otra parte, en el muestreo de 2013 realizado sobre frutos completos en punto de cosecha, en total se detectaron 11 i.a., seis i.a. (dos insecticidas y cuatro fungicidas) en los agroecosistemas a campo abierto, siendo los más frecuentes azoxistrobin y dimetomorf, mientras en los agroecosistemas bajo invernadero se detectaron seis i.a. (cuatro insecticidas y dos fungicidas), siendo los más frecuentes metalaxilo y tiociclam (Tabla 2-3).

Del total de las muestras analizadas se detectó y cuantificó al menos un i.a. en el 75% de las muestras provenientes de campo abierto y en el 100% de las muestras procedentes de invernadero. A su vez, el 75% de las muestras de campo abierto superaron los LMR en los insecticidas carbofuran y metomilo, así como los fungicidas difenoconazol y dimetomorf, por su parte, el 81,2% de las muestras provenientes de invernaderos superaron los LMR en los insecticidas acefato, indoxacarb y tiociclam.

Tabla 2-3. Residuos de plaguicidas en muestras de frutos de tomate provenientes de las regiones de estudio en el muestreo de 2013.

Ingrediente activo	Campo abierto					Invernadero				
	M.P.	%	Media mg Kg ⁻¹	Rango mín-máx	>LMR ^{a,b}	M.P.	%	Media mg Kg ⁻¹	Rango mín-máx	>LMR ^{a,b}
Acefato	-	-	-	-	-	4	25	0,02	0,015-0,03	4 ^b
Azoxistrobin	8	50	0,01	0,003-0,01	0	4	25	0,03	0,03-0,04	0
Carbendazim	4	25	0,21	0,19-0,23	0	-	-	-	-	-
Carbofuran	4	25	0,05	0,052-0,053	4 ^{a,b}	-	-	-	-	-
Difenoconazol	4	25	0,51	0,45-0,59	1 ^a	-	-	-	-	-
Dimetomorf	8	50	0,03	0,02-0,05	8 ^a	-	-	-	-	-
Indoxacarb	-	-	-	-	-	4	25	0,47	0,33-0,71	1 ^{a,b}
Metalaxilo	-	-	-	-	-	8	50	0,01	0,008-0,01	0
Metomilo	4	25	0,06	0,05-0,06	4 ^b	-	-	-	-	-
Spinosad A	-	-	-	-	-	4	25	0,05	0,03-0,05	0
Tiociclam	-	-	-	-	-	8	50	0,43	0,105-0,79	8 ^{a,b}

^a Según *Codex Alimentarius* (FAO/WHO, 2019). ^b Según EU Pesticide database (EU, 2019). **M.P.:** Muestras positivas, **Mín-Máx:** Mínimo-Máximo, **>LMR:** Excede los LMR. Adaptado de Ayarza (2014).

En los dos momentos de muestreo de frutos y en las dos regiones, se detectó y cuantificó en total 16 i.a., 12 en los sistemas de producción a campo abierto y 13 en los agroecosistemas bajo invernadero, siendo comunes en los dos agroecosistemas los i.a.: acefato, azoxistrobin, carbendazim, imidacloprid, indoxacarb, metalaxilo, metomilo, pirimetanil y tiociclam. A su vez, teniendo en cuenta los dos momentos de muestreo 2011 y 2013, respectivamente, en la producción a campo abierto se encontraron, en las dos ocasiones, los i.a. carbendazim, carbofuran y metomilo, en mayor concentración carbofuran y carbendazim respecto al primer muestreo, además, se detectó azoxistrobin, defenoconazol y dimetomorf como adicionales respecto al primer muestreo. En relación a la producción bajo invernadero se detectaron, en los dos momentos de muestreo, los i.a. acefato, indoxacarb, metalaxilo y tiociclam, en mayor concentración indoxacarb y tiociclam en el segundo muestreo respecto al primero, detectándose como adicionales azoxistrobin y spinosad, respecto al primer muestreo (Tablas 2-2 y 2-3).

Como complemento, se realizó el análisis de residuos de plaguicidas en la cáscara y pulpa de frutos, encontrando residuos en los dos conjuntos de tejidos, específicamente los i.a. carbendazim, carbofuran, metomilo, metalaxilo y tiociclam, de manera simultánea en cáscara y pulpa, a su vez, acefato, dimetomorf e indoxacarb se encontraron solamente en la pulpa, mientras, azoxistrobin y spinosad exclusivamente en la cáscara (Tabla 2-4).

Tabla 2-4. Residuos de plaguicidas en muestras de cáscara y pulpa de frutos provenientes de regiones de estudio en el muestreo de 2013. Basado en Ayarza (2014).

Ingrediente activo	Campo abierto			Invernadero		
	Promedio-Cáscara mg Kg ⁻¹	Promedio - Pulpa mg Kg ⁻¹	Promedio - Fruto mg Kg ⁻¹	Promedio -Cáscara mg Kg ⁻¹	Promedio -Pulpa mg Kg ⁻¹	Promedio -Fruto mg Kg ⁻¹
Acefato	-	-	-	-	0,02	0,02
Azoxistrobin	0,01	-	0,01	0,03	-	0,03
Carbendazim	0,19	0,02	0,21	-	-	-
Carbofuran	0,04	0,01	0,05	-	-	-
Difenoconazol	0,51	-	0,51	-	-	-
Dimetomorf	-	0,03	0,03	-	-	-
Indoxacarb	-	-	-	-	0,47	0,47
Metalaxilo	-	-	-	0,01	0,01	0,01
Metomilo	0,03	0,03	0,06	-	-	-
Spinosad A	-	-	-	0,05	-	0,05
Tiociclam	-	-	-	0,72	0,13	0,43

A su vez, teniendo en cuenta las detecciones múltiples de plaguicidas, se llegaron a encontrar hasta cuatro i.a. diferentes en una sola muestra, incluso en el segundo muestreo en los frutos provenientes de campo abierto, cuando hubo detección, siempre fue de más de dos i.a. por muestra. El comparativo de frecuencias se encuentra en la tabla 2-5 donde se puede ver que es común encontrar más de un i.a. por muestra de frutos.

Tabla 2-5. Número de muestras con múltiples residuos de plaguicidas en muestras de frutos provenientes de regiones de estudio en el muestreo de 2013.

Momento de muestreo	Sistema de producción	Número de ingredientes activos por muestra				
		0	1	2	3	4
2011	Invernadero	68	64	52	20	8
	Campo abierto	17	27	6	2	0
2013	Invernadero	0	4	8	4	0
	Campo abierto	4	0	4	8	0

Residuos de plaguicidas en hojas de tomate

En las muestras de hojas de tomate analizadas se detectaron en total 12 i.a., 9 i.a. en muestras provenientes de agroecosistemas a campo abierto y 5 i.a. en muestras provenientes de agroecosistemas bajo invernadero (Tabla 2-6). Se encontró al menos un plaguicida en la totalidad de las muestras de hojas provenientes de campo abierto y en el 66,7% de las muestras de hojas provenientes de invernaderos. A su vez, se encontraron en promedio 3,5 i.a. por muestra proveniente de campo abierto, con un máximo de 7 i.a.,

mientras en las muestras provenientes de invernaderos, se encontró en promedio 1,6 i.a., siendo 3,0 el número más alto de i.a. encontrados.

Tabla 2-6. Residuos de plaguicidas en muestras de hojas de plantas de tomate provenientes de las regiones de estudio. Adaptado de Garzón (2014).

Ingrediente Activo	Campo Abierto				Invernadero			
	Muestras Positivas	%	Media mg*kg ⁻¹	Rango mg*kg ⁻¹	Muestras Positivas	%	Media mg*kg ⁻¹	Rango mg*kg ⁻¹
Azoxistrobin	4	25	0,02	0,017-0,02	-	-	-	-
Carbendazim	8	50	0,58	0,02-1,29	-	-	-	-
Carbofuran	4	25	0,32	0,29-0,36	-	-	-	-
3OH_carbofuran	8	50	0,35	0,02-0,70	-	-	-	-
Clorfenapir	-	-	-	-	4	25	0,11	0,11
Difenoconazol	4	25	0,72	0,67-0,77	-	-	-	-
Dimetomorf	16	100	1,19	0,005-3,33	3	18,8	0,03	0,03-0,04
Indoxacarb	4	25	23,89	22,25-24,81	-	-	-	-
Metalaxilo	-	-	-	-	4	25	0,002	0,002
Metomilo	4	25	0,16	0,15-0,17	4	25	0,29	0,24-0,35
Tebuconazol	4	25	0,34	0,31-0,38	-	-	-	-
Tiociclam	-	-	-	-	4	25	0,17	0,15-0,21

El i.a. dimetomorf estuvo en la totalidad de las muestras de hojas provenientes de agroecosistemas a campo abierto. A su vez, los i.a. dimetomorf y metomilo, fueron detectados en las hojas de tomate provenientes de ambos agroecosistemas, y los i.a. clorfenapir y tiociclam, fueron detectados exclusivamente en las hojas provenientes de invernaderos. Finalmente, los i.a. con mayores concentraciones correspondieron a dimetomorf e indoxacarb, con concentraciones promedio de 1,19 mg kg⁻¹ y 23,89 mg kg⁻¹, respectivamente, siendo indoxacarb el i.a. con mayor concentración con 24,81 mg kg⁻¹ en una muestra.

Residuos de plaguicidas en suelos

En cuanto a los compartimientos ambientales físicos de los agroecosistemas evaluados, en total se detectaron 15 i.a. en las muestras de suelos provenientes de las dos regiones, 14 en los agroecosistemas a campo abierto, y cuatro en los agroecosistemas bajo invernadero (Tabla 2-7). Encontrándose al menos un i.a. en la totalidad de las muestras de suelos a campo abierto y en el 66,7% de las muestras de suelos bajo invernadero.

Tabla 2-7. Residuos de plaguicidas en muestras de suelo provenientes de las regiones de estudio. Adaptado de Garzón (2014).

Ingrediente Activo	Campo Abierto				Invernadero			
	Muestras Positivas	%	Media mg kg ⁻¹	Rango mg kg ⁻¹	Muestras Positivas	%	Media mg kg ⁻¹	Rango mg kg ⁻¹
Azoxistrobin	16	100	1,35	1,14-1,48	-	-	-	-
Benalaxilo	4	25	0,42	0,415-0,42	-	-	-	-
Carbendazim	12	75	7,10	0,50-22,03	-	-	-	-
Carbofuran	4	25	18,38	16,445-20,74	-	-	-	-
3OH_carbofuran	4	25	0,81	0,77-0,835	-	-	-	-
Cimoxanil	4	25	23,17	16,33-26,04	-	-	-	-
Difenoconazol	8	50	2,20	0,90-3,85	-	-	-	-
Dimetomorf	16	100	29,14	17,14-44,45	4	25	0,06	0,05-0,08
Indoxacarb	4	25	15,48	11,91-18,13	-	-	-	-
Metalaxilo	12	75	0,385	0,35-0,43	4	25	0,18	0,05-0,555
Metomilo	16	100	2,05	0,745-4,74	4	25	0,09	0,015-0,145
Pirimicarb	4	25	2,79	2,58-3,02	-	-	-	-
Tebuconazol	7	43,8	15,28	3,22-25,23	-	-	-	-
Tiabendazol	5	31,3	1,26	1,19-1,31	-	-	-	-
Tiociclam	-	-	-	-	4	25	0,03	0,030

En las muestras de suelo de la provincia Guantán se encontraron hasta 11 i.a. por muestra, siendo 7,3 el promedio, mientras en las muestras de suelo de la región de Ricaurte Alto, se encontraron hasta 2,0 i.a. por muestra, siendo 1,3 el promedio. Los i.a. azoxistrobin, dimetomorf y metomilo estuvieron presentes en la totalidad de las muestras analizadas provenientes de campo abierto. Adicionalmente, los i.a. comunes a las dos regiones fueron dimetomorf, metelaxilo y metomilo, mientras tiociclam fue el único i.a. exclusivo en suelos bajo invernadero. Por último, los i.a. con mayores concentraciones correspondieron a carbofuran, cimoxanil, dimetomorf, indoxacarb y tebuconazol, con concentraciones entre 15,28 mg kg⁻¹ y 29,14 mg kg⁻¹ en promedio, siendo dimetomorf el i.a. con mayor concentración del estudio con 44,45 mg kg⁻¹ en una muestra.

Residuos de plaguicidas en aguas y sedimentos

Mediante la sensibilidad de las metodologías de extracción, cromatográficas y de detección empleadas, no se detectaron residuos de plaguicidas en las muestras de agua ni de sedimento, provenientes de las corrientes y cuerpos de agua evaluados de la provincia Guantán y la región de Ricaurte Alto. Los demás parámetros determinados para las dos regiones, se tuvieron en cuenta para el análisis de afinidad de los plaguicidas con las corrientes de agua (Tablas 2-8 y 2-9).

Por otro lado, se contemplaron los parámetros establecidos por legislación colombiana sobre recursos hídricos pertinentes (Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura, el Decreto 1575 de 2007 del Ministerio de Protección Social y la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Ambiente), que permiten evaluar la calidad del agua disponible en las regiones para los agroecosistemas de tomate.

Es así como, los valores de pH para aguas y sedimentos, en las dos regiones presentaron valores óptimos, que según la legislación deben estar comprendidos entre 6,5 y 9,0, siendo en promedio entre 6,58 y 7,68 en los ríos y quebradas de la provincia Guanetá, y entre 6,61 y 8,92 en los ríos de la región de Ricaurte Alto, evidenciándose normalidad en el equilibrio ácido-base (Tablas 2-8 y 2-9).

Por su parte, la conductividad se establece como óptima cuando esta por debajo de $1.000 \mu\text{s ml}^{-1}$, valores superiores al 50% indican incrementos en sólidos disueltos, que se puede deber a descargas de sustancias aloctonas contaminantes, en este sentido en la quebrada Curití en Santander, en época de lluvias, así como en el río Leyva en Boyacá en época seca, se registraron valores promedio superiores de $1.966,75 \mu\text{s ml}^{-1}$ y $2.202,50 \mu\text{s ml}^{-1}$, respectivamente (Tablas 2-8 y 2-9). Estas descargas no necesariamente son debidas a plaguicidas, pero sí a intensas actividades antrópicas, sin embargo, en general los promedios de conductividad en las dos regiones se consideran de un agua de buena calidad (Jenkins et al., 1983).

Tabla 2-8. Promedios de los parámetros evaluados en muestras de agua y sedimento en corrientes de agua de la provincia Guanetá.

Parámetro (Unidad)	Época de lluvias (Abril-Mayo)				Época seca (Julio-Agosto)			
	Quebrada Curití	Quebrada La Tolosa	Río Fonce	Río Mogoticos	Quebrada Curití	Quebrada La Tolosa	Río Fonce	Río Mogoticos
pH Agua	7,25	6,76	6,98	7,02	6,87	6,88	7,68	7,34
pH Sedimento	6,74	6,58	6,44	6,44	6,76	7,54	7,51	7,35
Conductividad ($\mu\text{s ml}^{-1}$)	1.966,75	983,25	768,50	768,50	31,25	77,86	101,53	90,25
O ₂ Disuelto (mg l ⁻¹)	6,60	6,34	6,51	6,49	6,25	6,30	6,56	6,61
Saturación de O ₂ (%)	94,07	91,78	93,15	93,53	90,6	94,23	93,40	96,15
Alcalinidad	5,13	16,00	30,75	23,25	29,69	34,62	9,03	11,18

(mg l ⁻¹ CaCO ₃)								
Dureza (mg l ⁻¹ CaCO ₃)	10,35	28,98	52,48	47,38	24,75	35,45	46,15	44,53
CO ₂ (mg l ⁻¹)	3,52	10,63	6,25	5,14	7,70	3,48	8,80	8,80
Coliformes totales (UFC 100 cm ⁻³)	480	878	1.115	557,25	226,75	648,25	613,50	769,75
<i>E. coli</i> (UFC 100 cm ⁻³)	1,25	2,25	48,00	11,25	0,75	8,75	43,5	17,25
DQO (mg l ⁻¹)	10	8	16	6	6	6	15	9
Plaguicidas agua-sedimento (mg l ⁻¹)	< LD*	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

*LD: Límite de Detección.

Las condiciones de OD encontradas en las dos regiones son adecuadas para la supervivencia de los organismos acuáticos, con valores promedio entre 4,85 mg l⁻¹ y 7,62 mg l⁻¹, sin embargo, no es admisible para ecosistemas de conservación que deberían estar por debajo de 4,0 mg l⁻¹. A su vez, la Saturación de Oxígeno es adecuada para la vida acuática encontrándose en todos los casos valores superiores al 70% (Tablas 2-8 y 2-9).

La alcalinidad mide la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, siendo el valor máximo aceptable es de 200 mg l⁻¹ CaCO₃, el cual no fue superado en ningún caso. Por su parte, la dureza del agua se establece con un máximo aceptable de 300 mg l⁻¹ CaCO₃, valor que solo fue superado en promedio en el río Leyva en época seca. En términos generales, el agua de las corrientes de la provincia Guanentá se pueden considerar como blandas y las de la región de Ricaurte Alto moderadamente duras a duras, situación que se debe tener en cuenta para aspectos de gestión del agua en los agroecosistemas de tomate.

Tabla 2-9. Promedios de los parámetros evaluados en muestras de agua y sedimento en corrientes de agua de la región de Ricaurte Alto.

Parámetro (Unidad)	Época de lluvias (Abril-Mayo)				Época seca (Julio-Agosto)			
	Río Leyva	Río Moniquira	Río Sutamarchán	Río Funza	Río Leyva	Río Moniquira	Río Sutamarchán	Río Funza
pH Agua	7,54	8,15	7,85	8,92	7,08	7,12	6,61	8,20
pH Sedimento	7,24	7,61	7,75	8,17	6,86	6,67	6,64	7,39
Conductividad	174,88	190,63	303,50	205,25	2.202,50	303,25	369,25	238,25

($\mu\text{s ml}^{-1}$)								
O ₂ Disuelto (mg l^{-1})	6,36	5,09	4,85	6,83	6,95	7,62	6,09	6,53
Saturación de O ₂ (%)	92,55	77,45	70,80	101,40	109,18	103,10	86,0	100,95
Alcalinidad ($\text{mg l}^{-1} \text{CaCO}_3$)	26,25	40,75	61,0	35,00	25,43	41,63	49,50	24,48
Dureza ($\text{mg l}^{-1} \text{CaCO}_3$)	78,25	80,0	91,0	85,25	320,20	155,0	210,08	127,70
CO ₂ (mg l^{-1})	2,75	1,10	1,65	0,44	87,34	8,10	14,30	0
Coliformes totales (UFC 100 cm^{-3})	375,50	354,0	342,25	88,75	317,00	214,75	876,0	73,25
<i>E. coli</i> (UFC 100 cm^{-3} .)	3,0	0,50	2,0	0,25	0,25	0	8,0	0,25
DQO (mg l^{-1})	6	8	18	12	14	18	16	8
Plaguicidas agua- sedimento (mg l^{-1})	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

*LD: Límite de Detección. Adaptado de Aux (2016).

En cuanto al CO₂, se plantea un rango óptimo para la vida acuática entre 5,0 mg l^{-1} y 10,0 mg l^{-1} (Pardo et al., 2008), registrándose valores superiores a 10,0 mg l^{-1} en la quebrada La Tolosa en Santander en época de lluvias, así como en los ríos Leyva y Sutamarchán en Boyacá en época seca, y estuvieron por debajo de 5,0 mg l^{-1} en la quebrada Curití en época de lluvias y en La Tolosa en época seca en Santander y las cuatro corrientes evaluadas en época de lluvias en Boyacá, además del río Funza en la misma región en época seca (Tablas 2-8 y 2-9).

Los valores de DQO son adecuados, ya que para aguas contaminadas debe superar 20 mg l^{-1} . Respecto a los parámetros microbiológicos, en general en las dos regiones y épocas climáticas del año, el agua es apta para actividades agrícolas y pecuarias, dado que la presencia de coliformes totales estuvo por debajo del máximo permitido de 5.000 UFC 100 cm^{-3} , en todas las muestras. Por último, la presencia de coliformes y *E. coli* en la totalidad de muestras evaluadas, determina que el agua no es apta para consumo humano.

En la tabla 2-10 se presenta un resumen de la presencia de residuos de plaguicidas detectados en los diferentes compartimentos ambientales de las regiones estudiadas:

Tabla 2-10. Presencia (+) y ausencia (-) de residuos de plaguicidas detectados en frutos, hojas, suelos, agua y sedimento en regiones productoras de tomate de Santander y Boyacá.

Ingrediente Activo	Campo abierto (Santander)					Invernadero (Boyacá)				
	Frutos	Hojas	Suelo	Agua	Sedimento	Frutos	Hojas	Suelo	Agua	Sedimento
Acefato	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Azosxistrobin	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Benalaxilo	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Carbendazim	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Carbofuran	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
3OH_carbofuran	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Cimoxanil	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Clorfenapir	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Difenoconazol	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Dimetomorf	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-
Hexaconazol	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Imidacloprid	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Indoxacarb	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Metalaxilo	+	-	+	-	-	+	+	+	-	-
Metomilo	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-
Metoxifenocida	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pirimetanil	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Pirimicarb	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Spinosad A	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Tebuconazol	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Tiabendazol	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Tiociclam	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-
Recuento	13	9	14	0	0	13	5	4	0	0

Es así como, se detectaron en total 22 i.a. distribuidos en los frutos, hojas y suelos de las regiones de estudio, no se detectaron en agua ni sedimentos, de las corrientes tributarias y principales de las regiones. Se resalta que el insecticida metomilo y el fungicida dimetomorf fueron detectados en frutos, hojas y suelos en las dos regiones, por su parte, que los i.a. acefato, spinosad, hexaconazol e imidacloprid, se encontraron exclusivamente en frutos, a su vez, el i.a. clorfenapir se detectó únicamente en hojas, mientras, los i.a. benalaxilo, pirimicarb y tiabendazol solamente en suelos. En términos generales hubo mayor detección de i.a. en los agroecosistemas a campo abierto, principalmente en suelos y hojas, más no en frutos (Tabla 2-10).

Según la evidencia, en la escala regional de los cuerpos de agua, no hubo detecciones de residuos de plaguicidas, lo cual conlleva a centrar el análisis a la escala de la finca. Aunque el hallazgo es positivo con relación a los ecosistemas acuáticos, es preciso determinar las posibles causas que enmarcan el destino final de los plaguicidas detectados en los demás compartimientos, relacionadas con las propiedades físico-químicas de los i.a., en este sentido en la tabla 2-11, se presentan dichas propiedades.

Tabla 2-11. Propiedades físico-químicas de los plaguicidas detectados en las regiones de estudio y su afinidad.

Ingrediente Activo	Sol. Agua* (mg l ⁻¹)	Kow (LogP)	Pres. Vap. (mPa)	K. Henry (Pa.m ³ mol ⁻¹)	GU S	V.m. suelo (días)	Dis. Planta (días)	Koc	Fot. (días)	Hidr. (días)	Agua-Sed. (días)	F. Agua (días)	Afin.
Acefato	790.000 A	-0,85 B	0,226 BV	5,1x10 ⁻⁰⁸ NV	1,14 BL	3 NP	4,8	302 MM	2 MR	50 MP	n.r.	n.r.	As-A-P
Azoxistrobin	6,7 B	2,5 B	1,10x10 ⁻⁰⁷ BV	7,40x10 ⁻⁰⁹ NV	2,65 ET	180,7 P	8,4	589 LM	8,7 MR	n.r.	205 L	6,1 MR	S-P
Benalaxilo	28,6 B	3,54 A	0,572 BV	6,50x10 ⁻⁰³ NV	1,91 ET	66,8 MP	3,2	4.998 NM	n.r.	365 AP	168,2 L	38 E	As-A-S-P-Es
Carbendazim	8,0 B	1,48 B	0,09 BV	3,60x10 ⁻⁰³ NV	2,53 ET	22 NP	5,6	225 MM	n.r.	350 P	33,7 MR	7,9 MR	S-As-P
Carbofuran	322 M	1,8 B	0,08 BV	5,0x10 ⁻⁰⁵ NV	2,28 ET	29 NP	4,9	22 M	71 E	37 MP	9,7 R	6,1 MR	As-P
Cimoxanil	780 A	0,67 B	0,15 BV	3,80x10 ⁻⁰⁵ NV	0,34 BL	3,5 NP	1,2	43,6 M	1,7 MR	1,1 NP	0,3 R	0,3 R	A-P
Clorfenapir	0,11 B	4,83 A	9,81x10 ⁻⁰³ BV	5,81x10 ⁻⁰⁴ NV	0,01 BL	1,4 NP	2,8	12.000 NM	6,2 MR	n.r.	n.r.	n.r.	S-P
Difenoconazol	15,0 B	4,36 A	3,33x10 ⁻⁰⁵ BV	9,0x10 ⁻⁰⁷ NV	0,90 BL	318 P	7,4	3.760 LM	n.r.	1.730 AP	1.053 E	3 MR	As-S-P-Es
Dimetomorf	28,95 B	2,68 B	9,7x10 ⁻⁰⁴ BV	2,5x10 ⁻⁰⁵ NV	2,56 ET	72,7 MP	5,4	1.360 LM	97 E	70 MP	38 MR	10 MR	As-S-P-Es
Hexaconazol	18 B	3,9 A	0,018 BV	3,33x10 ⁻⁰⁴ NV	2,05 ET	122 P	5,5	1.040 LM	10 MR	n.r.	112 L	112 E	S-P-Es
Imidacloprid	610 A	0,57 B	4,0x10 ⁻⁰⁷ BV	1,7x10 ⁻¹⁰ NV	3,74 AL	191 P	2,5	225 MM	0,2 R	30 MP	129 L	30 E	As-S-P
Indoxacarb	0,2 B	4,65 A	9,8x10 ⁻⁰⁶ BV	6,00x10 ⁻⁰⁵ NV	0,72 BL	17 NP	3,4	4.483 NM	4,5 MR	17,6 NP	6 R	1,4 MR	S-P
Metalaxilo	8.400 A	1,75 B	0,75 BV	1,60x10 ⁻⁰⁵ NV	36,0 ET	38,7 MP	9,2	162 MM	n.r.	106 P	56 MR	56 E	As-A-S-P
Metomilo	55.000 A	0,09 B	0,72 BV	2,13x10 ⁻⁰⁶ NV	2,19 ET	46 MP	3,0	43 M	n.r.	30 MP	3,7 R	2,9 MR	As-A-S-P
Metoxifenozida	3,3 B	3,72 A	1,33x10 ⁻⁰² BV	1,64x10 ⁻⁰⁴ NV	4,35 AL	680 AP	5,3	402 MM	n.r.	30 MP	208,6 L	n.r.	As-S-P
Pirimetanil	110 M	2,84 M	1,1 BV	2,2x10 ⁻⁰³ NV	2,47 ET	31,4 MP	6,1	355,7 MM	n.r.	n.r.	81,0 MR	6,7 MR	As-A-S-P
Pirimicarb	3.100 A	1,7 B	0,43 BV	3,30x10 ⁻⁰⁵ NV	2,63 ET	86 MP	4,9	388 MM	6,0 MR	n.r.	168 L	29,6 L	As-A-S-P
Spinosad A	7,6 B	4,1 A	1,00x10 ⁻⁰⁵ BV	1,89x10 ⁻⁰⁷ NV	0,63 BL	14 NP	49	34.600 NM	0,9 R	n.r.	n.r.	n.r.	S-P
Tebuconazol	36 B	3,7 A	1,30x10 ⁻⁰³ BV	1,00x10 ⁻⁰⁵ NV	2,85 AL	47,1 MP	2,3	769 LM	n.r.	28 NP	365 E	42,6 E	As-S-P
Tiabendazol	30 B	2,39 B	5,30x10 ⁻⁰⁴ BV	3,70x10 ⁻⁰⁶ NV	2,04 ET	724 AP	n.r.	3.983 LM	1,2 MR	203 P	4 R	1,6 MR	As-S-P-Es
Tiociclam	16.300 A	-0,07 B	0,545 BV	1,8x10 ⁻⁰⁶ NV	0,00 BL	6 NP	n.r.	20 M	2 MR	6 NP	n.r.	n.r.	A-P

***Sol. Agua (mg l⁻¹)**: Solubilidad en agua (A: Alta / M: Moderada / B: Baja); **Kow (LogP)**: Coeficiente de partición Octanol-Agua (A: Alto / M: Moderado / B: Bajo); **Pres. Vap. (mPa)**: Presión de vapor (BV: Baja Volatilidad); **K. Henry (Pa.m³mol⁻¹)**: Constante Ley de Henry (NV: No Volátil); **GU S**: Índice potencial de lixiviación calculado (AL: Alta Lixiviación / ET: Estado de Transición / BL: Baja Lixiviación); **V.m. suelo (días)**: Vida media en suelo-degradación en suelo DT50 (AP: Altamente Persistente / P: Persistente / MP: Moderadamente Persistente / NP: No Persistente); **Dis. Planta (días)**: Tasa de disipación en plantas RL50; **Koc**: Coeficiente de sorción del suelo (M: Móvil / MM: Moderadamente Móvil / LM: Ligeramente Móvil / NM: No Móvil), n.r.: No Reportado; **Fot. (días)**: Fotólisis en Agua DT50 – Días a 20°C pH 7 (R: Rápida / MR: Moderadamente Rápida / E: Estable); **Hidr. (días)**: Hidrólisis en Agua DT50 – Días a 20°C pH 7 (AP: Altamente Persistente / P: Persistente / MP: Moderadamente Persistente / NP: No Persistente); **Agua-Sed. (días)**: Agua-sedimento DT50 (R: Rápida / MR: Moderadamente Rápida / L: Lenta / E: Estable); **F. Agua (días)**: Fase de agua sola DT50 (MR: Moderadamente Rápida / L: Lenta / E: Estable); **Afin.:** Afinidad (As:

Agua subterránea-potencial / A: Aire-moderado / S: Suelo / P: Plantas / Es: Escorrentía-alto potencial).
Fuente: Elaborado por el autor, información de cada ingrediente activo de bases de *EU, PPDB, PAN, IRIS*.

Teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas de cada i.a. detectado, además de supuestos como: cuando la solubilidad en agua es superior a $3,0 \text{ mg l}^{-1}$, o bien la vida media en el suelo es superior a 690 días, o la fotólisis o hidrólisis superior a 14 días, o un Koc inferior a 1.900, se espera una contaminación potencial de agua subterránea; también que, según el sistema transporte por partículas ligadas propuesto por Goss and Wauchope (1990), la mayoría de los i.a. que son desde moderados hasta altamente persistentes, se mueven por escorrentía como máximo un 0,5% por hectárea de suelo, en un escenario estándar de 1,0 m de profundidad. Es así como, en la última columna de la tabla 2-11, se presenta la afinidad posible con diferentes compartimientos ambientales en las categorías: potencial para agua subterránea (As), moderada para aire (A), potencial para suelo (S), potencial para plantas (P) y alto potencial de escorrentía (Es).

De esta manera, en términos generales los plaguicidas se detectaron en sus compartimientos ambientales afines, con casos excepcionales como los i.a. cimoxanil y carbofuran, que a pesar de no tener una afinidad por el suelo, si fueron detectados en este compartimiento, que podría explicarse por el momento de muestreo o bien la presión del uso de estos plaguicidas. Por su parte, los i.a. acefato, benalaxilo, cimoxanil, metalaxilo, metomilo, pirimetanil, pirimicarb y tiociclam, tienen una afinidad moderada hacia el aire. A su vez, los i.a. benalaxilo, difenoconazol, dimetomorf, hexaconazol y tiabendazol tienen un alto potencial de moverse por escorrentía, que según los supuestos no supera el 0,5% en una hectárea. Por otra parte, 14 de los 22 i.a. detectados presentan potencial de contaminación de aguas subterráneas (Tabla 2-11), es decir que la mayoría de plaguicidas detectados tendrían mayor posibilidad de moverse de forma vertical en el suelo y no hacia las corrientes de agua evaluadas. Cabe resaltar que el destino ambiental depende de la interacción de las propiedades de los plaguicidas con las condiciones climáticas, edafológicas y de manejo propias de cada región. Finalmente, reuniendo la información de los seguimientos (Cap 1.), se comparó la dosis aplicada, con la recomendada, calculando los excesos y dónde se encontraron residuos (Tabla 2-12).

Tabla 2-12. Exceso de aplicaciones y compartimientos con residuos de plaguicidas.

Sistema	Plaguicida	Dosis***	Aplicaciones de plaguicidas*	Residuos de plaguicidas**
---------	------------	----------	------------------------------	---------------------------

Productivo	(g l ⁻¹)	Dosis****	Aplicado	Exceso	Exceso	Suelo	Hoja	Frutos	>LMR ^{a,b}	
		(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(%)	(g kg ⁻²)	(g kg ⁻²)	(g kg ⁻²)		
Campo Abierto	Acefato	0,76	0,015	0,050	0,035	228,9	-	-	8,0E-5	Si ^b
	Azoxistrobin	0,87	0,017	0,090	0,073	417,2	1,35E-3	2,0E-5	1,0E-5	No
	Carbendazim	1,07	0,021	0,110	0,089	414,0	7,10E-3	5,80E-4	1,10E-4	No
	Carbofuran	1,25	0,025	0,030	0,005	20,0	1,84E-2	3,20E-4	4,0E-5	Si ^{a,b}
	Difenoconazol	0,69	0,014	0,080	0,066	479,7	2,20E-3	7,20E-4	5,10E-4	Si ^b
	Dimetomorf	0,92	0,018	0,110	0,092	497,8	2,91E-2	1,19E-3	3,0E-5	Si ^b
	Imidacloprid	0,81	0,016	0,080	0,064	393,8	-	-	2,80E-4	No
	Indoxacarb	0,93	0,019	0,060	0,041	222,6	1,55E-2	2,38E-2	7,0E-5	No
	Metalaxilo	2,47	0,049	0,230	0,181	365,6	3,85E-4	-	7,50E-5	No
	Metomilo	0,93	0,019	0,090	0,071	383,9	2,05E-3	1,60E-4	6,0E-5	Si ^b
	Pirimetanil	1,26	0,025	0,100	0,075	296,8	-	-	1,0E-5	No
	Tebuconazol	0,93	0,019	0,090	0,071	383,9	1,53E-3	3,40E-4	-	No
	Tiabendazol	0,94	0,019	0,760	0,741	3942,6	1,26E-3	-	-	No
	Tiociclam	0,94	0,019	0,340	0,321	1708,5	-	-	1,80E-4	Si ^{a,b}
Invernadero	Acefato	0,76	0,015	0,060	0,045	294,7	-	-	5,0E-5	Si ^b
	Azoxistrobin	0,87	0,017	0,090	0,073	417,2	-	-	3,0E-5	No
	Carbendazim	1,07	0,021	0,330	0,309	1442	-	-	3,0E-5	No
	Clorfenapir	0,73	0,015	0,050	0,035	242,5	-	1,10E-4	-	No
	Dimetomorf	0,92	0,018	0,080	0,062	334,8	6,0E-5	3,0E-5	1,0E-5	No
	Hexaconazol	1,47	0,029	0,150	0,121	410,2	-	-	6,60E-4	Si ^{a,b}
	Imidacloprid	0,81	0,016	0,070	0,054	332,1	-	-	3,20E-4	No
	Indoxacarb	0,93	0,019	0,070	0,051	276,3	-	-	2,50E-4	Si ^{a,b}
	Metalaxilo	2,47	0,049	0,310	0,261	527,5	1,80E-4	2,0E-6	1,0E-5	No
	Metomilo	0,93	0,019	0,080	0,061	330,1	9,0E-5	2,90E-4	2,10E-4	Si ^b
	Pirimetanil	1,26	0,025	0,200	0,175	693,7	-	-	3,0E-5	No
Spinosad A	0,53	0,011	0,030	0,019	183	-	-	5,0E-5	No	
Tiociclam	0,94	0,019	0,070	0,051	272,3	3,0E-5	1,70E-4	2,90E-4	Si ^{a,b}	

*Corresponde a las aplicaciones registradas en los seguimientos de las fincas (Cap. 1). **Los LMR únicamente se tienen en cuenta para los valores de frutos: ^a Según *Codex Alimentarius* (FAO/WHO, 2019), ^b Según EU Pesticide database (EU, 2016), no hay legislación a la fecha para suelos y hojas. ***Dosis recomendada, ****La dosis por unidad de área se calculó asumiendo 200 l agua ha⁻¹.

Esta última comparación, se realizó para los plaguicidas de los cuales se encontraron residuos en algún compartimiento ambiental, y fueron resgitrados en los seguimientos. Es así como, se evidencia que la totalidad de los i.a. se aplican en exceso entre el 20% hasta el 3.942,6% de la dosis recomendada. En promedio, en los sistemas productivos a campo abierto se aplicó un exceso de 696,8% de la dosis recumendada y en los sistemas bajo invernadero un 442,8%. No obstante, no todos los i.a. superaron los LMR (Tabla 2-12), y en este sentido su aplicación en exceso no se correlaciona necesariamente con la violación de esos niveles toxicológicos, sino con sus propiedades físico-químicas y afinidad.

2.4 Discusión

Generalmente los plaguicidas se disuelven en agua para ser aplicados, según su formulación, el objetivo previsto, la técnica de aplicación y las condiciones climáticas, pueden distribuirse en el suelo, el follaje de las plantas, depositarse como residuos y perderse por deriva. Cuando se usan bombas de espalda o estacionarias, como es el caso de la producción de tomate en Colombia, puede perderse hasta el 30% de estas sustancias y llegar a sitios u organismos no objetivo (Van der Werf, 1996).

La mayoría de los plaguicidas detectados en frutos, hojas y suelos fueron reportados previamente por los actores de las regiones, mediante las encuestas o seguimientos (Cap. 1, Tabla 1-4), a excepción de azoxistrobin, en las dos regiones, así como benalaxilo, metoxifenocida y pirimicarb, en la provincia Guanentá, la detección de estos i.a. adicionales mediante los muestreos directos, justifica la necesidad de complementar la información brindada por los productores por medio de investigaciones específicas como la implementada en esta fase. Por otro lado, en la fase de laboratorio no se evaluaron todos los plaguicidas reportados en las encuestas o seguimientos, en este sentido, es probable que en la región se encuentren residuos de i.a. adicionales a los detectados en la presente investigación. En términos generales, se evidencia aplicación excesiva y diversa de PSQ en los agroecosistemas de tomate en Santander y Boyacá representada en los residuos detectados en diferentes compartimientos ambientales. Situación que se sabe, afecta al sistema productivo, a los componentes ambientales, al ser humano, sumado a los costos de producción y la productividad.

Ante la presencia de estos residuos de plaguicidas, específicamente en los frutos, se compararon las concentraciones con los LMR, siendo uno de los principales parámetros en el monitoreo de la contaminación de alimentos y programas de vigilancia, que desempeñan un papel importante en la promoción de la seguridad alimentaria y deben ser respetados en el comercio mundial de productos agrícolas con el fin de mantener la salud pública (WHO, 1997). Esta regulación ha sido dinámica en los últimos años, quedando consignada en regulaciones internacionales y nacionales según el alimento (MacLachlan & Hamilton, 2010; Osman et al., 2011, Barnat et al., 2010).

Es así como, en los dos momentos de muestreo de frutos en las dos regiones se presentaron violaciones de los LMR (Bojacá et al, 2013; Ayarza, 2014), siendo superados en niveles porcentuales desde 18% hasta 22.200% por encima del LMR por muestra individual, respecto a los LMR de la FAO o UE. Específicamente estas violaciones se presentaron en los frutos provenientes de campo abierto para los insecticidas acefato (>3.300% LMR-UE), carbofuran (>2.550% LMR-UE, >430% LMR-FAO), tiociclam (>2.000% LMR-FAO-UE) y metomilo (>500% LMR-UE), además para los fungicidas dimetomorf (>400% LMR-FAO) y difenoconazol (>18% LMR-FAO); por su parte, en los provenientes de invernaderos para los insecticidas tiociclam (>7.800% LMR-FAO-UE), acefato (>4.100% LMR-UE), metomilo (>2.300% LMR-UE) e indoxacarb (>42% LMR-FAO-UE), así como para los fungicidas hexaconazol (>22.200% LMR-FAO-UE) y cimoxanil (>10.400% LMR-FAO, >162% LMR-UE). Siendo evidente que no existen prácticas adecuadas del uso de plaguicidas durante los procesos precosecha en las regiones de estudio.

Por otra parte, de los plaguicidas reportados en frutos excediendo los LMR, los insecticidas carbofuran y metomilo son de categoría toxicológica I o IA, y no cuentan con Registro ICA para tomate, al igual que los i.a. indoxacarb y hexaconazol. Por otro lado, los i.a. carbofuran, tiociclam, acefato y hexaconazol, no están aprobados por la CEE. Estas irregularidades se repiten para otros plaguicidas detectados en hojas y suelos, como tiabendazol que tampoco cuenta con Registro ICA para tomate, a su vez, los i.a. carbendazim y clorfenapir no cuentan con aprobación de la CEE, además de los mencionados previamente (Cap. 1, Tabla 1-4). Esta situación es común en América Latina, encontrándose irregularidades como uso de i.a. no autorizados para cultivos específicos, así como exceder los LMR en el 13,8% de muestras en el programa de monitoreo de residuos de plaguicidas más grande del continente (Jardim y Caldas, 2012). Es así como la presión de agroquímicos en los agroecosistemas evaluados, hace que los plaguicidas lleguen hasta el consumidor final, dado que la mayoría de los plaguicidas no tienen la capacidad de penetrar los tejidos cuticulares (Kaushik et al., 2009). Esta situación ocurre a nivel mundial en cultivos de tomate a campo abierto y bajo invernadero encontrando violaciones a los LMR en muestras de frutos para plaguicidas como acefato, benalaxilo, captan, carbendazim, clorotalonil, dimetoato, etiofencarb, imidacloprid, metil-tolcloflos, metomilo, profenofos, oxitetraciclina, procimidona, entre otros (Abou-Arab,

1999; Nasreddine & Parent-Massin, 2002; Garrido et al., 2004; Gambacorta et al., 2005, Cengiz et al., 2007; Penido et al., 2009; Osman et al., 2011).

En Colombia, otros plaguicidas encontrados en frutos de tomate provenientes de cultivos a campo abierto y bajo invernadero, en diversos estudios, diferentes a los reportados en esta investigación corresponden a: aldrin, carbofuran, cipermetrina, clorpirifos, deltametrina, diazinon, dimetoato, endosulfan, fentoato, heptacloro, lamdacialotrina, paration, triflumuron, profenofos, entre otros (Urrego & Cachique, 1986; Guerrero, 2003; Castro et al., 2004; Murcia & Stashenko, 2008; Gutiérrez & Londoño, 2009; Páez et al., 2011), la mayoría en desuso. Por otra parte, en este estudio se encontraron muestras con presencia de residuos múltiples (Tabla 2-5), coincidiendo con Murcia & Stashenko (2008) quienes reportan seis compuestos por muestra, y con Jardim & Caldas (2012) quienes reportan hasta siete plaguicidas por muestra de tomate.

La transferencia de químicos orgánicos dentro de las plantas ocurre por dos vías principales: deserción del suelo seguido por la absorción de las raíces de la solución del suelo y transferencia por aire a través de la deposición seca y húmeda de partículas sobre la superficie de las plantas, seguido de deserción en las partes internas de la planta (Juraske et al., 2011). Es así como es común encontrar residuos de plaguicidas en tejidos internos del fruto, en la pulpa, jugo e incluso las semillas donde se han reportado Organoclorados y Organofosforados, aunque es más común encontrarlos en la el epicarpio (Abou-Arab, 1999; Gutiérrez & Londoño, 2009). Este movimiento dependerá del modo de acción del plaguicida (contacto, sistémico, traslaminar), así como de las vías fisiológicas apoplasto y simplasto de los tejidos vasculares de la planta. Sin embargo, en el presente estudio se encontraron plaguicidas de contacto como indoxacarb en la pulpa, eso puede ser debido a las altas concentraciones que se aplican.

Por otra parte, la absorción foliar de plaguicidas es un proceso complejo, depende del espesor de la cutícula, cera epicuticular, estomas y tricomas, las propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas (peso molecular, concentración de los i.a., lipofilicidad, pH), así como de los tipos de aditivos (estructura, concentración y modo de acción de los surfactantes, aceites y sales de amonio) y las condiciones ambientales (Willis & Mcdowell, 1987; Wang & Liu, 2007). Las largas cadenas de poliésteres de las ceras, tienen capacidad de acumular compuestos lipofílicos como lo son algunos plaguicidas (Mahugija & Kishimba, 2007). Mientras otros plaguicidas pueden distribuirse a lo largo de

la hoja sin absorberse, persistiendo en la superficie por la cinética de la hoja (Ware et al., 1980). La viscido pubescencia de las hojas de tomate, puede favorecer entonces el alojamiento de plaguicidas en la superficie. A su vez, Fife & Nokes (2002), determinaron que la intensidad y duración de la lluvia influye en la persistencia de clorotalonil en hojas de tomate, esto indica que la producción a campo abierto es más dinámica respecto al movimiento de los plaguicidas en los agroecosistemas, que se mueven a otros destinos ambientales a través del agua.

Es así como gran variedad de factores agrícolas y ambientales son capaces de influenciar el destino de sustancias xenobioticas así como la formación de plaguicidas ligados ("*Bound Pesticides*"). La aplicación en grandes cantidades de plaguicidas, su frecuencia, las enmiendas, fertilizantes orgánicos, el modo de aplicación, están directamente relacionados con la persistencia de estos en el suelo o el transporte de estos hacia otros destinos ambientales (Gevao et al., 2000). De los plaguicidas detectados en las muestras de suelo en ambos sistemas productivos solo tres (benalaxilo, metalaxil y carbofuran) se aplican directamente sobre el suelo, denotando aplicaciones excesivas y fuera del objetivo para el resto. Otro factor de esta situación puede deberse al lavado de los plaguicidas por lluvia y/o sistema de riego (Aspersión), así como por las deficiencias en la aplicación, principalmente a campo abierto. Por otra parte, los plaguicidas en el suelo pueden moverse por escorrentía o infiltración, percolación y lixiviación hacia aguas subterráneas, ríos y sedimentos, este movimiento dependerá de los mecanismos y cinética de la absorción de las partículas del suelo (arena, limos, arcilla), la estructura, la textura, los óxidos de hierro, el humus, entre otras. (Gevao et al., 2000), pudiendo persistir en los suelos hasta por más de 20 años (Shegunova et al., 2007).

Adicionalmente, el movimiento de los plaguicidas en el suelo no solo está influenciado por las propiedades físico-químicas del plaguicida. Un mayor contenido de arcillas corresponde a una mayor absorción de plaguicidas; del mismo modo, la presencia de materia orgánica (> 5%) favorece la retención de plaguicidas, en menores contenidos la absorción de los plaguicidas dependerá de componentes activos de las fracciones inorgánicas como la arcilla (Durovic et al., 2009). A su vez, la absorción de plaguicidas tiende a ser mayor en suelos con pH bajo, ácidos (Kah, 2007). Es así como el mayor contenido de residuos de plaguicidas en los suelos de Santander (14 i.a.), podrían

explicarse por el pH más bajo 5,09 en promedio, un poco más contenido de carbono orgánico 2,10%, a pesar de tener menor contenido de arcillas cerca del 18%, a diferencia de los suelos de Boyacá (4 i.a.), con pH de 5,93, contenido de carbono orgánico de 1,90% y contenido de arcillas del 28%. Otro factor preponderante, corresponde a la precipitación, dado que la producción en Santander es a campo abierto, con el transporte de los plaguicidas desde la superficie de la planta hacia los suelos.

En otros estudios en suelos de Colombia, Juraske et al. (2011), reportan los i.a. clorpirifos, DDT, metil- paration y carbofuran en suelos del departamento de Boyacá. También se ha estudiado el movimiento de los i.a. clorpirifos y tebuconazol en suelos colombianos de los ordenes andisol, inceptisol, histosol y entisol encontrando diferencias del movimiento dependiendo del tipos de suelo, con tendencia a ser absorbidos en los primeros 0,4 m del suelo suponiendo así su llegada a aguas subsuperficiales (Mosquera-Vivas et al. 2016, Mosquera-Vivas et al., 2018). Siendo una de las entradas de estos xenobióticos en el ciclo hidrológico, además de la escorrentía superficial (Mojica et al. 2013), donde son los Organoclorados, los plaguicidas más detectados dada su alta estabilidad físico-química, insolubilidad en agua, no volátilidad y alta solubilidad en disolventes orgánicos, propiedades que favorecen su persistencia en el ambiente y su lenta biodegradabilidad (Ramírez & Lacasaña, 2001).

A nivel mundial, se han estudiado ampliamente los residuos de plaguicidas en aguas superficiales tanto en ecosistemas lóticos como en lagos, reportándose plaguicidas como atrazina, carbaril, carbofuran, diazinon, endrin, malation, tebuconazole, DDT, entre otros, el DDT se detecta incluso en sedimentos y peces (Medina et al., 1999; Zamar et al., 2012; Aparicio et al., 2014). Hasta el 70% de la contaminación por plaguicidas en estos ecosistemas se encuentra en los sedimentos, principalmente debida a Organoclorados, estos mismos son bioacumulados en redes tróficas de animales acuáticos y otros organismos que son incapaces de degradarlos (Ownby et al., 2004). Otros plaguicidas si se degradan por fotólisis en medios acuáticos (Medina et al., 1999).

El pH es una característica físico-química del agua que influye en la estabilidad de los plaguicidas en este compartimiento ambiental, un pH igual o mayor a 7,0 incrementa su tasa de descomposición por hidrólisis, cambiando incluso a otros metabolitos, siendo los organofosforados los más susceptibles; por el contrario, los pH de 6,0 o inferiores

contribuyen a que los plaguicidas permanezcan estables (Hock, 1994; Narváez, et al., 2012). Los valores de pH obtenidos en los cuerpos de agua evaluados de la zona del Ricaurte Alto en Boyacá se encuentran en promedio en el rango de 6,61 - 8,92, y en Santander de 6,76 - 7,68, situación que favorece su degradación y no detección (Aux, 2016).

Por otro lado, dado que la escorrentía superficial es el mecanismo más probable de transporte de los plaguicidas hacia los cuerpos de agua superficiales (Mojica et al. 2013), los fenómenos de sequía limitan ese transporte. A su vez, los cauces de los ecosistemas lóticos se modifican ante estos eventos climáticos, desplazando materia tanto orgánica como inorgánica aloctona, restringiendo así la detección de contaminantes en los sedimentos (Roldán et al. 2008), en este caso plaguicidas. En regiones alto andinas colombianas, se han detectado residuos de plaguicidas en ecosistemas leníticos, como en la cuenca del lago de Tota (Boyacá), donde se detectaron los i.a. malation, difeconazol, tebuconazol y clorotalonilo (Mojica et al., 2013), mientras en el presente estudio las aguas y sedimentos evaluados procedían en su totalidad de corrientes líticas.

A su vez, los Organofosforados se descomponen con mayor facilidad, por su baja volatilidad y presión de vapor, su degradación se da gracias a procesos de hidrólisis y de oxidación, produciendo productos solubles en agua, menos persistentes y acumulables en el organismo humano (Cárdenas et al., 2005, Darko & Akoto, 2008). Otros grupos relevantes como los Piretroides son de especial cuidado ya que son sustancias químicas de bajos límites de tolerancia para el ambiente y para el ser humano generando problemas de bioacumulación (El-Shahawi, 1997).

2.5 Conclusiones

Los frutos provenientes de las dos regiones y agroecosistemas de estudio, contienen residuos de plaguicidas en los distintos tejidos externos e internos. Las concentraciones cuantificadas en laboratorio para estos compuestos superaron los LMR establecidos por la legislación internacional. Esta situación se convierte en una vía de ingreso de los

plaguicidas a los consumidores, con sus posibles consecuencias en la salud humana y limitante para la comercialización.

Se detectaron residuos de plaguicidas en las hojas, siendo una vía de ingreso ecosistémica para las interacciones y relaciones tróficas entre especies de patógenos, plagas y benéficas, además para las personas que laboran en los cultivos. Estos excesos en la aplicación se trasladan a otros compartimientos ambientales como el suelo, donde se detectó y cuantificó, el mayor número y concentración de plaguicidas en el presente estudio, específicamente en suelos de la región de Santander dadas sus propiedades físico-químicas.

En el presente estudio no se detectaron plaguicidas en el agua y sedimentos de las principales corrientes de agua de las regiones, sin embargo, según su afinidad algunos tienen potencial de contaminación de aguas subterráneas, situación que puede afectar los acuíferos de las regiones. Según los demás parámetros de calidad de agua evaluados, en general son aguas de buena calidad, siendo blandas las de la provincia Guanentá y moderadamente duras a duras las de la región de Ricaurte Alto, pero es evidente la contaminación microbiológica de las aguas en las dos regiones.

Teniendo en cuenta estas detecciones, se puede inferir que es mayor la contaminación por plaguicidas a campo abierto que bajo invernadero, donde influyen factores climáticos sobre el movimiento de estas moléculas, dado que no existe ninguna barrera física para la precipitación, así como el control de otras variables como la temperatura, radiación solar y humedad relativa, relacionados con los procesos de hidrólisis y fotólisis.

La detección de insecticidas y fungicidas fue proporcional, usándose principalmente para el manejo de los insectos *T. vaporariorum*, *B. tabaci*, *T. absoluta*, *N. elegantalis*, y los hongos *P. infestans*, *B. cinerea*, y *O. lycopersici*, dada su alta incidencia en las regiones de estudio, que lleva al uso indiscriminado de plaguicidas, incluso no permitidos por la legislación nacional e internacional. Esta situación genera resistencia inducida en estas especies de artrópodos plaga y hongos patógenos, haciendo cada vez menos eficaz su manejo con la estrategia actual basada casi de manera exclusiva en PSQ.

En las regiones de estudio se están sobredosificando los plaguicidas aplicados, presentándose excesos evidentes, parte de los cuales se están alojando principalmente en los frutos, hojas y suelos. Finalmente, la evidencia centra la problemática actual en la escala de la finca, teniendo en cuenta que en la escala regional evaluada, representada en las cuencas, no hubo detecciones de plaguicidas, de esta manera se debe evaluar el riesgo ecológico que representan esas moléculas en esos agroecosistemas específicos.

3 Capítulo: Evaluación de Riesgo Ambiental asociado a los agroecosistemas de tomate y su consumo

3.1 Introducción

El manejo inadecuado de los PSQ ha derivado en excesos de estos compuestos que se alojan como sustancias xenobióticas en el agroecosistema, por su translocación y persistencia, pudiendo conducir a niveles que representen un riesgo para el ambiente y la salud humana (Juraske et al., 2007). Además, ingresan a otros compartimientos ambientales como el agua, el aire y el suelo, causando posiblemente la contaminación de acuíferos subterráneos o superficiales (Carriquiriborde et al.; 2014; Ruíz-Toledo et al., 2014; Cancapa et al., 2016; Etchegoyen et al., 2017) y la posible afectación de organismos, como la fauna benéfica del suelo (Römbke et al., 2008). Estos compuestos, también pueden afectar la salud de los seres humanos, tanto agricultores, como consumidores cada vez más preocupados por una alimentación saludable (Gambacorta et al., 2005; Cárdenas et al., 2010; Pérez et al., 2013; Harari & Harari, 2016).

Esta situación ha generado preocupación mundial, inicialmente enfocada a la salud humana, creándose en 1989 el comité mixto FAO/WHO sobre residuos de plaguicidas (JMPR, en inglés) conformado por expertos que evalúan los LMR por métodos estadísticos (FAO/WHO, 2011). Desde 1995, la JMPR propuso determinar los niveles aceptables de ingesta diaria (ADI, en inglés) para cada plaguicida, con el fin de predecir la ingesta diaria de éstos residuos, basada en las propiedades bioquímicas, metabólicas, farmacológicas, tóxicas y el nivel del efecto adverso no observado (NOAEL, en inglés), de cada i.a.. Los LMR y el ADI no son constantes, sino que se evalúan en cada reunión de la JMPR (WHO, 1997).

Otros parámetros de importancia para la determinación del efecto de los plaguicidas sobre la salud son la máxima ingesta diaria teórica (TMDI, en inglés) y la ingesta diaria estimada aceptada (EADI, en inglés), que permiten calcular índices de riesgo, para estudios específicos segmentando la población según un interés particular (WHO, 1997). Todo lo anterior genera una preocupación social que se ha definido de manera más amplia 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 (Finizio & Villa, 2002; Flores-Pacheco et al., 2013; Li et al., 2014; Cohen, 2017; Boivin & Poulsen, 2017), y no solo en la salud humana, siendo necesario el desarrollo y aplicación de metodologías que permitan evaluar el riesgo ambiental asociado a la aplicación de plaguicidas, para contribuir a la toma de decisiones acertadas que garanticen la sostenibilidad de los agroecosistemas.

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 (Leiva et al., 2012; EPA, 2019). Uno de los aspectos más importantes y favorables de la ERA, es que para su aplicación se requiere de información asequible, como propiedades físico-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. Esto hace de la ERA una herramienta económica y de fácil aplicación en comparación con los métodos convencionales de laboratorio (Serrato, 2018).

La contaminación por residuos de plaguicidas ha sido evidente en la producción de tomate en Colombia (Bojacá et al., 2012; Bojacá et al., 2013; Arias et al., 2014), además de otros agroecosistemas y regiones del país (Marrugo-Negrete et al., 2014; Alza et al., 2016), no obstante, las evaluaciones de riesgo ambiental por el uso de plaguicidas son escasas, destacándose propuestas metodológicas teóricas que adaptan indicadores internacionales para valorar el riesgo ambiental de plaguicidas, a las condiciones locales (Guaiteiro, 2010; Paéz et al., 2011). Es necesario complementar los análisis teóricos, con bioensayos sobre especies que pueden indicar desequilibrio ecosistémico, como polinizadores o microorganismos benéficos presentes en los agroecosistemas locales. Además, es importante evaluar el riesgo sobre la salud humana con otros enfoques. Es

así como, el objetivo de este capítulo fue estimar el riesgo ecológico y sobre la salud humana derivado del consumo, asociado a los i.a. detectados en diferentes compartimientos ambientales de agroecosistemas de tomate, en el marco de una ERA.

3.2 Metodología

Se implementó una Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA), que incluyó la evaluación de riesgo ecológico y riesgo de salud humana, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la EPA (2019), además adoptando y complementando una metodología para aplicación de plaguicidas en sistemas hortofrutícolas colombianos (Guaiteiro, 2010; Leiva et al., 2012; Serrato, 2018), teniendo en cuenta tres fases: (1) formulación del problema, (2) evaluación de riesgo ambiental y (3) caracterización del riesgo (Figura 3-1).

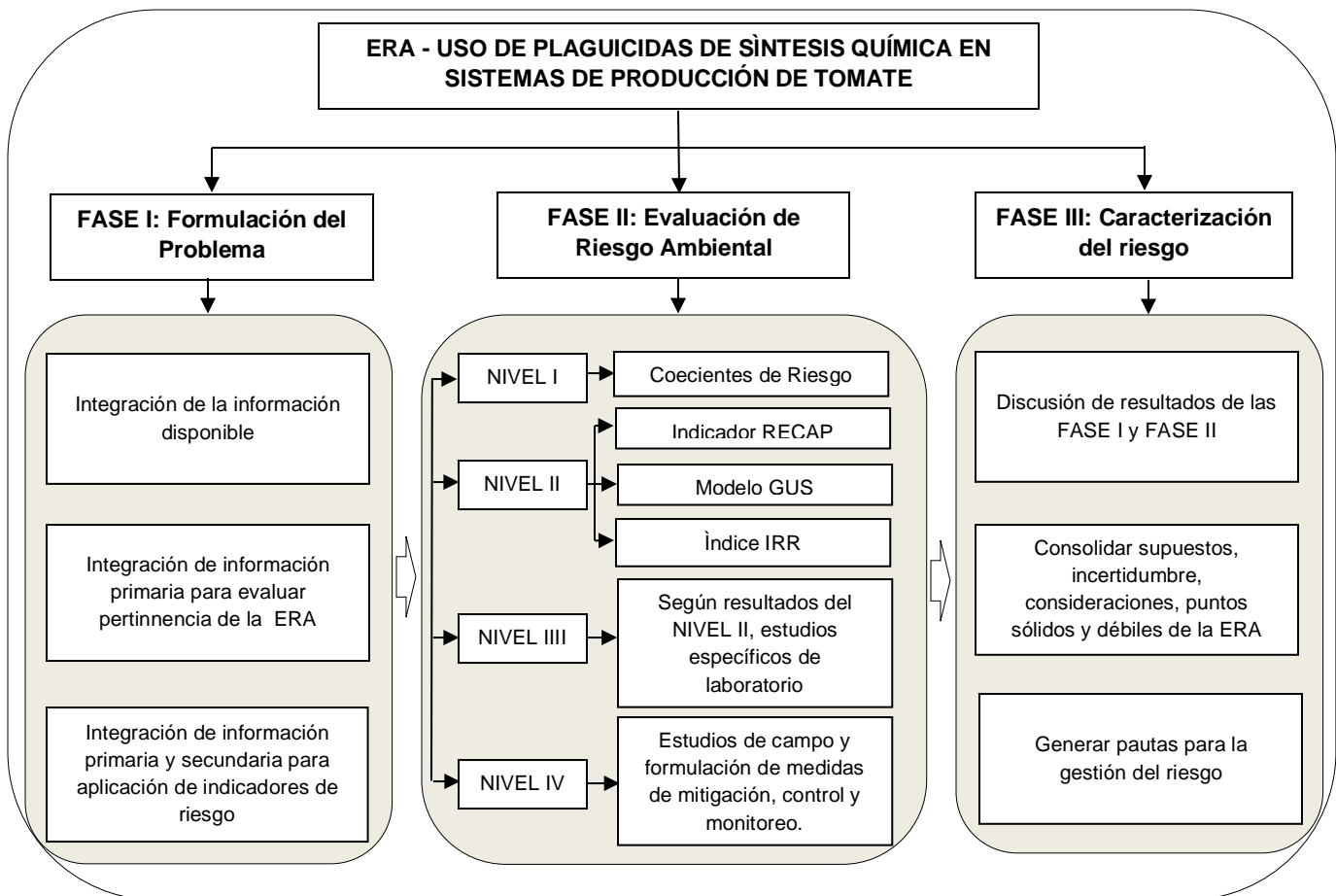


Figura 3-1. Esquema de la Evaluación de Riesgo Ambiental para sistemas de producción de tomate. Adaptado de Guaiteiro (2010) y Leiva et al. (2012).

Por medio de la ERA se valora el nivel de riesgo al que se encuentran expuestos los compartimentos ambientales de suelo, producto vegetal, agua y aire, sin embargo, no estima la cantidad de residuos de plaguicidas presentes en un compartimiento ambiental específico, de esta manera, se complementa por medio de análisis de residuos de plaguicidas. Dado que la metodología es individual por finca y plaguicida, se realizó para las mismas ocho fincas (cuatro a campo abierto y cuatro bajo invernadero) en las cuales se realizó en análisis completo de residuos de plaguicidas en frutos, hojas y suelos (Figura 2-1, Cap. 2). Para cada finca se seleccionaron algunos de los plaguicidas detectados, teniendo en cuenta la información ecotoxicológica disponible necesaria para el ERA (Tabla 3-1), de esta manera se abordó el panorama promedio de riesgo.

Tabla 3-1. Fincas donde se implemento la ERA, con los plaguicidas aplicados y detectados en diferentes compartimientos ambientales.

Ingrediente activo	Campo Abierto (Santander)				Bajo invernadero (Boyacá)			
	Finca 1 (Páramo)*	Finca 2 (Valle de San José)	Finca 3 (San Gil)	Finca 4 (Curití)	Finca 1 (Santa Sofía)	Finca 2 (Sutamarchán)	Finca 3 (Villa de Leyva)	Finca 4 (Villa de Leyva)
Azoxistrobin	F-H-S**	F-H-S	F-H-S	F-H-S	-	-	-	F
Carbendazim	-	F-H-S	F-H-S	F-H-S	-	-	-	-
Carbofuran	-	-	-	F-H-S	-	-	-	-
Difenoconazol	F-H-S	-	-	F-H-S	-	-	-	-
Dimetomorf	F-H-S	F-H-S	F-H-S	F-H-S	F-H-S	-	-	-
Metalaxil	-	F-S	F-S	F-S	F-H-S	F-H-S	-	-
Metomilo	F-H-S	F-H-S	F-H-S	F-H-S	F-H-S	-	F-H-S	-
Tiociclam	-	-	-	-	-	F-H-S	F-H-S	-

*Municipio donde se ubica la finca, **F: frutos, H: hojas, S: suelos.

FASE I - ERA: Formulación del problema

Se contempló la información primaria y secundaria que soporta la problemática (Cap. 1 y Cap. 2). Se aplicó un instrumento de evaluación que determina la pertinencia de la ERA (Guaiteiro, 2010) para cada finca, que corresponde a un cuestionario que incluye aspectos como la categoría toxicológica de los plaguicidas usados, frecuencia de aplicación, dosis utilizada, implementación de BPA, entre otros, con rango de puntuación de 1 a 18, un puntaje mayor a 9 (>50%) es una alarma para avanzar a la siguiente fase. Por otra parte, para la integración de la información para la aplicación de los indicadores de riesgo, se tuvo en cuenta la frecuencia de aplicación de plaguicidas, características geográficas, tamaño de la finca, duración del ciclo productivo, entre otros. Finalmente, se consolidó información secundaria, sobre las propiedades físico-químicas, toxicológicas y ecotoxicológicas de los plaguicidas (Bases de datos: *EU*, *PPDB*, *PAN*, *IRIS*), que son requeridas por los indicadores de riesgo en la Fase II.

FASE II - ERA: Evaluación del Riesgo Ambiental

En esta fase se integró la información previa, los indicadores de riesgo se agrupan en cuatro niveles de evaluación que aumentan en exigencia y rigurosidad con el fin de valorar el riesgo para los compartimientos ambientales, suelo, agua superficial, agua subterránea, aire y producto vegetal.

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 tuvo en cuenta la densidad aparente del suelo (g cm^{-3}), la dosis de aplicación (g i.a. ha^{-1}), tomadas de los seguimientos del Capítulo 1, con lo cual se realizó calcularon los Coeficientes de Riesgo ("*Risk Quotient*" - RQ), tanto el riesgo agudo (aRQ), como riesgo crónico (cRQ) para organismos terrestres, como el riesgo agudo (aRQ) para acuáticos, y se compararon 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 Nivel II.

Nivel II: en este nivel se evalúa el riesgo para otros organismos representativos de los ecosistemas acuáticos y terrestres, teniendo en cuenta las dosis aplicadas en los seguimientos. Los indicadores de riesgo utilizados para la valoración fueron los consolidados por Guaitero (2010) para las condiciones locales (Figura 3-1). (1) Riesgo Ecológico por Aplicación de Plaguicidas (RECAP): consta de cinco índices, tres para evaluar *riesgo agudo* de los compartimientos ambientales (i) agua superficial (PRISW-1, agua), (ii) suelo epigeo (PRIES-1, abejas, aves y mamíferos) y (iii) suelo hipogeo (PRISH-1, lombrices y ratones) y dos para evaluar el *riesgo crónico* en los compartimientos (iv) suelo epigeo (PRIES-2) y (v) suelo hipogeo (PRISH-2). (2) Modelo GUS: relaciona el Koc y la vida media en el suelo de los plaguicidas, para predecir su potencial de lixiviación y contaminación de aguas subterráneas. (3) Índice de Riesgo de Residuos (IRR): estima el riesgo de presencia sobre el producto vegetal. Como complemento, se calculó el riesgo de consumo mediante un método acumulativo detallado más adelante.

Nivel III: si persiste el riesgo para determinado plaguicida, se realizan análisis más rigurosos, como bioensayos, estudios de toxicidad aguda y/o crónica sobre organismos que sean de interés ecológico o potencial económico particulares, o bien simulaciones del movimiento de estas moléculas en laboratorio, basados en características específicas

edafológicas y climatológicas (Guaiteiro, 2010). En el presente estudio, se realizaron ensayos semicontrolados sobre abejas (*Apis mellifera*) y trébol rojo (*Trifolium pratense*), que se detallan más adelante.

Nivel IV: incluye modelaciones específicas para el ciclo de vida de los plaguicidas, y ensayos de campo siguiendo, entre otras, metodologías recomendadas en el manual técnico para el registro y control de plaguicidas químicos de uso agrícola (CAN, 2001, Decisión 804, CAN 2015), esta fase le compete a entes gubernamentales, por lo cual no hizo parte de la presente investigación, no obstante, se plantean recomendaciones relacionadas.

FASE III – ERA: Caracterización del riesgo

En este apartado se integraron las fases anteriores para lograr realizar un análisis integral de los resultados de la ERA, 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, esta fase corresponde a la discusión del presente Capítulo.

Ensayo: efecto de plaguicidas sobre la abeja melífera (*A. mellifera*)

Se realizó un ensayo semicontrolado bajo invernadero, en las instalaciones del C-Bios (Chía), basado en la metodología propuesta por EPA (2014) para ensayos de exposición por contacto con superficies contaminadas con abejas (*A. mellifera*). Para la selección de los tratamientos se tuvo en cuenta los i.a. detectados en hojas bajo invernadero (Tabla 2-6, Cap. 2) y se incluyó un neonicotinoide dado que son los que más afectan a las abejas a nivel mundial (Brandt et al., 2016), es así como se seleccionaron los insecticidas clorfenapir, metomilo, tiociclam e imidacloprid. Se partió de una sola colonia de abejas criada en una colmena artificial tipo Langstroth de 10 cuadros. Se dividió la colmena en 5 porta núcleos de 2 cuadros cada uno, con proporción equitativa de cría y una reina, para cada uno. (Rodríguez, 2017).

Se implementó un Diseño Completamente al Azar (DCA), con cinco tratamientos y un testigo, de ocho repeticiones cada uno, la unidad experimental fue una planta de tomate en floración, cada tratamiento y el testigo fueron confinados en jaulas entomológicas individuales con paredes de velo de 1,6 m de altura, bajo invernadero. Al interior de cada

jaula se dispuso una colonia de 1.000 abejas aproximadamente y plantas de tomate, durante una semana como fase de adaptación, dada la mortalidad por confinamiento. Al finalizar la adaptación, se ubicaron ocho plantas nuevas por jaula, realizando la primera aplicación de los plaguicidas por aspersion foliar, se realizaron seis aplicaciones, una por semana. Los tratamientos correspondieron a las dosis comerciales de los insecticidas: clorfenapir ($0,4 \text{ ml l}^{-1}$), imidacloprid ($1,6 \text{ ml l}^{-1}$), metomilo ($1,2 \text{ ml l}^{-1}$), tiociclam ($0,5 \text{ g l}^{-1}$), un testigo con abejas sin aplicaciones y un testigo sin abejas.

Las variables evaluadas fueron: (i) número de granos de polen en el estigma, medidos en tres flores al azar por planta, haciendo cortes del estigma dejándolo en suspensión de alcohol y luego conteo de polen en microscopio (Artz & Nault, 2011), (ii) número de semillas, mediante corte trasnversal y conteo directo, ya que el proceso de polinización finaliza con la formación de semillas viables y (iii) mortalidad corregida. Para el análisis estadístico se verificaron los supuestos correspondientes, mediante purebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, implementándose un Analisis de Varianza (ANOVA) y prueba *post hoc* de Tukey, usando el software R (R Core Team, 2017).

Ensayo: efecto de plaguicidas sobre nódulos radicales de trébol rojo (*T. pratense*)

Se adelantó un ensayo bajo invernadero en las instalaciones del C-Bios (Chía), sobre nódulos radicales de *T. pratense*, para determinar el efecto indirecto sobre organismos fijadores de nitrógeno de los i.a. dimetomorf, metalaxilo, metomilo y tiociclam, detectados previamente en suelos bajo invernadero (Tabla 2-7, Cap. 2). Las semillas del trébol rojo, fueron colectadas de 100 inflorescencias maduras (Lobatón et al., 2012) al azar en la Finca 1 (Tabla 3-1), tanto al interior como exterior de los invernaderos. Fueron conservadas en bolsas plásticas herméticas y transportadas al C-Bios; se separaron las flores de los involucros, se secaron a temperatura ambiente durante un mes, favoreciendo su madurez y se separaron los vestigios florales (Saénez & Rosso, 2017).

En la misma finca se colectaron 20 muestras de suelo de 3 Kg cada una, aleatoriamente entre 5-10 cm de profundidad, con palas desinfectadas con NaClO al 10%. Se extrajeron al azar 20 plantas de *T. pratense*, con su sistema radical completo con nódulos, con palas desinfectadas. Las muestras, fueron depositadas en bolsas plásticas esterilizadas herméticas, y transportadas en nevera de icopor al Laboratorio de Suelos del C-Bios. Para la obtención del inóculo, la raíz se cortó y lavó con agua, se separaron los nódulos

bajo estereoscopio con pinzas y se conservaron en tubos Eppendorf en nevera a 4°C. Posteriormente, se esterilizó la superficie de los nódulos con inmersión de un minuto en alcohol etílico (95%), seguida de una inmersión de cuatro minutos en NaClO, y enjuague con agua estéril (Vicent, 1970). Se maceraron los nódulos en mortero en 1,0 ml de solución salina para liberar las bacterias del género *Rhizobium* spp (identificadas en el Laboratorio de Microbiología de Suelos del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia). A la solución obtenida se le adicionó 300 cm³ de solución salina. Las semillas se desinfectaron con solución de NaClO al 0,1% en inmersión por cinco segundos. La inoculación consistió en sumergir las semillas esterilizadas durante 30 minutos en la solución con *Rhizobium* spp. Finalmente, se procedió a la siembra de las semillas en materas esterilizadas, con el suelo traído de la Finca 1 (Tabla 3-1).

Se implementó un DCA de cinco tratamientos y un testigo, con 20 repeticiones, la unidad experimental fue la raíz de una planta de *T. pratense*, ubicadas en materas bajo invernadero. Los tratamientos correspondieron a las dosis comerciales por volumen de materia, de los i.a.: dimetomorf (0,0125 g l⁻¹), metalaxilo (0,13 g l⁻¹), metomilo (0,023 ml l⁻¹), tiociclám (0,1 g l⁻¹), la mezcla de todos los i.a. y un testigo sin tratar. Las aplicaciones fueron foliares y al suelo a los 80, 97, 104 y 111 días después de la siembra; 30 días después de la última aplicación, se retiraron las plantas de las materas, se lavó la raíz con agua a baja presión y en laboratorio se separaron con pinzas los nódulos bajo estereoscopio. Las variables evaluadas fueron: (i) número de nódulos, mediante conteo directo bajo estereoscopio, (ii) diámetro del nódulo (cm), con calibrador digital, (iii) peso fresco (g), en balanza analítica marca Boeco Germany® y (iv) peso seco (g) en balanza analítica secando los nódulos frescos previamente a 70°C en horno por dos días, y se calculó el porcentaje de humedad del nódulo, con la diferencia porcentual de los pesos. Para el análisis estadístico se verificaron los supuestos correspondientes, mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, implementándose las pruebas de Kruskal-Wallis y *post hoc* de Kruskal, mediante el software R (R Core Team, 2017).

Evaluación del riesgo en la salud humana por consumo de tomate

Como complemento del ERA, se siguió la metodología propuesta por EFSA (2013) para el análisis de riesgo en la salud humana, que se enfoca en una evaluación de riesgos acumulativos (“*Cumulative Assessment Groups*” – CAGs), que corresponden a grupos de compuestos que pueden causar un efecto similar en sus tejidos, órganos y sistemas

fisiológicos que generarían una toxicidad ligada acumulada que se puede expresar como un Índice de Peligrosidad (“*Hazard Index*” – HI). Esta evaluación de riesgo contempla cuatro etapas: (i) indentificación del peligro (ii) caracterización del peligro, (iii) evaluación de la exposición y (iv) caracterización del riesgo (Bhandari et al., 2019).

Identificación del peligro: se determina como la exposición a un plaguicida puede causar o incrementar la incidencia de un efecto específico adverso en la salud humana (Bhandari, et al., 2019). Para tal fin, se tienen en cuenta las propiedades toxicológicas de los plaguicidas. En este sentido se identificó que puede existir peligro de consumo dada la detección de plaguicidas en frutos (Cap. 2). Además, se implementó un monitoreo de residuos de plaguicidas comercializados en la ciudad de Bogotá, mayor centro de consumo en Colombia, mediante el análisis de 30 i.a. (Tabla 2-1) en 400 muestras de tomates de 1,0 kg cada una, provenientes de 187 barrios (19 localidades), fue realizado al azar en supermercados, tiendas de barrio y plazas de mercado (Arias et al., 2014).

Caracterización del peligro: es una relación cuantitativa entre un nivel de dosis y la aparición o incidencia de una enfermedad. El consumo de productos contaminados con plaguicidas puede causar un Peligro agudo (“*Hazard Quoutient*” HQ / corto plazo – aHQ), que es calculado basado en la fracción de consumo estimada (ESTI, en inglés) y la dosis aguda de referencia (ArfD, en inglés). A su vez, un Peligro crónico (HQ / largo plazo – cHQ), que es calculado basado en la ingesta diaria estimada (EDI) y la Ingesta Diaria Aceptable (ADI, en inglés). Tanto el ArfD como el ADI están disponibles en las bases de datos del JMPR. Los cálculos realizados fueron:

$$\text{ESTI} = \frac{(\text{El mayor nivel de residuo } mg \text{ Kg}^{-1} \times \text{Tasa de consumo } Kg \text{ día}^{-1})}{\text{Peso corporal } Kg}$$

$$\text{EDI} = \frac{(\text{El nivel promedio de residuo } mg \text{ Kg}^{-1} \times \text{Tasa de consumo } Kg \text{ día}^{-1})}{\text{Peso corporal } Kg}$$

$$\text{aHQ} = \frac{\text{ESTI}}{\text{ArfD}} \times 100 \%$$

$$\text{cHQ} = \frac{\text{EDI}}{\text{ADI}} \times 100 \%$$

Evaluación de la exposición: para la exposición a plaguicidas se tiene en cuenta la población y sus hábitos de consumo. Es así como se contempló el peso promedio de los

colombianos 69,2 Kg (ENSIN, 2015), y el promedio de consumo de tomate *per capita* en Colombia de 39,94 g día⁻¹ (FAOSTAT, 2017).

Caracterización del riesgo: es la visión general de los efectos adversos en las poblaciones expuestas. Se calculó entonces el riesgo potencial en la salud usando los índices HQ y HI, el primero evalúa el riesgo potencial de un plaguicida, mientras el segundo calcula el riesgo combinado de múltiples plaguicidas. El HI es la suma de HQs, si el HQ o HI > 1 denota riesgo potencial en la salud humana. El HI se basa en el efecto acumulativo de los plaguicidas con acción similar, que pueden causar los mismos efectos fisiológicos en términos del sitio y naturaleza en el cual se encuentren agrupados en los denominados GAGs. En este sentido el HI se calculó sumando los peligros crónicos cHQs y expresado a manera de índice (HI) de la siguiente forma:

$$HI = \sum_{i=1}^n cHQ_i$$

Los GAGs contemplados para el análisis fueron: (i) insecticidas y (ii) fungicidas.

3.3 Resultados

FASE I: Formulación del problema

En los Capítulos 1 y 2 del presente trabajo se expone la presión de PSQ en los agroecosistemas de tomate a campo abierto y bajo invernadero, en Santander y Boyacá, respectivamente. A su vez, mediante la aplicación del instrumento de decisión, se determinó que es pertinente la aplicación de la ERA en siete de las ocho fincas, con puntajes porcentuales superiores a 50% (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Pertinencia de la ERA para las fincas seleccionadas en las regiones de estudio.

Parámetro	Campo Abierto (Santander)				Bajo invernadero (Boyacá)			
	Finca 1 (Páramo)	Finca 2 (Valle de San José)	Finca 3 (San Gil)	Finca 4 (Curití)	Finca 1 (Santa Sofía)	Finca 2 (Sutamarchán)	Finca 3 (Villa de Leyva)	Finca 4 (Villa de Leyva)
Puntaje	13	14	11	14	10	13	13	6
Porcentaje (%)	72,2	77,8	61,1	77,8	61,1	72,2	72,2	33,3
Pertinencia ERA*	P	P	P	P	P	P	P	NP

*P: Pertinente, NP: No Pertinente.

Por otra parte, la información secundaria, correspondiente a los parámetros de los indicadores y modelos necesarios para la siguiente fase se consolida en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Aspectos físico-químicos, características residuales, toxicológicas y ecotoxicológicas de los plaguicidas objeto de la ERA.

IR	Parámetro (Unidad)	Ingrediente Activo							
		Azoxistrobin	Carbendazim	Carbofuran	Difenoconazol	Dimetomorf	Metalaxilo	Metomilo	Tiociclam
RQ	DT50.Suelo (Días)	180,7	22	14	85	44	38,7	7	1
	t.Lombriz (Días)	56	14	56	56	56	56	14	-
	EC50.Daphnia (mg i.a. l ⁻¹)	0,23	0,15	0,0094	0,77	10,6	3,47	0,0076	2,01
	LC50.Lombriz (mg kg ⁻¹ suelo)	283	5,4	224	610	500	1000	19	87
	NOEC.Lombriz (ppm)	20	1	0,84	0,2	60	40	1,5	-
RECAP	LC50.Peces (mg i.a. l ⁻¹)	0,47	0,44	0,18	1,1	3,4	0,96	0,63	0,04
	LD50.Ratas (mg kg ⁻¹ peso)	5000	10000	7	1453	3900	669	30	370
	LD50.Abejas (mg kg ⁻¹)	25	756	0,05	177	32,4	269	0,28	-
	LD50.Aves (ppm)	2000	2250	0,71	2150	2000	1466	24,2	-
	t.Ratas (Días)	730	730	60	730	730	730	730	-
	DT50.Suelo (Días)	180,7	22	14	85	44	38,7	7	1
	NOEC.Lombriz (ppm)	20	1	0,84	0,2	60	40	1,5	-
	NOEL.Ratas (ppm)	32	500	0,2	17,3	300	96	4,6	-
	NOEL.Abejas (ppm)	0,05	1,512	0,001	0,354	0,0648	0,538	0,00056	-
	NOEL.Aves (ppm)	117	212	0,64	100	800	300	150	-
	TDI.Aves (mg/kg/peso/día)	1179	615	1,6	5000	728,3	10000	518,8	-
	TDI.Ratas (mg/kg/peso/día)	0,2	0,02	0,1	0,01	0,05	0,08	0,0025	-
	EC50.Daphnia (mg i.a. l ⁻¹)	0,23	0,15	0,0094	0,77	10,6	3,47	0,0076	2,01
	EC50.Algas (mg i.a. l ⁻¹)	0,36	8	6,5	0,032	29,2	0,42	100	3,3
	IRR	Kow (Log)	2,5	0,9	1,8	4,36	2,68	1,75	0,09
DT50.Suelo (Días)		180,7	22	14	85	44	38,7	7	1
GUS	Koc (na)	589	223	28	3.760	1.360	163	43	20
	DT50.Suelo (Días)	180,7	22	14	85	44	38,7	7	1

IR: Indicador de riesgo, **RQ:** Cociente de Riesgo, **RECAP:** Riesgo Ecológico por Aplicación de Plaguicidas, **IRR:** Índice de Riesgo de Residuos, **GUS:** Modelo de Lixiviación de Suelos. Adaptado de Serrato (2018). Información de cada ingrediente activo de ecotoxicología en campo de bases de *EU, PPDB, PAN, IRIS*.

FASE II: Evaluación del Riesgo Ambiental

Nivel I: con base en los resultados obtenidos de la fase anterior, se avanzó en la aplicación del Nivel I la Fase II de la ERA, para las siete fincas pertinentes, es así como se establecieron los respectivos RQ tanto agudos como crónicos (Tabla 3-4).

Tabla 3-4. Comparación de RQ con los LOC para las fincas pertinentes de la ERA.

Invernadero - Ricaurte Alto (Boyacá)										
Finca	Ingrediente Activo	aRQ*	Organismos Terrestres (Lombriz de tierra)				Organismos Acuáticos (<i>Daphnia spp</i>)			
			LOC	RQ>LOC	cRQ	LOC	RQ>LOC	aRQ	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
Campo abierto – Provincia Guanentá (Santander)										
Finca	Ingrediente Activo	aRQ	Organismos Terrestres (Lombriz de tierra)				Organismos Acuáticos (<i>Daphnia spp</i>)			
			LOC	RQ>LOC	cRQ	LOC	RQ>LOC	aRQ	LOC	RQ>LOC
Finca 1	Azosistrobina	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	Azosistrobina	0,00027		No	0,003		No	9,217		Si
	Carbendazim	0,000001		No	0,001		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
Finca 3	Metomilo	0,08128		No	0,557		No	5689,474		Si
	Azosistrobina	0,00027		No	0,003		No	9,217		Si
	Carbendazim	0,00001		No	0,0001		No	0,002		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
Finca 4	Metomilo	0,04353		No	0,298		No	3047,368		Si
	Azosistrobina	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	

*RQ: Cociente de riesgo; aRQ: riesgo agudo, cRQ: riesgo crónico. LOC: nivel de preocupación. (-) Falta información para la estimación. Adaptado de Serrato (2018).

Los LOC fueron superados por los RQ para diferentes plaguicidas en las dos regiones. En la mayoría de los casos se identifica un riesgo potencial para organismos acuáticos, en cuanto a organismos terrestres, el LOC es superado para el insecticida metomilo en la región de Ricaurte Alto y para el fungicida difenoconazol en la provincia Guanentá.

Nivel II: los resultados obtenidos en el Nivel I de evaluación, indican que se debe profundizar en la estimación del riesgo en las regiones de estudio. Es así como se avanzó al Nivel II, donde se calcularon los índices correspondientes al modelo RECAP para los i.a. que superaron los LOC en cada finca (Tabla 3-5).

Tabla 3-5. Valores de los indicadores del modelo RECAP y su nivel de riesgo.

Finca	Plaguicida	Invernadero - Ricaurte Alto (Boyacá)				
		PRIHS-1	PRIHS-2	Índices		PRISW-1
Finca 1	Dimetomorf	10,5 (B)*	12,5 (B)	46,5 (M)	75,39 (MA)	100 (MA)
	Metalaxilo	0 (N)	12,5 (B)	43 (M)	68,59 (A)	100 (MA)
	Metomilo	50 (A)	94 (MA)	80 (MA)	38,73 (M)	100 (MA)
Finca 2	Metalaxil	2 (N)	23,5 (M)	43 (M)	68,59 (A)	100 (MA)
	Tiociclam	12,5 (B)	-	-	-	100 (MA)
Finca 3	Metomilo	25 (M)	50 (MA)	80 (MA)	29,05 (M)	94 (MA)
	Tiociclam	23 (M)	-	-	-	100 (MA)
Finca	Plaguicida	Campo abierto – Provincia Guanentá (Santander)				
		PRIHS-1	PRIHS-2	Índices		PRISW-1
Finca 1	Asoxistrobin	0 (N)	12,5 (B)	49 (M)	71,96 (MA)	100 (MA)
	Difenoconazol	0 (N)	47 (A)	40,5 (M)	49,44 (A)	100 (MA)
	Dimetomorf	0 (N)	11 (B)	46,5 (M)	75,39 (MA)	94 (MA)
	Metomilo	12,5 (B)	25 (M)	80 (MA)	19,36 (M)	88 (MA)
Finca 2	Asoxistrobin	0 (N)	12,5 (B)	49 (M)	71,96 (MA)	100 (MA)
	Dimetomorf	10,5 (B)	23,5 (M)	46,5 (M)	75,39 (MA)	100 (MA)
	Metalaxilo	0 (N)	12,5 (B)	43 (M)	45,73 (A)	100 (MA)
	Metomilo	25 (M)	50 (MA)	80 (MA)	38,73 (M)	94 (MA)
Finca 3	Azoxistrobin	0 (N)	12,5 (B)	49 (M)	71,96 (MA)	100 (MA)
	Dimetomorf	10,5 (B)	12,5 (B)	46,5 (M)	75,39 (MA)	100 (MA)
	Metalaxilo	0 (N)	11 (B)	43 (M)	45,73 (A)	100 (MA)
	Metomilo	25 (M)	47 (A)	80 (MA)	29 (M)	94 (MA)
Finca 4	Azoxistrobin	10,5 (B)	23,5 (M)	49 (M)	107,94 (MA)	100 (MA)
	Carbendazim	21 (M)	44 (A)	34,5 (M)	22,5 (M)	100 (MA)
	Carbofuran	2 (N)	14 (B)	85 (MA)	24,72 (M)	88 (MA)
	Difenoconazol	0 (N)	91 (MA)	40,5 (M)	49,44 (A)	100 (MA)
	Dimetomorf	10,5 (B)	23,5 (M)	46,5 (M)	100,53 (MA)	100 (MA)
	Metalaxilo	0 (N)	23,5 (M)	43 (M)	68,6 (A)	100 (MA)

*Entre paréntesis el nivel de riesgo: N: Nulo, B: Bajo, M: Medio, A: Alto, MA: Muy Alto. (-) Falta información para la estimación. Adaptado de Serrato (2018).

En este sentido, existe riesgo agudo y crónico, de muy alto a moderado, para organismos del suelo hipógeo (lombrices de tierra, ratones, etc.), para los i.a. metomilo y metalaxilo bajo invernadero, y para los i.a. metomilo, difenoconazol, carbendazim, dimetomorf, metalaxilo y azoxistrobin a campo abierto. La misma situación se presentó, para organismos del suelo epigeo (abejas, aves y mamíferos), para los i.a. metomilo, dimetomorf y metalaxilo, bajo invernadero, y para todos los i.a. detectados y evaluados a

campo abierto. Por último, todos los i.a., en las siete fincas y las dos regiones representan riesgo agudo y crónico muy alto para organismos de aguas superficiales.

Respecto al modelo GUS (Indicador del potencial de lixiviación), basado en valores de la vida media en el suelo de cada i.a. para experimentos de campo, se determinó que los i.a. metalaxilo y metomilo en la región de Ricaurte Alto, así como los i.a. carbofuran, metalaxilo, metomilo, carbendazim y azoxistrobin, en la provincia Guantán, representan un posible riesgo para la contaminación de aguas subterráneas (Tabla 3-6).

Tabla 3-6. Valores de los indicadores obtenidos para el modelo GUS. Adaptado de Serrato (2018).

Invernadero - Ricaurte Alto (Boyacá)				
Plaguicida	DT50 suelo (Días)	Koc	GUS	Potencial de Lixiviación
Dimetomorf	72,7	1.360,0	1,424	No lixivia
Metalaxilo	2,79	162,0	5,965	Alto
Metomilo	46,0	43,0	2,000	Moderado
Tiociclam	6,0	20,0	0,0001	No lixivia
Campo abierto – Provincia Guantán (Santander)				
Plaguicida	DT50 suelo (Días)	Koc	GUS	Potencial de Lixiviación
Azoxistrobin	180,7	589,0	2,776	Moderado
Difenoconazol	318,0	3.760,0	0,411	No lixivia
Dimetomorf	72,7	1.360,0	1,424	No lixivia
Carbendazim	22,0	223,0	2,217	Moderado
Carbofuran	22,0	22,0	2,926	Alto
Metalaxilo	2,79	162,0	5,965	Alto
Metomilo	46,0	43,0	2,000	Moderado

A su vez, para el IRR se emplearon las dosis de los seguimientos a las fincas, con el fin de no sobreestimar el riesgo, teniendo en cuenta la diferencia entre la dosis reportada en las encuestas y la aplicada realmente (Cap 1.). Es así como se estimó que el riesgo de residuos de plaguicidas sobre el producto vegetal tiende a ser de bajo a muy bajo, en general para las dos regiones de estudio, sin embargo, se consideró un riesgo moderado para el i.a. metomilo bajo invernadero, también para los i.a. azoxistrobin y dimetomorf, a campo abierto (Tabla 3-7).

Tabla 3-7. Valores obtenidos para el modelo IRR y su nivel de riesgo.

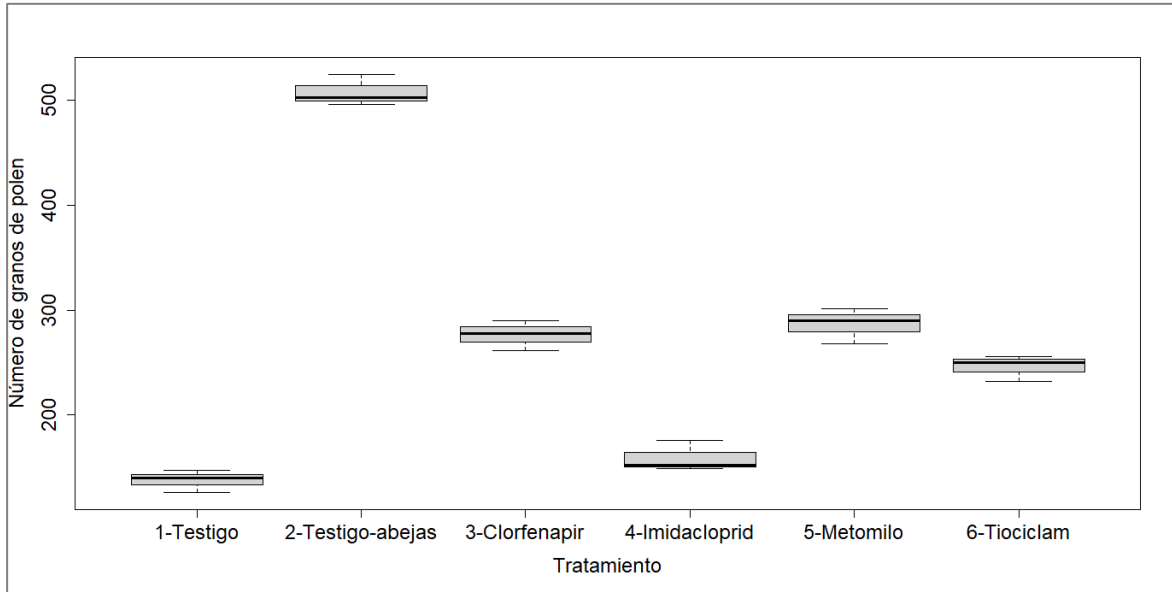
Invernadero - Ricaurte Alto (Boyacá)								
Finca	Plaguicida	Dosis* g i.a. ha ⁻¹	t 1/2 en planta (días)	Carga Plaguicida (C)	Potencial de Concentración (PC)	Potencial de Residuos (PR)	IRR**	Riesgo***
Finca 1	Dimetomorf	377	11	7,56E-05	2,52E+03	1,91E-01	2	B
	Metalaxil	251	9,675	1,80E-05	1,01E+03	1,82E-02	1	MB
	Metomilo	1701	1,75	4,75E-02	4,85E+01	2,30E+00	3	M

Finca 2	Metalaxil	611	10	4,38E-05	1,01E+03	4,43E-02	1	MB
	Tiociclam	318	0,25	3,50E-02	6,12E+00	2,14E-01	2	B
Finca 3	Metomilo	600	1,75	2,27E-04	4,85E+01	1,10E-02	1	MB
	Tiociclam	625	0,25	4,71E-04	6,12E+00	2,88E-03	<1	MB
Campo abierto – Provincia Guantán (Santander)								
Finca	Plaguicida	Dosis* g i.a. ha ⁻¹	t 1/2 en planta (días)	Carga Plaguicida (C)	Potencial de Concentración (PC)	Potencial de Residuos (PR)	IRR**	Riesgo***
Finca 1	Azosxistrobin	103	45,175	6,44E-05	8,87E+03	5,71E-01	2	B
	Difenoconazol	154	21,25	3,19E-05	2,70E+04	8,61E-01	2	B
	Dimetomorf	200	11	2,10E-04	2,52E+03	5,29E-01	2	B
	Metomilo	133	1,75	1,41E-04	4,85E+01	6,81E-03	<1	MB
Finca 2	Azosxistrobin	53	45,175	3,45E-05	8,87E+03	3,06E-01	2	B
	Dimetomorf	649	11	7,45E-05	2,52E+03	1,88E-01	2	B
	Metalaxil	173	9,675	2,72E-05	1,01E+03	2,74E-02	1	MB
	Metomilo	1081	1,75	1,02E-05	4,85E+01	4,93E-04	<1	MB
Finca 3	Azosxistrobin	53	45,175	3,31E-05	8,87E+03	2,94E-01	2	B
	Dimetomorf	543	11	8,61E-06	2,52E+03	2,17E-02	1	MB
	Metalaxil	65	9,675	6,67E-06	1,01E+03	6,74E-03	<1	MB
	Metomilo	579	1,75	2,49E-04	4,85E+01	1,21E-02	1	MB
Finca 4	Azosxistrobin	240	45,175	1,50E-04	8,87E+03	1,33E+00	3	M
	Carbendazim	195	5,5	3,92E-05	2,87E+02	1,13E-02	1	MB
	Carbofuran	10	3,5	1,68E-07	3,81E+02	6,42E-05	<1	MB
	Difenoconazol	195	21,25	1,06E-05	2,70E+04	2,85E-01	2	B
	Dimetomorf	1667	11	5,45E-04	2,52E+03	1,38E+00	3	M
	Metalaxil	450	9,675	6,50E-05	1,01E+03	6,57E-02	1	MB

*Dosis tomada de los seguimientos Capítulo 1, **IRR: Índice de Riesgo de Residuos, ***Nivel de riesgo: B: Bajo, MB: Muy Bajo, M: Moderado. Adaptado de Serrato (2018).

Nivel III: dado que en el Nivel II de la Fase II de la ERA, se determinó el riesgo potencial sobre diferentes grupos de organismos, se seleccionaron especies estratégicas presentes en los agroecosistemas locales, que intervienen en funciones y servicios ecosistémicos como la “polinización de cultivos” correspondiente a un servicio de regulación, representada en el efecto de los i.a. detectados sobre abejas (*A. mellifera*), además la “dispersión y recicaje de nutrientes”, correspondiente a un servicio de apoyo, representado en el proceso de fijación de nitrógeno por parte de *Rizhobium* spp, en los nódulos radicales del trébol rojo *T. pratense*, presentes en agroecosistemas de tomate de las regiones de estudio.

Es así como, se determinó que la abeja melífera potencia el proceso de polinización en plantas de tomate, encontrando más de 500 granos de polen en el estigma, a diferencia de lo encontrado en las flores sin abejas, donde el valor es inferior a 137,6 granos en promedio, además que los i.a. evaluados afectan el proceso de polinización (Gráfica 3-1).



Gráfica 3-1. Efecto de plaguicidas sobre polinización de *A. mellifera* en plantas de tomate, representado en la cantidad de granos de polen. Adaptado de Rodríguez (2017).

Se encontraron diferencias significativas para las variables número de granos de polen ($p\text{-value}= 8,6 \text{ E-}12$; $\alpha<0,05$) y número de semillas ($p\text{-value}= 2,0 \text{ E-}16$; $\alpha<0,05$), siendo el i.a. imidacloprid, el insecticida que más afecta las dos variables, sin embargo, los i.a. tiociclam, clorfenapir y metomilo, también afectan el proceso de polinización. Por otra parte, los i.a. clorfenapir y tiociclam, causaron una mortalidad superior al 84% de las abejas (Tabla 3-8).

Tabla 3-8. Efecto de plaguicidas sobre el número de granos de polen, número de semillas, y mortalidad de *A. mellifera*, relacionados con la polinización de tomate.

Tratamiento	Variable						
	Número de Granos de polen			Número de Semillas			Mortalidad corregida (%)
	Media	d.e.	Rango	Media	d.e.	Rango	
Clorfenapir	276,3* _{bc}	14,6	261-290	209,8* _b	12,1	193 -231	88,7
Imidacloprid	159,0 _d	14,8	149-176	105,1 _c	22,6	70-155	55,8
Metomilo	286,3 _b	16,8	268-301	215,7 _b	20,9	181-260	56,8
Tiociclam	246,0 _c	12,5	232 -256	190,6 _b	17,5	162-213	84,8
Testigo con abejas	508,0 _a	15,1	496-525	403,0 _a	41,8	329-482	-
Testigo sin abejas	137,6 _d	10,7	126-147	100,5 _c	32,9	66-160	-

*Prueba de comparación de medias Tukey ($\alpha<0.05$), valores con diferentes letra difieren significativamente, **d.e.:** Desviación estándar, **Rango:** Mínimo-Máximo. Adaptado de Rodríguez (2017).

En cuanto al efecto de los i.a. evaluados sobre la formación de nódulos radicales de *T. pratense*, se encontraron diferencias significativas para el diámetro de nódulos ($p\text{-value}=6,1 \text{ E-}05$; $\alpha<0,05$), siendo los más pequeños los sometidos al i.a. metomilo y los más grandes al i.a. tiociclam, no hubo diferencias significativas para el número de nódulos ($p\text{-value}=0,113$; $\alpha<0,05$), sin embargo, hubo menor cantidad de nódulos en el tratamiento del i.a. tiociclam (Tabla 3-9).

Tabla 3-9. Efecto de plaguicidas en el número y diámetro de nódulos radicales de *T. pratense* provenientes de agroecosistemas de tomate.

Tratamiento	Variable							
	Número de nódulos				Diámetro nódulos (mm)			
	Media	d.e.	Rango	Mediana	Media	d.e.	Rango	Mediana
Dimetomorf	145,4	153,5	0-561	84,5	0,6	0,5	0-2,1	0,7* ab
Metalaxilo	129,6	78,8	9-281	136	0,9	0,4	0,4-1,9	0,8 b
Metomilo	123,3	155,9	0-584	52,5	0,5	0,4	0-1,5	0,6 a
Tiociclam	110,1	80,1	15-331	99,5	3,4	10,9	0,6-49,9	0,8 b
Mezcla plaguicidas	184,0	125,7	92-650	126	0,8	0,3	0,6-2,2	0,8 b
Testigo	146,5	55,3	59-278	132,5	0,8	0,1	0,6-0,9	0,8 b

*Prueba de comparación de medianas *post hoc* Kruskal ($\alpha<0,05$), valores con diferentes letra difieren significativamente, **d.e.**: Desviación estándar, **Rango**: Mínimo-Máximo. Adaptado de Saézn y Rosso (2017).

Se presentaron diferencias significativas para las variables peso fresco ($p\text{-value}=0,005$; $\alpha<0,05$) y peso seco ($p\text{-value}=0,002$; $\alpha<0,05$) de los nódulos, donde los nódulos formados en el tratamiento con metomilo obtuvieron los valores de peso y porcentaje de humedad más bajos (Tabla 3-10).

Tabla 3-10. Efecto de plaguicidas sobre el peso fresco, peso seco y porcentaje medio de humedad de nódulos radicales de *T. pratense* en tomate.

Tratamiento	Variable								
	Peso fresco de nódulos (g)				Peso seco de nódulos (g)				Humedad nódulo (%)
	Media	d.e.	Rango	Mediana	Media	d.e.	Rango	Mediana	
Dimetomorf	0,06	0,06	0-0,21	0,03* ab	0,01	0,02	0-0,07	0,01* b	54,8
Metalaxilo	0,07	0,06	0-0,18	0,05 ab	0,01	0,02	0-0,05	0,01 b	74,0
Metomilo	0,03	0,04	0-0,20	0,01 a	0,01	0,02	0-0,07	0,001 a	45,9
Tiociclam	0,09	0,08	0-0,35	0,07 b	0,03	0,04	0-0,22	0,02 b	65,2
Mezcla plaguicidas	0,09	0,08	0,01-0,31	0,06 b	0,04	0,04	0-0,13	0,02 b	53,9
Testigo	0,07	0,11	0,01-0,48	0,04 ab	0,02	0,02	0-0,10	0,02 b	49,6

*Prueba de comparación de medianas *post hoc* Kruskal ($p<0,05$), valores con diferentes letra difieren significativamente, **d.e.**: Desviación estándar, **Rango**: Mínimo-Máximo. Adaptado de Saézn y Rosso (2017).

Evaluación del riesgo en la salud humana por consumo de tomate

Como complemento del ERA, que debe incluir además del riesgo ecológico, el riesgo en la salud humana, pasada la fase de identificación del peligro se procedió a la caracterización del peligro y evaluación de la exposición. En este sentido, teniendo en cuenta los hábitos de consumo, así como las cantidades máximas y promedio de residuos de plaguicidas detectadas en frutos del muestreo de 2011 (Tabla 2-2, Cap. 2), se estimaron niveles que representan peligro para la salud humana, específicamente peligro agudo para el i.a. carbofuran en los frutos provenientes de la producción a campo abierto, y peligro crónico para el i.a. hexaconazol en frutos provenientes de invernadero (Tabla 3-11).

Tabla 3-11. Riesgo agudo y crónico en salud humana debido al promedio de ingesta diaria de plaguicidas debido al consumo de tomate, muestreo 2011.

Ingrediente activo	Riesgo Agudo					Riesgo Crónico				
	ARfD*	Campo abierto		Invernadero		ADI*	Campo abierto		Invernadero	
		ESTI	aHQ	ESTI	aHQ		EADI	cHQ	EADI	cHQ
Acefato	0,1	1,9E-04	0,196	2,4E-04	0,242	0,03	4,6E-05	0,154	4,0E-05	0,135
Carbendazim	0,1	5,8E-06	0,006	1,6E-04	0,156	0,03	5,8E-06	0,019	1,7E-05	0,058
Carbofuran	0,001	2,3E-05	2,309	-	-	0,001	1,7E-05	1,732	-	-
Cimoxanil	n.d.	-	-	-	-	n.d.	-	-	6,1E-04	n.e.
Dimetomorf	0,6	-	-	-	-	0,2	-	-	5,8E-06	0,003
Hexaconazol	n.d.	-	-	-	-	0,005	-	-	3,8E-04	7,619
Imidacloprid	0,4	1,6E-04	0,040	2,8E-04	0,070	0,06	1,6E-04	0,269	1,8E-04	0,308
Indoxacarb	0,1	8,1E-05	0,081	6,3E-05	0,063	0,01	4,0E-05	0,404	1,7E-05	0,173
Metalaxilo	n.d.	4,6E-05	n.e.	5,2E-05	n.e.	0,08	4,3E-05	0,504	1,1E-05	0,014
Metomilo	0,02	3,5E-05	0,173	1,4E-04	0,069	0,02	3,5E-05	0,173	1,2E-04	0,606
Metoxifenozida	0,9	1,7E-05	0,002	-	-	0,1	1,7E-05	0,017	-	-
Pirimetanil	n.d.	5,8E-06	n.e.	2,0E-04	n.e.	0,2	5,8E-06	0,003	1,7E-05	0,009
Tiociclam	n.d.	1,2E-04	n.e.	1,3E-04	n.e.	n.d.	1,0E-04	n.e.	8,1E-05	n.e.

* ARfD y ADI, tomados de WHO (2012), *Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues* (JMPR). (n.d.) información no disponible. (n.e.) no estimado: no es posible estimar el riesgo, por disponibilidad de información de ARfD o ADI. (-): No detectado.

Respecto al muestreo de 2013, bajo las mismas condiciones de consumo y con la exposición de los valores máximos y promedio cuantificados en frutos de la Tabla 2-3 (Cap. 2), también se alcanzaron niveles que representan peligro para la salud, específicamente peligro agudo y crónico para el i.a. carbofuran presente en frutos provenientes de campo abierto. A su vez, se estimó un peligro crónico para los i.a. difenoconazol e indoxacarb, presentes en frutos provenientes de campo abierto e invernadero, respectivamente (Tabla 3-12).

En cuanto al mismo escenario de consumo, para el monitoreo realizado en Bogotá, donde llega parte de la producción de tomate de Santander y Boyacá, se detectaron

residuos en el 70,5% de las muestras, siendo los i.a. más comunes pirimetanil, carbendazim y dimetomorf, ningún i.a. superó los LMRs (Arias et al., 2014). Para este análisis en Bogotá, se estimó que el insecticida carbofuran (registro cancelado, ICA) representa peligro agudo y crónico debido a la ingesta diaria de tomate (Tabla 3-13).

Tabla 3-12. Riesgo agudo y crónico en salud humana debido al promedio de ingesta diaria de plaguicidas debido al consumo de tomate, muestreo 2013.

Ingrediente activo	Riesgo Agudo						Riesgo Crónico			
	ARfD*	Campo abierto		Invernadero		ADI*	Campo abierto		Invernadero	
		ESTI	aHQ	ESTI	aHQ		EADI	cHQ	EADI	cHQ
Acefato	0,1	-	-	1,7E-05	0,017	0,03	-	-	1,2E-05	0,038
Azoxistrobin	n.d.	5,8E-06	n.e.	2,3E-05	n.e.	0,2	5,8E-06	0,003	1,7E-05	0,009
Carbendazim	0,1	1,3E-04	0,133	-	-	0,03	1,2E-04	0,404	-	-
Carbofuran	0,001	3,0E-05	3,059	-	-	0,001	2,9E-05	2,886	-	-
Difenoconazol	0,3	3,4E-04	0,114	-	-	0,01	2,9E-04	2,944	-	-
Dimetomorf	0,6	2,9E-05	0,005	-	-	0,2	1,7E-05	0,009	-	-
Indoxacarb	0,1	-	-	4,1E-04	0,410	0,01	-	-	2,7E-04	2,713
Metalaxilo	n.d.	-	-	5,8E-06	n.e.	0,08	-	-	5,8E-06	0,007
Metomilo	0,02	3,5E-05	0,173	-	-	0,02	3,5E-05	0,173	-	-
Spinosad A	n.d.	-	-	2,9E-05	n.e.	0,02	-	-	2,9E-05	0,144
Tiociclam	n.d.	-	-	4,6E-04	n.e.	n.d.	-	-	2,5E-04	n.e.

* ARfD y ADI, tomados de WHO (2012), *Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (JMPR)*. (n.d.) información no disponible. (n.e.) no estimado: no es posible estimar el riesgo, por disponibilidad de información de ARfD o ADI. (-): No detectado.

Tabla 3-13. Riesgo agudo y crónico en salud humana debido al promedio de ingesta diaria de plaguicidas debido al consumo de tomate, muestreo en Bogotá.

Ingrediente activo	Riesgo Agudo					Riesgo Crónico		
	ARfD*	Máximo** mg Kg ⁻¹	ESTI	aHQ	ADI*	Media** mg Kg ⁻¹	EADI	cHQ
Acefato	0,1	0,45	2,6E-04	0,260	0,03	0,07	4,0E-05	0,135
Azoxistrobin	n.d.	0,03	1,7E-05	n.e.	0,2	0,02	1,1E-05	0,006
Benalaxil	0,1	0,05	2,9E-05	0,029	0,07	0,02	1,1E-05	0,016
Carbendazim	0,1	0,74	4,3E-04	0,427	0,03	0,05	2,9E-05	0,096
Carbofuran	0,001	0,05	2,9E-05	2,886	0,001	0,02	1,1E-05	1,154
Clorfenapir	0,03	0,50	2,9E-04	0,962	0,03	0,50	2,9E-04	0,962
Cimoxanil	n.d.	0,60	3,5E-04	n.e.	n.d.	0,60	3,5E-04	n.e.
Difenoconazol	0,3	0,03	1,7E-05	0,006	0,01	0,02	1,1E-05	0,115
Dimetoato	0,02	0,02	1,2E-05	0,058	0,002	0,02	1,1E-05	0,577
Dimetomorf	0,6	0,12	6,9E-05	0,012	0,2	0,02	1,1E-05	0,006
Imazalil	0,05	0,04	2,3E-05	0,046	0,03	0,04	2,3E-05	0,077
Imidacloprid	0,4	0,30	1,7E-04	0,043	0,06	0,30	1,7E-04	0,289
Indoxacarb	0,1	0,08	4,6E-05	0,046	0,01	0,04	2,3E-05	0,231
Metalaxilo	n.d.	0,03	1,7E-05	n.e.	0,08	0,01	5,8E-06	0,007
Metomilo	0,02	0,03	1,7E-05	0,087	0,02	0,03	1,7E-05	0,087
Metoxifenoazida	0,9	0,03	1,7E-05	0,002	0,1	0,03	1,7E-05	0,017
Pirimetanil	n.d.	0,30	1,7E-04	n.e.	0,2	0,11	6,3E-05	0,032
Spinosad	n.d.	0,10	5,8E-05	n.e.	0,02	0,10	5,8E-05	0,289
Tebuconazol	0,3	0,17	9,8E-05	0,033	0,03	0,11	6,3E-05	0,212
Tiociclam	n.d.	0,17	9,8E-05	n.e.	n.d.	0,15	8,7E-05	n.e.

*ARfD y ADI, tomados de WHO (2012), *Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (JMPR)*.

**Cantidades en los frutos monitoreados (n.d.) información no disponible. (n.e.) no estimado: no es posible estimar el riesgo, por disponibilidad de información de ARfD o ADI. Adaptado de Arias et al. (2014)

Por último, respecto a la caracterización del riesgo en la salud humana por ingesta de tomate con residuos de plaguicidas, se acudió al análisis del riesgo acumulativo HI que corresponde a la sumatoria de los peligros crónicos para los GAGs insecticidas y fungicidas. En este sentido, respecto al muestreo de 2011 para los frutos provenientes de campo abierto, los insecticidas (HI = 2,749) representan riesgo a diferencia de los fungicidas (HI = 0,076), mientras en los provenientes de invernaderos, tanto fungicidas (HI = 7,702) como insecticidas (HI = 1,222) representan riesgo. Situación que se invierte en el muestreo de 2013, donde a campo abierto tanto insecticidas (HI = 3,059) como fungicidas (HI = 3,359) representan riesgo, mientras bajo invernadero, los insecticidas representan riesgo (HI = 2,895) y no así los fungicidas (HI = 0,016).

En el monitoreo de Bogotá, los insecticidas (HI = 3,740) representan riesgo tanto agudo como crónico en la salud humana, a diferencia de los fungicidas (HI = 0,567). Es así como, en términos generales, el riesgo en la salud humana por consumo de tomates con residuos de plaguicidas, estaría dado por los insecticidas carbofuran e indoxacarb y por los fungicidas difenoconazol y hexaconazol.

3.4 Discusión

FASE III: Caracterización del riesgo ambiental

Este apartado corresponde a la integración y análisis de los hallazgos de las fases anteriores e la ERA. En este sentido, en la Fase I se determinó la pertinencia de realizar la evaluación en fincas donde se usan plaguicidas de categoría toxicológica I y II, carecen de capacitación sobre el uso de plaguicidas, asistencia técnica, calibración de los equipos de aplicación y la frecuencia de aplicación es alta. Mientras, en la única finca en la que no fue pertinente, cuenta con un manejo agronómico adecuado y asistencia técnica. En el Nivel I de la Fase II, los diferentes insecticidas y fungicidas evaluados superaron los niveles de preocupación (LOC) representando riesgo agudo y crónico teóricos, sobre organismos de los ecosistemas de las regiones de estudio, bajo las dosis aplicadas por los agricultores. En este sentido, se verificó que existe riesgo para los organismos que edáficos, terrestres y acuáticos, así como posible contaminación de aguas subterráneas.

Los organismos edáficos (bacterias, hongos, protozoos, nemátodos, ácaros, lombrices, etc.), cumplen roles importante en los ecosistemas, como la disponibilidad e inmovilización de nutrientes, la mineralización, la fijación biológica del nitrógeno y la bioturbación (Edwards, 1993; Bunemann et al., 2006). Los plaguicidas afectan estos organismos mediante cambios ecológicos poblacionales como su disminución en biomasa y actividad enzimática (Bunemann et al., 2006). Por su parte, los insecticidas no selectivos pueden afectar poblaciones de artrópodos benéficos, en el presente estudio el insecticida de amplio espectro metomilo, representa un riesgo muy alto para las poblaciones de artrópodos edáficos y terrestres. Por otro lado, los fungicidas que representan riesgo moderado como dimetomorf y metalaxilo, inhiben procesos de crecimiento y desarrollo celular y micelial, mientras los fungicidas con riesgo alto, como difenoconazol y carbendazim, actúan en otros procesos metabólicos, pudiendo afectar a los microorganismos edáficos y terrestres diferentes a patógenos, como micorrizas, bacterias fijadoras u otros consorcios microbiales.

Dado que todos los plaguicidas evaluados representan un riesgo potencial muy alto sobre organismos acuáticos, se genera una alerta para los cuerpos de agua cercanos a los cultivos de tomate, como ríos, quebradas y reservorios de agua superficiales de las dos regiones, a pesar de no haber sido detectados (Cap. 2). Los i.a. metalaxil y carbofuran, representan mayor riesgo para los ecosistemas acuáticos, coincidiendo con Alza, et al. (2016), quienes estimaron el riesgo de contaminación hídrica para los i.a. carbofuran y mancozeb en una región altoandina colombiana, siendo carbofuran el i.a. con mayor potencial contaminante de aguas subterráneas por lixiviación.

En el Nivel II de la Fase II, se estimó y verificó el riesgo para organismos acuáticos, edáficos y terrestres, avanzando al Nivel III de la misma fase, mediante bioensayos específicos. En primera instancia se determinó que la abeja melífera favorece la polinización de la planta de tomate según la relación directa encontrada entre el número de granos de polen y las semillas de los frutos, concordando con investigaciones que destacan la habilidad de *A. mellifera* para polinizar cultivos de tomate (Sabara & Winston, 2003; Sabara et al., 2004; Macias-Macias et al., 2009). En segunda instancia se corroboró que los insecticidas imidacloprid, tiociclam, clorfenapir y metomilo afectan la polinización del tomate y a las abejas melíferas. Estos i.a. generan desequilibrios del sistema nervioso de los artrópodos, bloqueos de la acetilcolina nicotínica o impiden la

acción mitocondrial (Costa et al., 2014). A su vez, los i.a. que se reportan con mayor mortalidad sobre *A. mellifera* son clorfenapir, tiociclam, clorpirifos, principalmente en etapas de floración (Tuo & Hala, 2011; Costa et al., 2014; Yang et al., 2019) coincidiendo con lo encontrado en el presente estudio.

El principal efecto nocivo sobre *A. mellifera* lo representan los neonicotinoides, entre estos imidacloprid, estos afectan la fisiología del insecto, su inmunidad, comportamiento, coordinación, capacidad de supervivencia, olfato, habilidad para localizar su colonia y las flores, causando una polinización deficiente (Bonmatin et al., 2005; Williamson & Wright, 2013; Brandt et al., 2016). Adicionalmente, entre los plaguicidas objeto de la ERA los i.a. carbofuran, metomilo, imidacloprid, indoxacarb y clorfenapir representan riesgo alto para abejas según PPDB (2019). Todo lo anterior, se puede relacionar con el hecho de que el 2,9% de los agricultores en la producción bajo invernadero implementan polinización manual, según lo manifestado en las encuestas iniciales. Además, se han detectado residuos de plaguicidas en mieles provenientes de Santander y Boyacá (Rodríguez et al., 2014), en este sentido, se manifiesta otra vía de exposición a plaguicidas por ingesta proveniente de estos agroecosistemas.

Por otra parte, los efectos de los plaguicidas en la microbiota del suelo, son de gran importancia ya que muchas funciones microbianas son críticas en la sostenibilidad de los cultivos y suelos (Imfeld & Vuilleumier, 2012). En este sentido, *T. pratense* (Fabaceae) es una planta de rápido crecimiento y con capacidad de fijar nitrógeno atmosférico mediante simbiosis en sus raíces con bacterias nitrificantes del género *Rhizobium*, conocidas como rizobios (Lobatón et al., 2012), estando presente en algunos agroecosistemas de tomate. Las asociaciones simbióticas rizobios-fabáceas son consideradas los sistemas de fijación de nitrógeno más importantes en la agricultura (Lloret & Martínez, 2005; Herridge et al., 2008).

Esta relación simbiótica se puede ver afectada principalmente por herbicidas como glifosato (Shankar et al., 2012), sin embargo, otros plaguicidas también la afectan como el insecticida lindano o fungicidas triazoles y ditiocarbamatos (Fisher & Hayes, 1982; Niewiadomska, 2003). En este sentido, mediante los bioensayos con *T. pratense*, se corroboró el efecto nocivo de los plaguicidas evaluados, principalmente metomilo sobre la nodulación de los rizobios, con una influencia indirecta en el proceso de fijación de

nitrógeno. Lo anterior válida lo estimado en el modelo RECAP, donde se estimó que este i.a. tiene riesgo muy alto para poblaciones del suelo hipógeo, a diferencia de lo contemplado por la PPDB (2019), donde ninguno de los i.a. evaluados representan efectos nocivos conocidos sobre los microorganismos del suelo. De esta manera, mediante los bioensayos se evidencia una afectación de los plaguicidas sobre funciones, procesos y servicios ecosistémicos de los agroecosistemas de tomate locales.

La presencia de estos residuos de plaguicidas en los ecosistemas generan procesos de bioacumulación, siendo la cantidad de sustancia que se aloja en los tejidos de un individuo al ser consumida y biomagnificación, entendida como la proporción de plaguicida que se puede transmitir a otro individuo al ser consumido en una red trófica. (Fenik et al., 2011). Los residuos de plaguicidas en agroecosistemas es una ruta de ingreso a los seres humanos mediante el consumo de alimentos en fresco, pudiéndose bioacumular en sus tejidos. En este sentido, como complemento al modelo IRR, se determinó mediante el análisis de riesgo acumulativo en la salud humana, que los insecticidas y fungicidas detectados en frutos, representan riesgo por ingesta de tomate.

El uso de métodos de evaluación de riesgo acumulativo es cada vez más común (Lehmann et al., 2017; Bhandari, et al., 2019). En este sentido, por efecto metabólico los insecticidas representarían más riesgo sobre los humanos, por ejemplo, los Carbamatos, como el carbofuran, que son inhibidores de la enzima colinesterasa que cataliza la hidrólisis de ésteres del neurotransmisor acetilcolina (Cárdenas et al., 2010) mientras fungicidas como los Triazoles inhiben la síntesis del ergosterol presente en hongos, pero, estos también pueden afectar la salud humana, por medio de la acumulación en el cuerpo, vías de inhalación, ingestión y/o cutánea pudiendo ser disruptores hormonales y enzimáticos, así como carcinogénicos (Fenik et al., 2011). Además, los plaguicidas están relacionados con mutagenicidad, inmunotoxicidad, comportamiento, disfunción reproductiva y endocrina, retrasos del desarrollo, enfermedades cutáneas, respiratorias hepáticas, neuronales, cardíacas (Cengiz et al., 2007; Darko y Akoto, 2008), siendo la población infantil y femenina, la más vulnerable a estos efectos (Fierro & Téllez, 1997; Paéz et al., 2011). Estos, se dan por eventos de exposición directa e indirecta y pueden ser causados por el ingrediente activo, impurezas, solventes, vehículos, emulsificadores y otros, de los productos formulados (Cárdenas et al., 2010).

En el panorama general, los insecticidas carbofuran e indoxacarb y los fungicidas difenoconazol y hexaconazol, representan riesgo sobre la salud humana. Según su perfil toxicológico de la PPDB (2019), tienen efectos directos sobre la reproducción y desarrollo, disruptores endocrinos, neurotóxicos, sensibilizadores cutáneos, irritantes de piel, irritantes de ojos, además tienen la posibilidad de causar inhibición de la acetilcofa, enfermedades de riñón, hígado, bazo, corazón, tiroides y posible aumento de aromatasa y producción de estrógenos, a su vez, los dos fungicidas son posibles carcinogénicos. Trabajos en Colombia, han demostrado bajo riesgo en la salud humana por consumo de tomate (Páez, et al., 2011; Arias et al., 2014) mediante metodologías diferentes a la de riesgo acumulativo. Por lo cual, con los presentes resultados se presenta un nuevo panorama sobre este aspecto de riesgo de consumo.

Otra vía de exposición para los humanos, identificada en las regiones, corresponde al contacto dérmico por labores propias del cultivo de tomate que implican contacto directo con las hojas como son las podas, el “deshoje” y colgar las plantas, en este sentido, los plaguicidas objeto de la ERA, a excepción de carbendazim, carbofuran y clorfenapir, representan riesgo de afecciones de la piel, si se tiene en cuenta el modelo IRR sumado a las detecciones en tejidos foliares. Es así como finalmente, con el panorama completo de riesgo se puede decir que la metodología ERA complementada, presenta ventajas significativas dado que se pudo validar mediante las detecciones en los diferentes compartimientos ambientales, sin embargo, como limitaciones o debilidades, se puede mencionar el modelo GUS, que no tiene en cuenta la edafodiversidad colombiana, siendo necesario avanzar en esta temática a futuro. Además, debido a la disponibilidad de información secundaria no fue posible evaluar el riesgo agudo y crónico para la salud humana para algunos plaguicidas.

Como pautas finales para la gestión del riesgo encontrado en la producción de tomate a campo abierto y bajo invernadero, podría fomentarse el uso de bioinsumos, comenzar a restringir el uso de plaguicidas y avanzar en la capacitación sobre estos aspectos a los diferentes actores, con enfoque hacia la producción agrícola sostenible. En cuanto a medidas inmediatas para el consumo de tomate, procesarlo en casa por medio del lavado con bicarbonato de sodio, infusión, pelado, elaboración de jugo y cocción, puede disminuir los residuos de plaguicidas (Kontou et al., 2004; Kong et al., 2012; Li et al.,

2012; Yang et al., 2017). Finalmente, los argumentos y puntos críticos identificados a lo largo de este capítulo, son una base sólida para decisiones profundas de solución.

3.5 Conclusiones

En general, todos los plaguicidas objeto de la ERA, representan un riesgo ambiental significativo para los organismos de los ecosistemas terrestres y acuáticos superficiales, de las dos regiones de estudio, principalmente debido a sus características toxicológicas, sumado a la implementación de dosis inadecuadas por parte de los agricultores. Este riesgo se traduce en la posibilidad de afectación de procesos ecológicos básicos de los ecosistemas.

El riesgo ecológico es mayor en agroecosistemas de tomate a campo abierto que en los que se encuentran bajo invernadero. Teniendo en cuenta que a campo abierto no existe barrera física para entrar en contacto con el cultivo, hay mayor interacción entre organismos que quedan expuestos a los residuos de plaguicidas. Además, la deriva de estos compuestos xenobióticos a campo abierto incrementa la posibilidad de alojarse en diferentes destinos ambientales aledaños al cultivo.

Los insecticidas evaluados representan alto riesgo para los servicios ecosistémicos de polinización de cultivos y ciclaje de nutrientes de las dos regiones de estudio, toda vez que se comprobó que afectan a las abejas melíferas y la formación simbiótica de rizobios en trébol rojo. En este sentido, se ven afectadas interacciones tróficas de diferentes niveles como la relación planta-bacteria-suelo, y la relación polinizador-planta, en los agroecosistemas de tomate.

Existe riesgo acumulativo sobre la salud humana por efecto de la ingesta de tomate con presencia insecticidas y fungicidas, que se puede derivar en posibles afecciones y enfermedades crónicas. Además este riesgo en la salud se combina con el derivado de la exposición directa en los cultivos por parte de los actores que allí intervienen, dado que no se estarían respetando los periodos de carencia y reentrada a los cultivos.

4 Capítulo: Percepción de actores en los territorios sobre aspectos del uso de plaguicidas y propuesta de transición agroecológica

4.1 Introducción

Desde la visión agroecológica, se incluyen elementos ambientales y humanos, abordando sus dinámicas, funciones, interrelaciones y procesos involucrados (Altieri, 1999); esto se logra, mediante la cooperación de múltiples disciplinas haciendo uso de métodos de cada una, a escalas particulares (Lyon et al., 2011). En esta vía, es fundamental contar con la participación permanente de los actores de las regiones rurales, que más allá de ser simples observadores, son los protagonistas de la investigación y transformación de modelos, dado que son quienes toman las decisiones sobre los territorios, desde fuerzas motrices que deben ser estudiadas (OECD, 2003).

Por otro lado, la agroecología es una alternativa que apunta hacia el mismo horizonte de la consecución de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), como llamado universal para lograr la inclusión social y la protección del ambiente; principalmente para 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, así como la atenuación, adaptación y resiliencia a los efectos del cambio climático. Además, se destaca el papel de la agricultura como esencial para la sostenibilidad mundial, especialmente en América Latina y el Caribe (FAO, 2016).

Lo anterior, exige cambios de paradigmas en las ciencias agrícolas y en los agricultores, para una conversión de los sistemas agrícolas convencionales actuales, hacia sistemas de producción agroecológicos, salvaguardando la integridad de los ecosistemas en los

que se desarrollan y garantizando así, su sostenibilidad. En este sentido, el uso indiscriminado de PSQ es una medida incompatible con la integridad ambiental de los agroecosistemas donde son aplicados (Ekström y Ekbohm, 2012), y es una de las problemáticas derivadas de la agricultura dependiente de insumos, que más justifica los procesos de transición agroecológicos.

Por otro lado, los problemas de los plaguicidas asociados a su uso inadecuado y efectos en el ambiente y salud humana, van en contravía de la política Colombiana de Seguridad Alimentaria (CONPES Social 113, 2008), dado que afecta la disponibilidad y acceso de las comunidades a los alimentos, así como la salud y bienestar de los consumidores por el impacto en la inocuidad química de los mismos, más aún con la evidencia ampliamente documentada sobre los LRM (FAO/WHO, 2019) y desarrollada específicamente para tomate en la presente investigación en los capítulos precedentes. Estas legítimas preocupaciones ambientales, económicas, sociales y de salud muestran que se necesitan enfoques científicos holísticos y descentralizados para desarrollar sistemas agrícolas sostenibles, teniendo en cuenta que los sistemas agrícolas convencionales están agotando la fertilidad del suelo, reduciendo la biodiversidad y afectando los recursos hídricos por su sobreextracción (Beddington et al., 2011), y en última instancia la disminución de agricultores, rezagados por la insumodependencia actual ligada a altos costos de producción (Hatt et al., 2016).

A su vez, la percepción de los agricultores sobre diferentes aspectos de producción, y específicamente sobre plaguicidas, ha sido estudiada en diferentes regiones del mundo como punto básico en la visión integral de la problemática (Shetty et al., 2010, Feola & Binder, 2010, Adeola et al., 2012). De esta manera, como complemento fundamental de esta evaluación bajo una perspectiva agroecológica, el objetivo del presente capítulo fue valorar la percepción de los productores de tomate de las regiones de estudio acerca del uso, destino ambiental y riesgo de plaguicidas, a su vez, mediante el análisis global se plantea una propuesta de transición de los sistemas convencionales de tomate hacia agroecosistemas sostenibles, en la vía de reducir el uso de plaguicidas en estos sistemas productivos en un proceso secuencial desde la situación actual, pasando por el uso balanceado con herramientas de Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIPE), hasta los procesos de conversión y rediseño basados en principios agroecológicos adoptados para los contextos locales evaluados.

4.2 Metodología

Durante el año 2017, se adelantaron encuestas semiestructuradas, para determinar la percepción de diferentes actores de la producción de tomate de las dos regiones de estudio, sobre diferentes aspectos del uso de plaguicidas y los residuos de los mismos luego del proceso de participativo realizado desde el año 2010. Se aplicaron visitando directamente a cada encuestado, su distribución y aplicación se diseñó teniendo en cuenta la ubicación y concentración de los cultivos de tomate, y la disponibilidad del encuestado, el proceso fue totalmente al azar para garantizar la percepción no influenciada. Es así como se consolidaron 134 encuestas, 67 en la provincia Guantán en Santander y 67 en la región de Ricaurte Alto en Boyacá, en las que participaron diferentes actores que intervienen en los sistemas productivos de tomate: agricultores (74,6%), operarios (16,4%) y comercializadores de agroquímicos (8,9%), estos últimos correspondieron al punto de venta principal de cada cabecera municipal.

En la Provincia Guantán, la distribución geográfica correspondió a las cabeceras y veredas de los municipios de Páramo (31,3% de las encuestas) veredas Palmarito, Los Pedregales, El Moral; Curití (29,8%) vereda Pescaderito; Valle de San José (26,9%) vereda Morro Recodo, Santa Teresa - El Molino, Santa Teresa - La Esmeralda; Confines (7,5%) vereda Palmarito y San Gil (4,5%) vereda Santa Bárbara. En la región del Ricaurte Alto la distribución geográfica correspondió a las cabeceras y veredas de los municipios de Santa Sofía (50,7% de las encuestas) veredas Barbilla y Mane, Duraznos y Colorados, Agudelo, Salitrillo, Hornillas, Guatoque; Villa de Leyva (19,4%) veredas Sopotá, Moniquira, Llano del Árbol, Salto y Lavandera; Sáchica (14,9%) veredas Centro, El Espinal, Arrayan y Canales, Tintal, Quebrada Arriba; Sutamarchán (7,5%) veredas Valle de Santo Eccehomo y Cañon; Ráquira (4,5%) vereda Roa y finalmente Tinjacá (3,0%) vereda Aposentos Bajo.

Las encuestas se diseñaron tomando como referencia el marco del esquema integrado centrado en agentes ("*integrative agent-centred*" - IAC), que contempla una aproximación al comportamiento de los agricultores, basado en: (i) teoría de comportamiento, (ii) una aproximación integral y (iii) entendimiento de el proceso de retroalimentación dinámico, enfocado a sistemas agrícolas y sus complejas relaciones sociales y ecológicas (Feola y Binder, 2010). En este sentido, las preguntas estuvieron relacionadas con los

componentes básicos de este marco, donde el comportamiento puede explicarse en función de la intención, el hábito, la estimulación psicológica y factores contextuales. Esta decisión tiene consecuencias intencionadas o no intencionadas y percibidas o no percibidas. Las consecuencias retroalimentan a los agricultores a través de cambios en los factores contextuales y solo las consecuencias percibidas son reinterpretadas por el agente (Feola & Binder, 2010), este marco permite abarcar de manera integral el comportamiento del agricultor. Las encuestas además se complementaron con secciones de generalidades de la finca, manejo de plaguicidas específico, y la percepción del destino ambiental de plaguicidas y percepción del riesgo, que se relacionan con la fase de retroalimentación de la metodología IAC.

Las encuestas estuvieron constituidas por cuatro secciones básicas: (1) *primera sección-información general*: género, edad, tamaño de la finca, cultivos que siembra, ubicación, uso específico de plaguicidas, problemas fitosanitarios comunes (2) *segunda sección-comportamiento* relacionada con la intención del actor: rol en la finca, si cuentan con alguna certificación; el hábito: tiempo cultivando, quién toma las decisiones de manejo, uso o no de equipos para protección y porqué; (3) *tercera sección- aproximación integral* relacionada con la estimulación psicológica del uso de plaguicidas: costos de los plaguicidas, costos de bioinsumos, cuál manejo prefiere; factores contextuales: si ha recibido capacitación, el grado de educación. (4) *cuarta sección-proceso de retroalimentación*: las consecuencias del uso de plaguicidas, percepción del destino ambiental, percepción del riesgo, consumo de tomate producido; la expectativa de las consecuencias: enfermedades, cuáles, y por último posibles soluciones.

El análisis estadístico correspondió a un análisis descriptivo, con medidas de tendencia central que incluyeron el promedio o la mediana, para las variables consideradas, así como la frecuencia. Se calculó el coeficiente de variación (CV) para las variables continuas, a fin de cuantificar la incertidumbre, para comparar los grados de variación entre las variables evaluadas en los dos sistemas de producción. Todos los procesos estadísticos se realizaron mediante el software estadístico R (R Core Team, 2017). Por último, según los resultados del estudio bajo la perspectiva agroecológica se planteó un esquema de transición agroecológico para el manejo fitosanitario sostenible (McRae et al., 1990; Ekström y Ekbohm, 2012) así como en principios agroecológicos de conversión y rediseño de sistemas agrícolas (Gliessman, 2015; Nicholls et al., 2016).

4.3 Resultados

La estructura poblacional de los productores encuestados fue similar a la encontrada en las encuestas iniciales (Cap. 1) (Tabla 4-1). El panorama agrícola general mostró que en la provincia Guanentá el 85,1% de los encuestados cultivan 17 especies diferentes a tomate, siendo las más comunes habichuela (47,8%), café (37,3%), maíz (31,3%), yuca (26,9%), arveja (25,4%), plátano (22,4%), pimentón (19,84%), pepino (16,4%), frijol (16,4%) y caña (11,9%). Por su parte, en la región de Ricaurte Alto, el 34,3% manifestaron que cultivan especies diferentes a tomate entre estas maíz (16,4%), arveja (11,9%), cebolla (11,9%), papa (11,9%) y pimentón (4,5%). Algunos de los cultivos reportados comparten plagas y enfermedades con el tomate.

Específicamente, se reportaron 24 problemas fitosanitarios para el cultivo de tomate a campo abierto, siendo los principales el pasador del fruto (47,8%), mosca blanca (37,3%), caracha (*Prodiplosis longifila*) (32,8%), ácaros (25,4%), trips (25,4%), gota (25,4%), botrytis (19,4%) y virus (14,9%). En cuanto a la producción bajo invernadero, se reportaron 26 problemas fitosanitarios, siendo los más mencionados mosca blanca de los invernaderos (97,0%), cogollero (95,5%), mildew (89,6%), minador (80,6%), *Botrytis* sp. (79,1%), virus (77,6%), pasador del fruto (71,6%), ácaros (70,1%), gota (62,7%) y trips (55,2%). Para el manejo de estos agentes patógenos y artrópodos, los productores implementan diferentes estrategias. En este sentido, en la tabla 4-1 se presentan los principales aspectos poblacionales y de manejo fitosanitario determinados mediante las encuestas en las regiones de estudio.

Tabla 4-1. Aspectos poblacionales y de manejo fitosanitario de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio. N = 136.

Aspecto poblacional (Unidades)	Campo abierto (Santander) n = 67	Invernadero (Boyacá) n = 67
<i>Proporción de género (%)</i>		
Mujeres	50,7	27,0
Hombres	49,3	73,0
<i>Rango de edad (Años)</i>	18 - 70	17 - 73
<i>Propietarios (%)</i>	57,6	35,8
<i>Nivel de educación formal (%)</i>		
Primaria	52,2	56,8
Bachillerato	40,3	35,8
Técnico	4,5	4,4
Profesional	3,0	3,0
<i>Experiencia en tomate (Años)</i>	13,0	9,9

Aspecto de producción (Unidades)	Campo abierto (Santander) n = 67	Invernadero (Boyacá) n = 67
Manejo fitosanitario		
<i>Tipo de manejo (%)</i>		
Manejo químico	97,0	97,0
Manejo integrado	No	1,5
Manejo físico	7,5	No
Manejo cultural	7,5	No
Manejo orgánico	6,0	13,4
Control biológico	4,5	No
<i>Registro monitoreo (%)</i>	19,4	22,4
<i>Toma de decisiones (%)</i>		
Criterio propio	53,7	58,2
Monitoreo	46,3	No
Asesoría vendedores	28,4	6,0
Asistencia técnica	17,9	37,3
<i>Equipos e implementos de aplicación (%)</i>		
Bomba de espalda	82,1	11,9
Bomba estacionaria	67,2	94,0
Bomba de espalda a motor	4,5	No
Espolvoreadora	1,5	9,0
Por medio del riego	No	11,9
Boquillas diferentes	6,0	14,9
<i>Implementos de protección (%)</i>		
Tapabocas	47,8	97,0
Traje	11,9	82,1
Ropa de aplicación	32,8	No
Guantes	31,3	80,6
Máscara "Full face"	3,0	14,9
Máscara carbón activado	1,5	14,9
<i>Capacitación uso de plaguicidas (%)</i>		
Casas comerciales	55,2	16,4
Profesionales agrícolas	6,0	23,9
Entidades gubernamentales	9,0	16,5
Entidades gremiales y académicas	10,5	6,0
<i>Capacitación residuos de plaguicidas (%)</i>		
Casas comerciales	25,4	7,5
Profesionales agrícolas	4,5	7,5
Entidades gubernamentales	< 1,0	1,5
Entidades gremiales y académicas	4,5	7,5
<i>Certificaciones (%)</i>	7,5	3,0

Es evidente que los productores en las dos regiones prefieren el manejo basado en productos de síntesis química, en la provincia Guantán principalmente por su efectividad (13,4%) o por tradición (6,0%), mientras en la región de Ricaurte Alto la preferencia de este tipo de manejo esta dada por su efectividad (43,3%), el costo (3,0%) o por tradición (1,5%). Como complemento a la información de la tabla 4-1, en cuanto a las actividades relacionadas con este manejo, ningún productor separa los equipos según el tipo de producto a aplicar, en las dos regiones. A su vez, en la provincia Guantán hacen uso de boquillas de cono hueco (3,0%) y abanico plano (1,5%), además, aditamentos como la "y" en el acople de la punta de la lanza de aplicación (1,5%). Por su parte, en la región de

Ricaurte Alto, usan boquillas de cono hueco (10,4%), abanico plano (6,0%) y cono sólido (3,0%) y el regulador de presión (3,0%).

Respecto a los implementos de protección de salud humana, en la provincia Guantán es obligatorio para el 3,0% de los encuestados, sin embargo, el 61,2% los emplean; quienes no hacen uso de estos implementos lo hacen principalmente por comodidad (38,8%), costumbre (16,4%), desconocimiento (3%), costos (1,5%) o disponibilidad (1,5%). Mientras, en la región de Ricaurte Alto, el uso de implementos de protección de salud humana es obligatorio para el 71,6% de los encuestados, y los usan el 97%; quienes no los usan manifiestan razones como la comodidad (14,9%), costos (11,9%), disponibilidad (7,5%) o desconocimiento (6,0%).

En cuanto a la capacitación, el 73,1% de la población encuestada en la provincia Guantán afirma que ha recibido capacitación sobre el uso de plaguicidas, mencionando entidades como el Comité de Cafeteros, la Secretaría de Agricultura Municipal, Secretaría de Salud, ICA y Asohofrucol. A su vez, en la misma provincia, el 68,7% de los encuestados ha escuchado sobre residuos de plaguicidas y el 38,8% ha recibido capacitación sobre este aspecto por parte del Comité de Cafeteros. Por su parte, el 50,7% de la población encuestada en la región de Ricaurte Alto ha recibido capacitación sobre el uso de plaguicidas por parte de la Secretaría de Agricultura Municipal, Secretaría de Salud, SENA, ICA, Campo Limpio (Disposición y envases), y entidades extranjeras no especificadas; en la misma región el 59,7% ha escuchado sobre residuos de plaguicidas y el 22,4% afirma haber recibido capacitación sobre este aspecto por parte del SENA, Secretaría de Agricultura Municipal y la UJTL (Tabla 4-1).

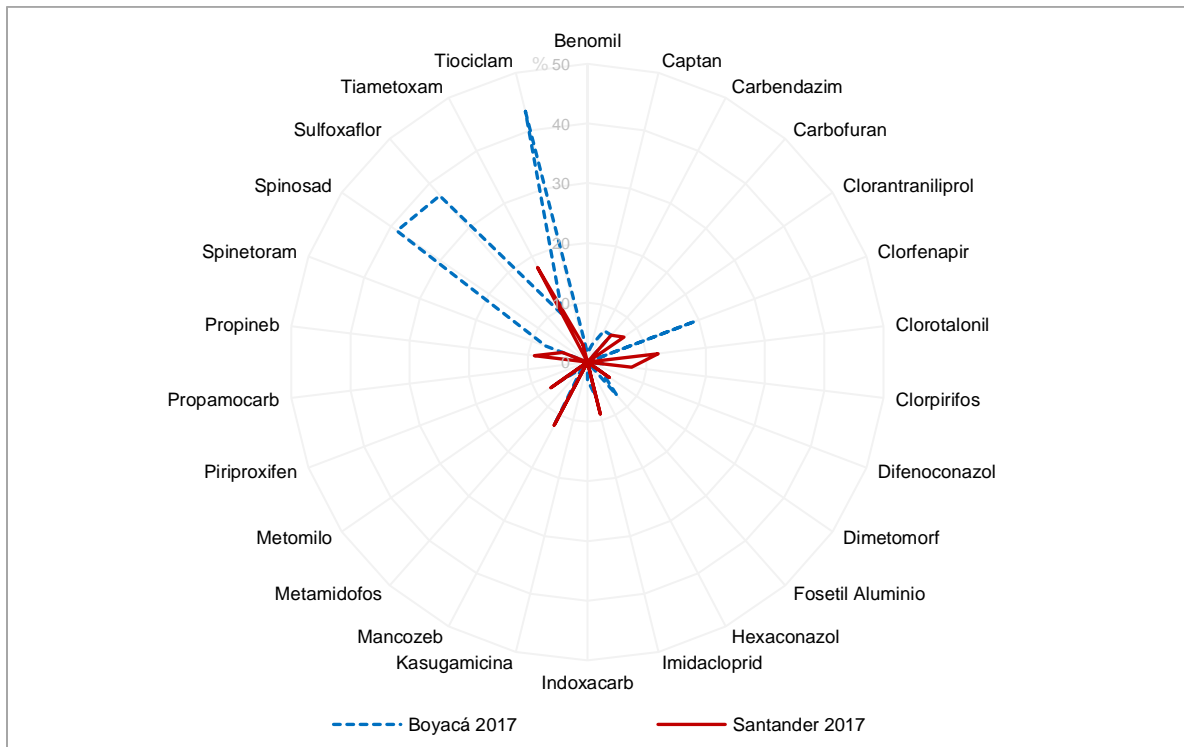
Por otra parte, se debe destacar que no es común la certificación de fincas en las dos regiones de estudio (Tabla 4-1), en la provincia Guantán los encuestados mencionan dos entes de certificación al ICA y a la Federación Nacional de Cafeteros, y en la región de Ricaurte Alto solamente mencionan al ICA. La falta de cultura de certificación rural, se refleja claramente en el riesgo ambiental determinado en los capítulos previos. Bajo este panorama, en las dos regiones, se realiza el manejo fitosanitario en fincas de aproximadamente 12 ha en Santander y 18 ha en Boyacá, al interior de las cuales se encuentran los cultivos de tomate y otros mencionados previamente, donde las aplicaciones se realizan cada siete días en las dos regiones, aplicando en general tres

i.a, y cinco i.a. diferentes por ciclo, con periodos de carencia de cinco y siete días, en Santander y Boyacá, respectivamente, según lo reportado (Tabla 4-2).

Tabla 4-2. Aspectos de uso de plaguicidas de los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.

Factor de producción	Campo abierto (Santander)			Invernadero (Boyacá)		
	Media	Mediana	CV	Media	Mediana	CV
Area total de la finca (m ²)	14.060,0	12.689,6	71,1	18.220,1	12.800	68,9
Frecuencia de aplicación (días)	7,1	7,0	76,8	10,5	7,0	53,6
Plaguicidas por ciclo (número)	3,5	3,0	31,1	4,6	5,0	29,1
Periodo de carencia (días)	4,9	5,0	63,9	6,2	7,0	39,8

Los i.a. más frecuentes mencionados en Santander fueron tiametoxam (17,9%), mancozeb (11,9%), clorotalonil (11,9%), propineb (9,0 %) e imidacloprid (9,0%), mientras los i.a. más frecuentes en Boyacá fueron tiociclam (43,3%), spinosad (38,8%), sulfoxaflor (37,3%), clorfenapir (19,4%), propineb (11,9%) y mancozeb (11,9%) (Gráfica 4-1). En la tabla 4-3 se listan todos los i.a. mencionados en las regiones de estudio en las encuestas de percepción de 2017.



Gráfica 4-1. Comparación entre plaguicidas mencionados (%) en las encuestas de percepción de las regiones de estudio de Boyacá y Santander en 2017.

Tabla 4-3. Plaguicidas y otros insumos mencionados en las encuestas de percepción de 2017 en los sistemas de producción a campo abierto y bajo invernadero de las regiones de estudio.

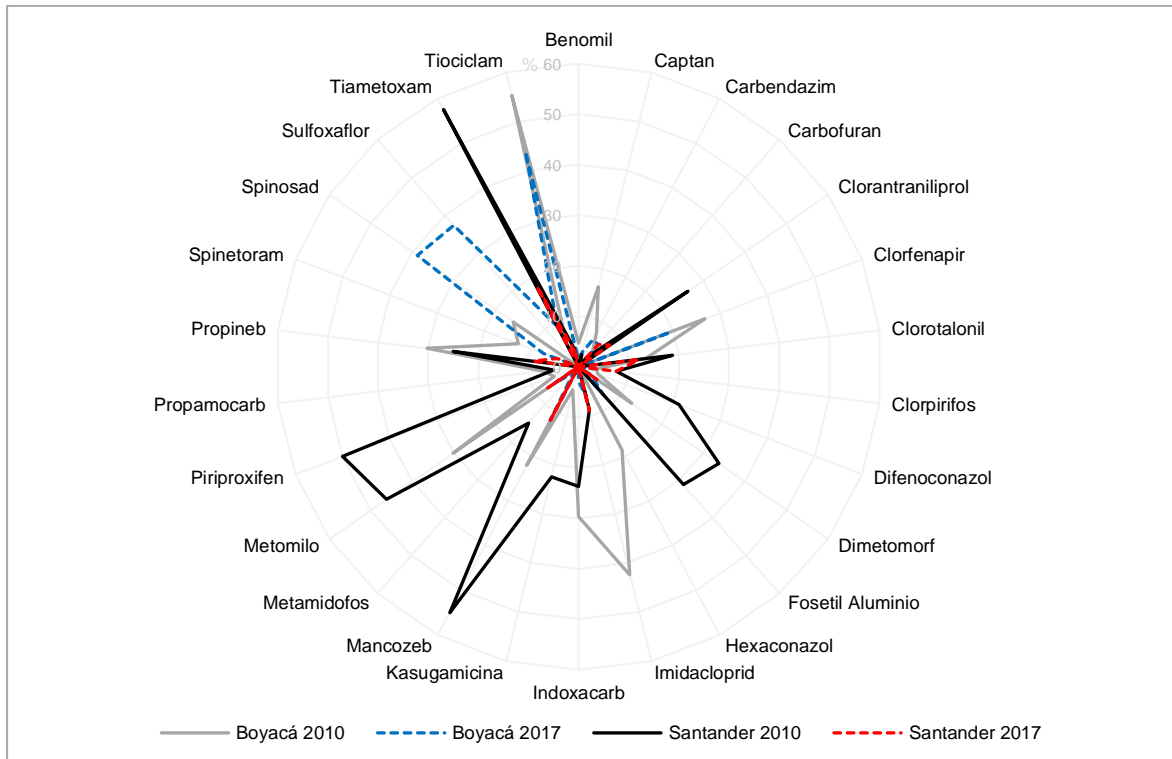
Grupo	Ingrediente activo / Especie	Tipo	Origen	Cat.	Reg.*	Reporte
Agente Biológico	<i>Burkholderia cepacia</i>	Fu	Bio	III	NO	Be
Avermectina	Abamectina	Ac	Sq	II	SI	Be/Se
Avermectina	Benzoato de emamectina	In	Sq	III	SI	Be
Benzimidazol	Benomil	Fu	Sq	III	SI*	Be
Benzimidazol	Carbendazim	Fu	Sq	III	SI*	Be
Benzonitrilo	Clorotalonil	Fu	Sq	III	SI	Se
Bipiridilo	Paraquat	He	Sq	I	SI	Se
Carbamato	Carbofuran	In	Sq	IA	NO*	Be/Se
Carbamato	Metomilo	In	Sq	I	NO	Be/Se
Carbamato	Pirimicarb	In	Sq	III	NO	Se
Carbamato	Propineb	Fu	Sq	III	SI*	Be/Se
Carboxamida	Carboxina	Fu	Sq	III	NO	Be
Cloroacetamidas	Butaclor	He	Sq	II	NO*	Se
Cloronicotinilico	Acetamiprid	In	Sq	II	SI	Se
Derivado Microorganismos	Sulfato de gentamicina	Ba	Sq	III	SI	Se
Diacilhidrazida	Metoxifenocida	In	Sq	II	SI	Se
Diamida	Flubendiamide	In	Sq	III	SI	Be
Diamida Antranílica	Clorantraniliprol	In	Sq	III	SI	Se
Ditiocarbamato	Mancozeb	Fu	Sq	III	SI	Be/Se
Espinosinas	Spinetoram	In	Sq	III	SI	Be/Se
Espinosinas	Spinosad	In	Sq	III	SI	Be
Estrobirulina	Kresoxim Metil	Fu	Sq	II	SI	Be
Estrobirulina	Piraclostrobin	Fu	Sq	III	NO	Be
Extracto vegetal	Ajo-Ají	In	Bot	IV	SI	Se
Extracto vegetal	<i>Chenopodium ambrosioides</i>	Fu/Ba	Bot	NA	NO	Se
Fenil éter	Piriproxifen	In	Sq	II	SI	Be
Fenil Pirazoles	Fipronil	In	Sq	II	SI*	Se
Fosfonicos	Fosetil Aluminio	Fu	Sq	III	SI	Be
Fosfonoglicina	Glifosato	He	Sq	III	NO	Be/Se
Ftalimida	Captan	Fu	S	III	SI	Be
Inorgánico	Azufre	Fu	Min	III	SI	Be
Morfolinas	Dimetomorf	Fu	Sq	III	SI	Be/Se
Neonicotinoide	Imidacloprid	In	Sq	II	SI	Be/Se
Neonicotinoide	Tiacloprid	In	Sq	II	SI	Be
Neonicotinoide	Tiametoxam	In	Sq	III	SI*	Be/Se
Nereistoxinas	Tiociclam	In	Sq	II	SI*	Be/Se
Organofosforado	Clorpirifos	In	Sq	II	SI	Be/Se
Organofosforado	Dimetoato	In	Sq	II	NO*	Be
Organofosforado	Metamidofos	In	Sq	IA	NO*	Be
Oxadiacinas	Indoxacarb	In	Sq	II	NO	Be
Oxazoles	Famoxadona	Fu	Sq	III	SI	Se
Piretroide	Bifentrina	In	Sq	II	SI	Be/Se
Piretroide	Cipermetrina	In	Sq	II	SI	Be
Pirroles	Clorfenapir	In	Sq	II	SI*	Be
Sulfoximinas	Sulfoxaflor	In	Sq	III	SI	Be/Se
Triazina	Ciromazina	In	Sq	II	SI	Be
Triazoles	Difenoconazol	Fu	Sq	II	SI	Be
Triazoles	Miclobutanil	Fu	Sq	III	SI	Se

Grupo: químico u otro, **Tipo:** Acaricida (Ac), Bactericida (Ba), Fungicida (Fu), Herbicida (He), Insecticida, **Origen:** Biológico (Bio), Botánico (Bot), Mineral (Min), Síntesis química (Sq), **Cat.:** Categoría Toxicológica OMS, **Reg.:** Registro ICA para Tomate (Registros Nacionales 2010/2019), * No aprobado por CEE Regulación 1107/2009 (91/414) European Commission EU Pesticide Database. **Reporte:** Santander encuesta (Se), Boyacá encuesta (Be). *En negrilla los i.a. no reportados en la encuesta de 2010.*

De esta manera, en Santander se reportaron 27 principios activos, de los cuales el 92,5% son síntesis química y el 2,5% de origen botánico, correspondientes a insecticidas (15 i.a.), fungicidas (6 i.a.), herbicidas (3 i.a.), fungicida-bactericida (1 i.a.), acaricida (1 i.a.), pertenecientes a todas las categorías toxicológicas I y IA (3 i.a.), II (9 i.a.), III (13 i.a.), IV (1 i.a.), siendo los grupos más comunes Carbamatos y Neonicotinoides. Por otra parte, no cuentan registro ICA para cultivo de tomate el 22,2% de los productos reportados, siendo los i.a. carbofuran, metomilo, pirimicarb, butaclor, glifosato y *Ch. ambrosoides*, a su vez, no están aprobados por la CEE la misma proporción de i.a como son carbofuran, propineb, butaclor, fipronil, tiametoxam y tiociclam (Tabla 4-3).

Por su parte, en Boyacá se reportaron 35 principios activos, de los cuales el 94,2% son síntesis química, el 2,9% de origen biológico y el 2,9% de origen mineral, correspondientes a insecticidas (20 i.a.), fungicidas (13 i.a.), herbicida (1 i.a.), acaricida (1 i.a.), pertenecientes a las categorías toxicológicas I y IA (3 i.a.), II (14 i.a.), III (18 i.a.), ninguno es categoría IV, siendo los grupos más comunes Carbamatos, Neonicotinoides y Organofosforados. Por otra parte, no cuentan registro ICA para cultivo de tomate el 22,8% de los productos utilizados, siendo los i.a. metomilo, carboxina, piraclostrobin, glifosato, dimetoato, metamidofos, indoxacarb y *B. cepacia*, a su vez, no están aprobados por la CEE el 25,7% de los productos, siendo los i.a. benomil, carbendazim, carbofuran, propineb, tiametoxam, tiociclam, dimetoato, metamidofos y clorfenapir (Tabla 4-3).

En general en las dos regiones de estudio se reportaron 48 principios activos, el 91,7% de síntesis química, donde los grupos más comunes fueron Carbamatos y Neonicotinoides, siendo comunes en las dos regiones el 29,1% de los i.a., a su vez, se reportaron nuevos plaguicidas como pirimicarb, butaclor, sulfato de gentamicina, metoxifenocida, sulfoxaflor, *Ch. ambrosoides*, en Santander y kresoxim Metil, piraclostrobin, sulfoxaflor, en Boyacá, respecto a las encuestas y seguimientos de 2010, de los cuales no cuentan con Registro ICA para tomate sulfoxaflor, pirimicarb, piraclostrobin y *Ch. ambrosoides*, mientras el i.a. butaclor no cuenta ni con Registro ICA para tomate ni aprobación de la CEE (Tabla 4-3). En el mismo sentido, a manera de comparación, en la figura 4-3 se presentan los i.a. reportados en las encuestas y seguimientos de 2010, respecto a los reportados en las encuestas de percepción de 2017 en las regiones de estudio.



Gráfica 4-2. Comparación entre plaguicidas mencionados (%) en las encuestas de las regiones de estudio de Boyacá y Santander en 2010 y 2017.

En comparación, respecto a la frecuencia de los plaguicidas más comunes mencionados en los dos momentos de observación 2010 y 2017, en la provincia Guanentá, se mantiene los i.a. tiametoxam y mancozeb como los más utilizados, a partir de ese punto, cambia el patrón de manejo ya que en 2010 la lista de los primeros cinco continuaba con piriproxifen, metomilo y dimetomorf, mientras en 2017 pasaron a ser clorotalonil, propineb e imidacloprid (Gráfica 4-2).

A su vez, en la región de Ricaurte Alto, se mantiene el i.a. tiociclam como el más utilizado, a partir de ese punto, cambia el patrón de manejo ya que en 2010 la lista continuaba con imidacloprid, metomilo, propineb e indoxacarb, mientras en 2017 pasaron a ser spinosad, sulfoxaflor, clorfenapir y propineb. Se resalta que los i.a. más usados correspondientes a tiametoxam y tiociclam en Santander y Boyacá, respectivamente, no están aprobados por la CEE, a su vez, que el i.a. metomilo, aunque se sigue usando, ya no se encuentra entre los más aplicados en las regiones de estudio (Gráfica 4-2).

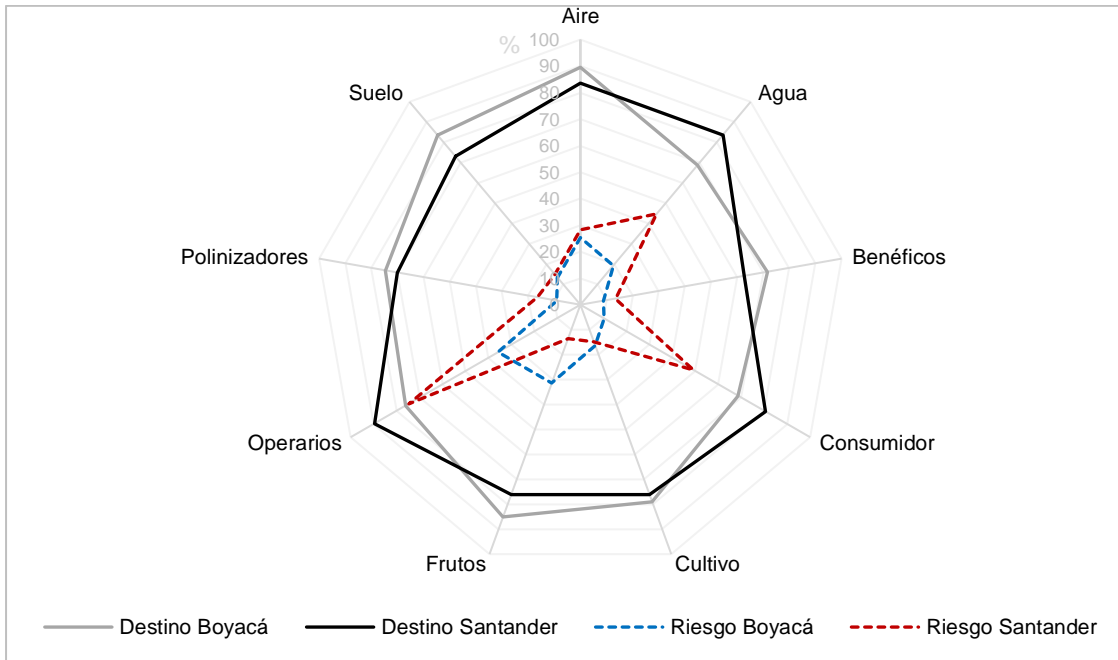
Percepción

Los actores encuestados en la provincia Guanentá tienen una percepción de aceptación de los PSQ del 7,5%, considerando que son asequibles, con precios justos (88,1% de los encuestados) y efectivos (52,2%), y la mayoría (88,1%) percibe que contaminan. Respecto a los productos de origen biológico la percepción positiva es superior (35,8%) respecto a los químicos, pero no perciben su efectividad (17,9%), y el 7,5% consideran que actualmente son asequibles.

En la región de Ricaurte Alto, tienen una percepción de aceptación del 62,7% hacia los PSQ, considerando que son asequibles, con precios justos (71,6%) y efectivos (89,6%), y también perciben que contaminan (83,6%). En cuanto a los productos de origen biológico la percepción positiva es del 41,8%, los consideran efectivos (43,3%), y el 20,9% consideran que actualmente son disponibles, pero con precios elevados.

Por otra parte, la percepción general de los actores en Santander sobre los plaguicidas es que representan riesgo para la salud humana (98,5%), para la naturaleza (92,5%) y que representan un problema al encontrarse sobre los alimentos (95,5%), situación similar en Boyacá, donde también perciben el riesgo para la salud humana (91,0%), para la naturaleza (85,1%) y los alimentos (94,0%).

Al preguntar sobre su opinión sobre el destino ambiental, referida al lugar donde se alojan los plaguicidas después de la aplicación, en Santander consideran que estos compuestos se dirigen en orden al operario (89,6%), agua (83,6%), aire (83,6%), consumidor (80,6%) y cultivo (76,1%), en Boyacá por su parte, consideran que al aire (89,6%), fruto (85,1%), suelo (83,6%), cultivo (79,1%) y operario (76,1%). Por otra parte, su percepción del riesgo para estos compartimientos ambientales, en Santander consideran el riesgo de mayor a menor nivel para el operario (74,6%), consumidor (49,3%), agua (44,8%), aire (28,4%), polinizadores (16,4%), mientras en Boyacá lo perciben en orden decreciente para el operario (35,8%), fruto (31,3%), aire (25,4%), agua (19,4%), cultivo (16,4%). Los valores porcentales reportados para la percepción sobre el destino ambiental son superiores a los de la percepción del riesgo (Gráfica 4-3).



Gráfica 4-3. Percepción sobre el destino ambiental de plaguicidas (%) y el riesgo sobre estos mismos compartimentos (%) por parte de los actores encuestados.

La exposición directa a los plaguicidas en las regiones de estudio es alta para los operarios, agricultores y habitantes rurales en la medida que según lo encontrado para las dos regiones de Santander y Boyacá, los periodos de reingreso al cultivo son de máximo 24 horas después de la última aplicación, a su vez, las aplicaciones las realizan semanalmente, es decir que en Santander se realizarían en promedio 16 aplicaciones por ciclo de cultivo (112 días) y en Boyacá en promedio 24 aplicaciones por ciclo (168 días). A pesar de que cerca del 60% de los encuestados en las dos regiones de estudio manifiesta conocer el significado de las categorías toxicológicas, solo el 16,4% y 41,8% de los encuestados en Santander y Boyacá, respectivamente tienen el hábito de bañarse después de cada aplicación de plaguicidas.

Además la otra vía de exposición es la ingesta del tomate producido en la región, toda vez que la mediana de consumo de tomate según los encuestados en Santander está en 175,8 g día⁻¹, y su frecuencia de consumo de 149,8 días año⁻¹, y en Boyacá la mediana de consumo de tomate está en 142,5 g día⁻¹, y su frecuencia de consumo en 156,0 días

año⁻¹, siendo un consumo *per capita*, superior al promedio nacional 39,94 g día⁻¹ (FAOSTAT, 2017), situación que incrementa la exposición.

En las dos regiones ninguno de los encuestados está afiliado a ninguna Aseguradora de Riesgos Laborales (ARL), y a Empresas Promotoras de Salud (EPS), en Santander el 92,5% y en Boyacá el 34,3% de los encuestados. A su vez, han presentado enfermedades o afecciones de salud relacionadas con plaguicidas durante el tiempo que llevan cultivando tomate el 11,9% y 23,9% de los encuestados en Santander y Boyacá, respectivamente, principalmente reportan ardor, escozor en ojos y manos, dolores de cabeza y mareos. En cuanto a exámenes específicos como el de Acetil Colinesterasa en sangre, como medida indirecta de la acción de Organoclorados u Organofosforados en la salud humana, se lo han realizado una sola vez en el tiempo que llevan cultivando el 1,5% y 13,5% de los encuestados en las regiones estudiadas en Santander y Boyacá, respectivamente.

Retroalimentación de soluciones planteadas por los actores

Luego del proceso de retroalimentación realizado al finalizar cada encuesta, se agruparon soluciones generales dadas por los mismos actores. En la provincia Guantánamo el 88,1% de los encuestados propuso alguna solución agrupadas en 16 aspectos como son: uso de productos biológicos (32,8%), capacitación (25,4%), no usar más plaguicidas (23,9%), reducir el uso de plaguicidas (20,9%), prevención (13,4%), promoción y sensibilización (11,9%), cambiar las costumbres (9,0%), implementación de subsidios para el uso de otras alternativas de manejo (9,0%), retirarse de la agricultura (7,5%), ampliar mercados que valoren productos limpios (6,0%), implementar otro tipo de manejo fitosanitario (6,0%), intervención de entidades del gobierno (4,5%), tecnología en los métodos de aplicación (4,5%), difusión de información de riesgo e impacto ambiental y en salud humana (4,5%), producir menos tóxico (3,0%), tecnologías de barreras y flitros (1,5%).

Mientras en la región de Ricaurte Alto el 11,9% de los encuestados propuso soluciones, agrupadas en siete aspectos: más capacitación sobre el uso de plaguicidas (4,5%), prevención (3,0%), promoción y sensibilización (3,0%), ampliar mercados que valoren productos limpios (1,5%), intervención de entidades del gobierno (3,0%), uso de productos biológicos (1,5%), tecnologías de barreras y flitros (1,5%).

Proceso de transición de sistemas agrícolas convencionales de tomate hacia sistemas agroecológicos.

A lo largo del presente estudio se ha podido comprobar como en los dos sistemas productivos y regiones de estudio se aplican en exceso 116 i.a. de síntesis química, de los cuales 22 se encuentran como residuos en diferentes compartimientos ambientales, y dentro de estos algunos representan riesgo ecológico y sobre la salud humana. Además, es evidente el desconocimiento de otras medidas de manejo en general por parte de los agricultores, este panorama refleja una intensificación del uso de plaguicidas, que justifica el tránsito hacia alternativas para la reducción su uso (Figura 4-1).

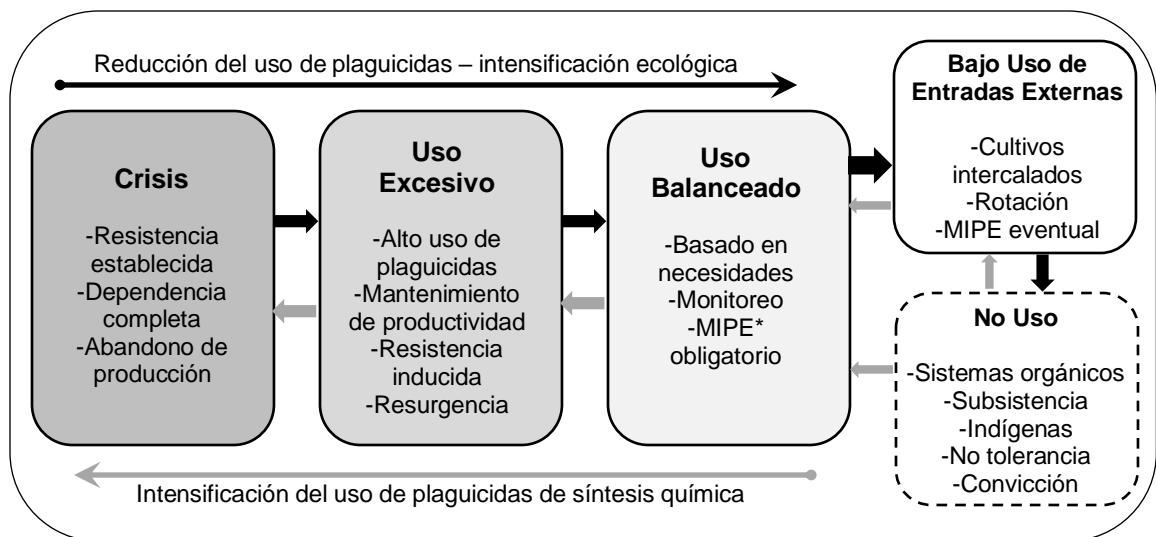


Figura 4-1. Esquema interpretativo del uso de plaguicidas en sistemas de producción convencionales de tomate a campo abierto (Santander) y bajo invernadero (Boyacá). Basado en: Ekström y Ekbon (2012). *MIPE: Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades.

Del esquema de la figura 4-1, se puede deducir que aún no se ha llegado a un escenario de “crisis” por el uso de plaguicidas, teniendo en cuenta que no hay dependencia exclusiva de estos, dado que se reporta el uso de principios activos e insumos de origen botánico y biológico, por otro lado, no se detectaron plaguicidas en las fuentes hídricas de la región, a su vez, los agricultores no han abandonado el cultivo y según manifiestan, no piensan hacerlo. Es así como la producción de tomate estudiada se encuentra en un escenario de “uso excesivo” de plaguicidas, siendo necesaria la transición hacia un “uso balanceado” y de “bajo uso de entradas externas”, es decir una reducción del uso de plaguicidas e intensificación ecológica (Figura 4-1).

Bajo un enfoque ecológico de manejo de plagas y enfermedades en agroecosistemas, se consideran aspectos como: i) Evaluación ecológica e impacto y monitoreo de aspectos agro-ambientales, ii) Reducción del uso de PSQ, iii) Tecnologías de bajas entradas externas mediante un enfoque ecológico y iv) Un manejo sostenible enfocado a las problemáticas sociales y ambientales actuales (Ekström y Ekbom, 2012). Siguiendo el marco conceptual planteado para la presente evaluación bajo una perspectiva agroecológica (Figura 1, Introducción), mediante la secuencia lógica de investigación, se plantea entonces un proceso de transición de sistemas productivos convencionales de tomate hacia el manejo sostenible de sus agroecosistemas, que implica procesos complejos a diferentes escalas y dimensiones (Figura 4-2).

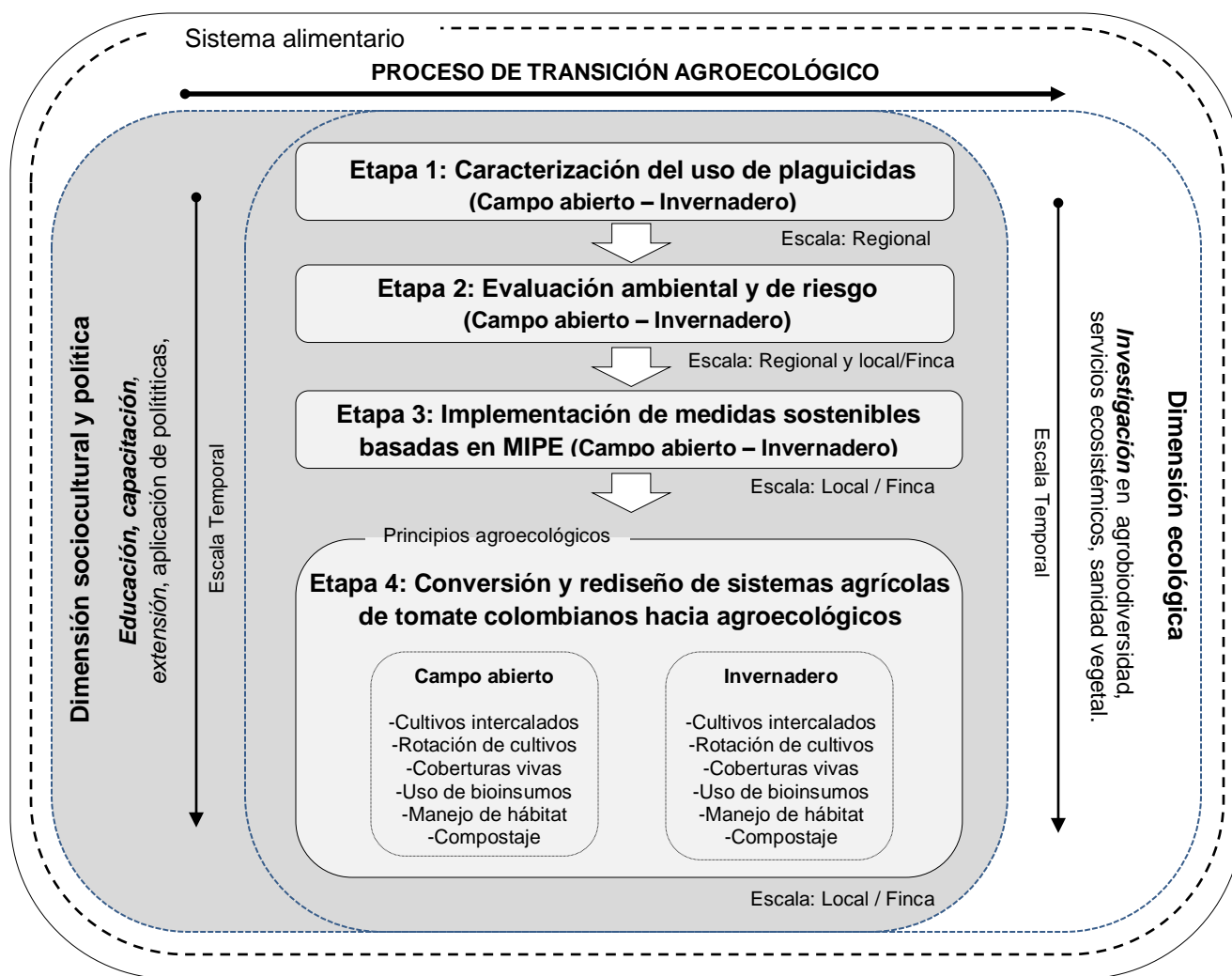


Figura 4-2. Propuesta del proceso de conversión agroecológica de sistemas de producción convencionales de tomate a campo abierto (Santander) y bajo invernadero (Boyacá).

Este proceso de transición impacta al sistema alimentario actual al cual pertenece la producción de tomate, además se lleva a cabo a escala regional y local (finca) e implica medidas enmarcadas en la *dimensión sociocultural y política*, así como la *dimensión ecológica*; además, comprende cuatro etapas básicas: 1) Caracterización del uso de plaguicidas, 2) Evaluación ambiental y de riesgo, 3) Implementación de medidas de manejo sostenibles basadas en MIPE y 4) Conversión y rediseño de sistemas agrícolas de tomate (Figura 4-2). A continuación se explica el proceso de transición en sus diferentes medidas desde las dimensiones y etapas:

Medidas desde la dimensión sociocultural y política

Aspectos socioculturales

Para lograr un cambio evidente en el proceso de transición agroecológico en estos sistemas de producción convencionales de tomate, es fundamental contar con la participación y real disposición de todos los actores del sistema alimentario, iniciando por los agricultores, quienes toman las decisiones iniciales sobre estos sistemas de producción y finalizando en los consumidores, quienes tienen la decisión de compra. Por esta razón, la figura 4-1 representa en gris esta dimensión como parte fundamental del cambio.

Educación: la dispersión de las prácticas entre fincas demuestra el reto de cambiar la cultura de producción en las dos regiones, entendiendo y rescatando las capacidades de cada uno de los actores, además asumiendo su lógica heredada. Es así como la educación es el factor clave para lograr disminuir el uso de plaguicidas de síntesis química. Es preponderante asumir este reto en los centros educativos locales, desde la primera infancia hasta los adultos, en el hogar, en escuelas, colegios (incluir estas temáticas en los Proyectos Ambientales Escolares-PRAE), instituciones técnicas y tecnológicas, así como universidades; específicamente, se propone que las instituciones de educación superior con programas de agricultura y agroecología, participen activamente en este proceso, transmitiendo el conocimiento generado de manera esencial a los centros educativos rurales.

Además, la educación de los consumidores sobre el consumo de alimentos seguros sin contaminantes de origen químico o microbiológico, desde el hogar y centros educativos, desde la primera infancia hasta la adultez, acompañada de campañas sólidas en medios

de comunicación y las redes sociales virtuales actuales. Con un mensaje básico sobre el poder de decisión de compra informada. Este aspecto, se ha venido potenciando últimamente en las generaciones jóvenes principalmente, quienes son compradores más informados y conscientes de la sostenibilidad del planeta. Desde la UJTL, por iniciativa del autor, se genera un aporte a este aspecto, con la creación del programa profesional en Agroecología mediante Resolución 008924 Ministerio de Educación Nacional (MEN) del 27 de agosto de 2019, desde el cual se espera aportar en estos procesos de educación tanto a nivel rural, como con los consumidores, es decir sobre el sistema alimentario.

Capacitación: en cuanto a la capacitación sobre aspectos de manejo fitosanitario, actualmente es aportada casi exclusivamente por las casas comerciales con un claro sesgo hacia el uso de agroinsumos y en menor medida por entidades gubernamentales locales y nacionales. Esta debe cambiar a un modelo de *extensión*, con acompañamiento como el modelo de segimientos en las fincas y talleres participativos liderados por entidades neutrales tanto gubernamentales como privadas. Demostrando al agricultor que sus costos de producción y planes de negocio no se ven afectados con un cambio hacia la disminución de uso de plaguicidas, dado que su percepción general actual sobre el cultivo es de rendimiento y productividad. Sin esta capacitación, enfocada en cada etapa de transición, no será posible la aplicación de los resultados de investigación en la dimensión ecológica, ni la adopción de las prácticas locales, ni un cambio cultural.

Por otro lado, esta investigación contó con la participación de agricultores de forma individual, algunos de ellos pertenecientes a asociaciones, o bien, a grupos focalizados de entidades como el SENA, no obstante, se esperaría más organizaciones locales ante el volumen de producción. En este sentido, es necesario consolidar las organizaciones locales y fortalecerlas, mediante intervenciones sociales rurales, dado que el esquema cooperativo potencia las capacidades locales, aportando beneficios sociales y económicos. Además, las empresas de agroquímicos, deben cambiar su modelo de negocio gradualmente, desde plaguicidas de alta degradación y especificidad, bioinsumos, hasta llegar a ser partícipes de la extensión con medidas sostenibles, dada su influencia demostrada sobre los productores. En este sentido, estas medidas propuestas conllevan a un empoderamiento de los diferentes actores del sistema alimentario sobre la problemática, sus efectos, consecuencias y necesidad de cambio.

Aplicación de políticas

Respecto a las políticas conducentes para lograr esta transición, se propone comenzar desde políticas sobre educación y capacitación encaminadas a las medidas planteadas anteriormente. A su vez, las normas vigentes enfocadas en cada etapa propuesta, velando por su cumplimiento, más allá de crear nuevas, a continuación se presentan las más relevantes por etapa:

Etapa 1: se enmarca en las normas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y el ICA que se basan en las disposiciones de la Comunidad Andina de Naciones (CAN), como la Decisión 808 de 2015 - Norma andina para el registro y control de plaguicidas químicos de uso agrícola, y la Resolución 2075 de 2019 de la CAN que actualiza el manual técnico andino para el registro y control de plaguicidas químicos de uso agrícola.

Etapa 2: se destacan, el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3514 de 2008 sobre la Política nacional fitosanitaria y de inocuidad para las cadenas de frutas y otros vegetales, así como la Resolución 2906 de 2007 del MADR y el Ministerio de la Protección Social que establece los LMR en alimentos para consumo humano y en piensos o forrajes, que acoge los LMR de la FAO (*Codex alimentarius*), además en esta etapa se contemplan normas internacionales, como las de la UE.

Etapa 3: se contempla la Resolución 03002 de 2017 del ICA sobre los requisitos para la certificación en BPA en producción primaria de vegetales y otras especies de consumo humano, así como el Manual Técnico de BPA en la producción de tomate bajo condiciones protegidas de la FAO en 2007, sumado al Decreto 1072 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo del Ministerio del Trabajo, dado que no hay condiciones dignas de trabajo a la luz de esta normatividad en las regiones estudiadas.

Etapa 4: se relaciona la política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del año 2012. Así como la Resolución 000199 de 2016 del MADR sobre el reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaquetado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y comercialización de productos agropecuarios ecológicos, además, la Resolución 00148 de 2004 de MADR sobre el sello de alimento ecológico y

se reglamentación de su otorgamiento. Por último, la Resolución 000464 de 2017 del MADR por la cual se adoptan los lineamientos estratégicos de política pública para la Agricultura Campesina, Familiar y Comunitaria. En esta etapa se propone revisar la legislación sobre precios de bioinsumos, para tener mayor acceso por parte de los productores.

Estas políticas deben ir ligadas a las internacionales de comercio justo y consumo responsable, enfocadas a los ODS desde la normatividad ambiental, social y agrícola mundial. Este grupo de normas ya establecidas, en general muestran una preocupación sobre esta transición hacia una alimentación saludable, y en este contexto comenzar desde la seguridad alimentaria para llegar a una soberanía alimentaria y en últimas poder fortalecer un sistema alimentario alternativo. Por último, la escala temporal de estos cambios puede ser del orden de años, reconociendo el avance en la normatividad, éstas llevan más de una década sin cambios evidentes en la sociedad y no será así hasta lograr un cambio cultural en todos los actores del sistema alimentario.

Medidas desde la dimensión ecológica

Durante el proceso de transición agroecológico propuesto es necesaria la *investigación* permanente, específicamente sobre la agrobiodiversidad de las regiones, mediante levantamientos florísticos rurales detallados para determinar, además del inventario, posibles endemismos. A su vez, investigación sobre artrópodos, y microorganismos benéficos, avifauna, mamíferos, así como sus relaciones multitróficas que conllevan a los servicios ecosistémicos que presten estos agroecosistemas, además es fundamental avazar en investigaciones de la edafodiversidad de las regiones, también la investigación sobre sanidad vegetal en este marco de enfoque agroecológico.

Se considera esencial que todas las prácticas propuestas sean cuantificables, permitiendo evaluar la efectividad de las medidas; por ejemplo, mediante el enfoque basado en los rasgos funcionales de la agrobiodiversidad, entendido el rasgo funcional como la propiedad, categórica o continua de un organismo que determina su efecto en, o respuesta a, el ambiente, a menudo se usan grupos de especies con los mismos rasgos (Wood et al, 2015); así como indicadores de sostenibilidad de los agroecosistemas. Es imperativo que esta investigación sea participativa, aprovechando que algunos agricultores en las regiones ya conocen herramientas de los esquemas de manejo

integrado de plagas, como por ejemplo los bioinsumos reportados en las encuestas, así como las posibles soluciones que se recogieron en las encuestas del segundo momento. Esta transición se puede plantear en una escala temporal no menor a 5 años.

Las medidas y consideraciones propuestas previamente desde las dimensiones *sociocultural y política*, así como la *ecológica*, se deben desarrollar de manera permanente y transversal durante el proceso de transición agroecológico. A su vez, las etapas para llegar a la conversión de los sistemas de producción convencionales de tomate, hacia sistemas de producción agroecológicos, a escalas regional y local (finca) en los territorios estudiados, se describen a continuación:

Etapas 1. Caracterización del uso de plaguicidas: encuestas semi-estructuradas a escala regional que incluyan aspectos generales, técnicos y socioeconómicos del sistema de producción convencional. A su vez, seguimientos a fincas con participación de agricultores focalizados o seleccionados con el fin de corroborar y detallar aspectos abordados en las encuestas previas, y complementando el abordaje con información secundaria (*Remitirse a la metodología, resultados, discusión y conclusiones del Capítulo 1 del presente documento*).

Etapas 2. Evaluación ambiental y de riesgo: muestreos específicos rigurosos a escala regional y local (Finca) en compartimientos ambientales para verificar el destino ambiental de plaguicidas. Implementación de ERA que incluye análisis de riesgo ecológico, así como bioensayos sobre especies estratégicas en servicios y funciones ecosistémicas y análisis de riesgo en salud humana, complementado con monitoreos con fines de comparación con los LMR enfocados en seguridad alimentaria (*Remitirse a la metodología, resultados, discusión y conclusiones de los Capítulos 2 y 3 del presente documento*).

Etapas 3. Implementación de medidas de manejo sostenibles basadas en MIPE: para la minimización de riesgos en el ambiente y salud humana encontrados en los sistemas productivos de tomate, se debe iniciar la reducción del uso de plaguicidas y su reemplazo, teniendo en cuenta productos y medidas que ya están siendo utilizadas por algunos agricultores en las dos regiones. Se propone entonces, la implementación de esquemas basados en MIPE para el manejo de las principales plagas (*T. vaporariorum*,

B. tabaci, *T. absoluta*, *N. elegantalis*, *Liriomyza* spp.) y enfermedades (*P. infestans*, *B. cinerea*, *O. lycopersici*) en tomate dependiendo del sistema productivo y región.

De esta manera, esta etapa se debe implementar a escala local (Finca) e incluiría: i) selección de variedades de tomate que incluyan resistencia a plagas y enfermedades; ii) monitoreo de incidencia y severidad de cada especie para hacer manejo localizado según la necesidad, y no general con aplicaciones programadas; iii) uso de trampas para artrópodos (complemento del monitoreo y manejo); iv) uso de bioinsumos de uso agrícola disponibles en el mercado como parasitoides (*Encarsia formosa*, *Amitus fuscipenis*), depredadores (*Chrysoperla carnea*), hongos entomopatógenos (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Paecilomyces lilacinus*), hongos antagonistas (*Trichoderma harzianum*, *T. lignorum*), bacterias biocontroladoras (*Bacillus thuringiensis*, *B. subtilis*, *Burkholderia Cepacia*) feromonas (Para *T. absoluta*, *N. elegantalis*); v) uso de extractos vegetales disponibles (Ajo-ají, neem, cítricos, etc.); vi) uso de PSQ de última generación (p.ej.: Spinosinas: Spiromesifen, Spinosad) de categorías toxicológicas IV, alta degradación por fotólisis, hidrólisis y biodegradación, compatibles con los controladores biológicos; vii) rotación de los principios activos (síntesis química y extractos) para disminuir posibles resistencias inducidas en las poblaciones; viii) podas fitosanitarias para el manejo de enfermedades; ix) de manera específica para la producción de tomate bajo invernadero el manejo de la ventilación y uso de mallas fitosanitarias.

Esta estrategia debe ir acompañada de medidas de BPA encaminadas a la seguridad de los operarios, así como de las aplicaciones de los productos de diferente origen, estas deben ser al menos: i) uso obligatorio de implementos de protección al momento de las aplicaciones (traje, máscara o tapabocas de carbón activado, guantes de nitrilo, botas) con baño posterior a cada aplicación; ii) uso de equipos separados para la aplicación de los productos de diferente origen (al menos dos: uno para biológicos y otro para extractos y de síntesis química); iii) uso de boquillas recomendadas para cada tipo de producto según las indicaciones del fabricante; iv) realizar la calibración de los equipos y boquillas previo a cada aplicación; v) respetar las dosis, los periodos de carencia y reentrada a los cultivos según las recomendaciones de los fabricantes.

Etapas 4. Conversión y rediseño de sistemas agrícolas de tomate colombianos hacia sistemas de producción agroecológicos.

Como se ha planteado conceptualmente, la conversión del agroecosistema es un proceso de transición que implica: i) Mayor eficiencia del uso de insumos a través de MIPE ii) Sustitución de insumos utilizando bioinsumos y iii) el rediseño o diversificación del sistema a través de ensamblajes ecológicos que fomentan interacciones, para que el agroecosistema se autoregule (McRae et al., 1990), lo anterior, en el camino hacia la intensificación ecológica.

En la problemática evidenciada en los sistemas de producción de tomate, la sustitución de insumos no es suficiente, y una alternativa sostenible es el rediseño de estos sistemas agrícolas basado en nociones de agroecología. Gliessman (2015) argumenta que este rediseño debe garantizar los siguientes procesos: i) Aumento de la biodiversidad sobre y bajo el suelo. ii) Aumentar la producción de biomasa y el contenido de materia orgánica del suelo. iii) Uso eficiente de los nutrientes del suelo, el agua, la energía solar, las semillas, los organismos del suelo, polinizadores y enemigos naturales. iv) Planificación óptima de secuencias y combinaciones de planta-animal y v) Mejora de las complementariedades e interacciones funcionales entre el suelo, el cultivo y los componentes bióticos.

Por su parte, Nicholls et al. (2016), mencionan que la conversión hacia sistemas agroecológicos tiene como objeto fortalecer las débiles funciones ecológicas en el agroecosistema, conllevando a eliminar gradualmente los insumos externos, pasando a depender de procesos ecológicos e interacciones. Para esta conversión, plantean seis principios que toman diferentes formas tecnológicas dependiendo de la situación local, estos son: 1) mejorar el reciclaje de la biomasa, para optimizar la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes en el tiempo. 2) Fortalecer el "sistema inmune" de los sistemas agrícolas mediante la mejora de la biodiversidad funcional: enemigos naturales, antagonistas, etc., creando hábitats apropiados. 3) Proporcionar las condiciones del suelo más favorables para el crecimiento de las plantas, particularmente al manejar la materia orgánica y al mejorar la actividad biológica del suelo 4) Minimizar las pérdidas de energía, agua, nutrientes y recursos genéticos, al mejorar la conservación y la regeneración de los recursos del suelo, el agua y la agrobiodiversidad. 5) Diversificar especies y recursos genéticos en el agroecosistema en el tiempo y el

espacio a nivel de campo y paisaje. 6) Mejorar las interacciones y sinergias biológicas beneficiosas entre los componentes de la agrobiodiversidad, promoviendo así procesos y servicios ecológicos clave (Nicholls et al., 2016).

Es así como teniendo en cuenta estos principios agroecológicos, para la conversión de los sistemas agrícolas de tomate a campo abierto y bajo invernadero en las dos regiones de estudio se proponen las prácticas de: siembra de cultivos intercalados, rotación de cultivos, establecimiento de coberturas vivas, inclusión de control biológico, uso de extractos vegetales, siembra de angiospermas atrayentes, establecimiento de barreras vivas, elaboración de compostaje e integración de animales. En la tabla 4-4, se presenta como cada práctica, esta vinculada a uno o más principios agroecológicos planteados por Nicholls et al. (2016) y listados anteriormente.

Tabla 4-4. Prácticas de manejo propuestas para la conversión y rediseño de sistemas de producción de tomate convencionales en relación con los principios agroecológicos.

Práctica de manejo propuesta	Contribución al principio agroecológico*					
	1	2	3	4	5	6
<i>Cultivos intercalados</i>	+		+	+	+	
<i>Rotación de cultivos</i>	+		+	+	+	
<i>Coberturas vivas</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Control biológico</i>		+				
<i>Extractos vegetales</i>		+				
<i>Angiospermas atrayentes</i>		+			+	+
<i>Barreras vivas</i>		+	+		+	+
<i>Compostaje</i>	+					
<i>Integración de animales</i>	+		+	+	+	+

*Corresponden a los seis (6) principios agroecológicos para la conversión de sistemas agrícolas planteados por Nicholls et al. (2016).

Es así como, a continuación se detalla cada una de las prácticas propuestas que podrían implementarse a nivel de finca, teniendo en cuenta la situación y circunstancias encontradas a escala local:

Cultivos intercalados: incluir variedades de tomate (*S. lycopersicum*) con el acervo genético más cercano a Colombia, teniendo en cuenta el origen Suramericano de las variedades domesticadas recientemente determinado (Razifard et al., 2020), intercalado con especies tales como pepino (*Cucumis sativus*. Familia: Cucurbitaceae), frijol (*Ph.*

vulgaris. Familia: Fabaceae). En el arreglo espacial se debe evitar el uso de plantas de la misma familia, dado que comparten plagas y enfermedades.

Rotación de cultivos: rotar el cultivo de tomate con pimentón (*Capsicum annum*. Familia: Solanaceae), maíz (*Zea mays*. Familia: Poaceae) y variedades de leguminosas como habichuela (*Ph. vulgaris* var. *Emérite*. Familia: Fabaceae), arveja (*Psium sativum*. Familia: Solanaceae) y habas (*Vicia faba*. Familia: Fabaceae). Esta práctica poder ser fácilmente incorporada en Santander donde si hacen rotaciones.

Coberturas vivas: mantener e incluir plantas de la familia Fabaceae con hábito de crecimiento rastrero que actúan como cobertura del suelo, fijadoras de nitrógeno por su simbiosis con la bacteria *Rizhobium* sp. En los agroecosistemas bajo invernadero (Boyacá) se proponen las especies de trébol rojo (*T. pratense*) o trébol blanco (*T. repens*). Para los agroecosistemas de tomate a campo abierto (Santander) se propone la especie maní forrajero (*Arachis pintoï*).

Control biológico: con el fin de enriquecer los agroecosistemas con controladores biológicos, se propone incluir las especies previamente planteadas en las estrategias MIPE como: la avispa parasitoides *E. formosa* y *A. fuscipenis*, crisopas (*Ch. carnea*), los hongos entomopatógenos *B. bassiana*, *M. anisopliae* y *P. lilacinus*, los hongos antagonistas *T. harzianum* y *T. lignorum*, y las bacterias *Ba. thuringiensis* y *Ba. subtilis*.

Extractos vegetales: utilización de extractos de origen botánico de acción insecticida o reprente como ají (*Capsicum annum*), ajo (*Allium sativum*), neem (*Azadirachta indica*), barbasco (*Lonchocarpus utilis*), cítricos (*Citrus* spp) o ruda (*Ruta* sp.) así como de acción fungicida como *Chenopodium ambrosioides*. Estos como medidas de transición o choque, propendiendo en lo posible por su preparación en la finca.

Angiospermas atrayentes: se propone la inclusión de plantas herbáceas acompañantes de los cultivos (arvenses), con flores con oferta de néctar para atracción de polinizadores, que deben determinarse mediante estudios florísticos específicos en las dos regiones.

Barreras vivas: se propone la inclusión de plantas de crecimiento arborescente o setos aledañas a los cultivos (ruderales) así como en los límites geográficos de las fincas, que

actúen como barreras de vientos y de contaminación cruzada de polen foráneo a los agroecosistemas de tomate, estas deben determinarse mediante estudios florísticos específicos en las dos regiones. No obstante, específicamente para agroecosistemas en Boyacá se sugieren arboles de aliso (*Alnus glutinosa*, Familia: Betulaceae), dada su simbiosis con bacterias del género *Frankia alni*, fijadoras de nitrógeno.

Compostaje: dentro de los procesos de manejo de residuos de los sistemas productivos se debe incluir un esquema de compostaje con los excedentes de biomasa de los arreglos de cultivo, con estructuras (“pilas”) que incluyan microorganismos eficientes (EM) y lombriz de tierra (*Eisenia foetida*) para la generación de humus que pueda ser incorporado nuevamente al agroecosistema, específicamente en la superficie del suelo.

Integración de animales: es común encontrar en las fincas de las dos regiones especies de aves como gallinas (*Gallus domesticus*). Su libre circulación en los agroecosistemas, favorece procesos de regulación de poblaciones de artrópodos edáficos, así como la descomposición de la materia orgánica por efecto de sus heces.

Las medidas y prácticas planteadas previamente, hacen uso de la biodiversidad funcional propia de cada región y finca, modificando los arreglos florísticos actuales, con el fin de generar un ambiente propicio para la llegada de organismos benéficos y autorregulación de las interacciones específicas, hacia un control biológico por conservación mediante el manejo del hábitat. Para este propósito, se recomienda el uso de estrategias “push-pull” (En inglés), en las cuales se integran estímulos para la modificación del comportamiento de los enemigos naturales y las plagas, mediante las relaciones alelopáticas, volátiles y estímulos visuales en la relación planta-insecto (Cook et al., 2007). De esta manera, se lograría avanzar hacia el fortalecimiento de la resiliencia de estos agroecosistemas.

4.4 Discusión

En general la población encuestada estuvo constituida por adolescentes, adultos y adultos mayores, con más de 10 años de experiencia en el cultivo de tomate, con roles de propietarios, operarios y venedores, más de la mitad cuentan con educación básica primaria, y en muy baja proporción son técnicos o profesionales. En la región de Ricaurte Alto se notó mayor conocimiento acerca del manejo fitosanitario del cultivo y cuentan con

más tecnología, siendo en general un manejo más técnico respecto a la provincia Guantán. Se repiten los mismos problemas de plagas y enfermedades de importancia en las regiones causados por *T. vaporariorum*, *B. tabaci*, *N. elegantalis*, *T. absoluta*, *P. infestans*, *B. cinerea* y *Oidium* sp.

Es reiterativo el uso predominante de insectidas y fungicidas de síntesis química para el manejo fitosanitario, y en menor medida la implementación de otro tipo de manejo en las dos regiones, con aplicaciones semanales de tres a cinco i.a. diferentes por ciclo, sin respetar periodos de carencia y reentrada. Gil et al. (2017) reportan para la misma región en Boyacá 10,4 aplicaciones por ciclo con cerca de 2,4 plaguicidas por aplicación, en la presente encuesta se reportaron hasta el doble de aplicaciones por ciclo, denotando una intensiva presión de agroquímicos en esa región. Se presentan nuevamente irregularidades legales para el uso de diferentes i.a. a nivel nacional e internacional, incluso en los i.a. nuevos reportados, y aun se usan categorías I y IA, lo cual demuestra falta de conocimiento y que la problemática se ha mantenido en el tiempo.

No es común que las fincas de las regiones cuenten con certificaciones en las dos regiones, como por ejemplo las de Agricultura Orgánica. No se implementan prácticas como separar los equipos de aplicación, en general no es obligatorio el uso de equipos de protección, siendo más habitual su uso en Boyacá, y no lo hacen principalmente por comodidad o costumbre. Por otra parte, en los últimos años la capacitación sobre uso de plaguicidas continúa siendo realizada principalmente por las mismas casas comerciales, y son menos frecuentes las capacitaciones específicas sobre residuos de plaguicidas, también por casas comerciales o profesionales, en proporciones inferiores mencionan capacitaciones por parte de entidades gubernamentales, esto reitera que la extensión rural en Colombia debe ser más efectiva y tener más cobertura (FAO, 2016).

En la región de Ricaurte Alto mencionan haber recibido capacitación por parte de la UJTL, siendo positivo respecto al flujo de información de parte de los resultados de esta investigación en las redes rurales de las regiones de estudio, compartida mediante talleres participativos sobre uso de plaguicidas y sus residuos en el ambiente en las regiones de estudio, uno en diciembre de 2012 en Villa de Leyva, para productores de la Región de Ricaurte Alto y dos adicionales en junio de 2014 en San Gil y Socorro para productores de la provincia Guantán.

A nivel mundial, la capacitación para agricultores también es dada principalmente por vendedores y en menor medida por extensionistas, no respetan periodos de reentrada, no todos usan equipos de protección personal, a pesar de estar informados y leer las etiquetas (Oo et al., 2012; Adeola, 2012). En países en desarrollo, se ha demostrado el incremento del 2% en el uso de plaguicidas de un año a otro (Dey, 2010), además un desconocimiento profundo de sus efectos por parte de quienes los usan, y su toma de decisiones está influenciada por la creencia de la necesidad del uso (Polanco et al., 2014). Es evidente, que existe una tendencia de los agricultores a usar plaguicidas en forma excesiva, por motivaciones económicas (Fierro & Tellez, 1997), estando influenciados, además, por una amplia gama de estructuras, en las que, el uso de plaguicidas puede ser la única opción, el contexto social de los agricultores ejerce una influencia fundamental sobre su decisión de la protección de sus cultivos, requiriéndose diferentes estrategias de intervención con estas comunidades (Feola & Binder, 2010).

Esta situación se deriva en efectos adversos por el uso inadecuado de plaguicidas que implican la contaminación de cuerpos de agua y suelo, la resistencia inducida de plagas y patógenos, afectación de organismos benéficos, así como el efecto directo sobre la salud humana a través de las labores de cultivo y residualidad en el producto comercializado (Fenik et al., 2011). Los efectos en la salud humana por exposición vía contacto directo e ingesta, fueron incluidos en el capítulo anterior, sin embargo, el riesgo es más evidente si se tienen en cuenta los hábitos de los operarios y de consumo de tomate en la región, quienes mencionan enfermedades y dolencias que relacionan con los plaguicidas, se debe tener especial atención en poblaciones infantiles siendo más susceptibles (Claeys et al., 2011).

Los efectos directos como las intoxicaciones en Colombia por plaguicidas se relacionan más con inhibidores de las colinesterasas (Organofosforados y Carbamatos) (Idrovo, 2000), encontrando concentraciones de estos grupos de plaguicidas en la sangre, incluso de los consumidores (Hernández et al., 1986). Se han encontrado anomalías en niveles de acetilcolinesterasa en el 9.9% de los hombres y en el 7.0% de las mujeres, con prevalencia en grupos de edad de 18-25 años y de 0-5 años (Cárdenas et al., 2010). El Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA) registra los casos de intoxicación por plaguicidas, siendo un problema de salud pública (Páez et al., 2011).

Situación de riesgo que se acentúa teniendo en cuenta que en las regiones la afiliación a EPS es insuficiente y el de ARL nulo, reafirmando las condiciones laborales inadecuadas y de alto riesgo del trabajo rural en América Latina (Díaz et al., 2017; Gallo et al., 2018).

Por otro lado, dado el tipo de capacitación de los productores, la mayoría generalmente conocen sobre los plaguicidas y sus riesgos (Feola & Binder, 2010). Perciben el incremento de las plagas relacionado con la resistencia inducida, que deriva en la necesidad del uso de plaguicidas bajo dosis adecuadas (Oo et al., 2012). En las regiones de estudio, usan los plaguicidas porque perciben que son más efectivos, esto hace que tengan una percepción positiva sobre estos, más en la región de Ricaurte Alto que en la provincia Guanentá; esta percepción positiva derivada de la eficiencia de los plaguicidas es común por parte de los agricultores (Adeola, 2012). La aceptación por el control biológico tiende a ser menor, principalmente por su disponibilidad y precio. Además, si perciben el riesgo para la salud humana y la naturaleza, al igual que en trabajos similares (Feola & Binder, 2010; Oo et al., 2012; Polanco et al., 2014)

Los actores de las regiones, son conscientes del destino ambiental de los plaguicidas, sin embargo, en Santander tienden a considerar que el operario, el agua y el aire son los destinos más frecuentes, mientras en Boyacá son el aire, el fruto y el suelo, según los resultados de destino ambiental (Tabla 2-10, Cap. 2), la percepción en Boyacá es más cercana a la realidad. El riesgo es percibido en menor medida en las dos regiones que el destino ambiental, en Santander perciben el riesgo principalmente sobre el operario, consumidor y agua, mientras en Boyacá para el operario, los frutos y el aire, en general contemplándose una visión antropocentrista. Los riesgos sobre organismos benéficos y polinizadores no son percibidos, lograr integrar estos riesgos al imaginario de los actores de las regiones, hace que los cambios sean lentos.

Estudios rigurosos han demostrado una fuerte percepción de los efectos negativos de los plaguicidas en suelo, aire, agua y organismos benéficos, y la salud humana en general percibidos por más del 50% de las poblaciones rurales (Shetty et al., 2010). Sin embargo, en poblaciones rurales colombianas, se ha encontrado percepción positiva de los plaguicidas, a pesar de presentar en ocasiones bajo control fitosanitario, confían en esos agroinsumos y no perciben riesgo en la salud, por lo cual se incrementa su compra. Por

otra parte, los jóvenes rurales perciben menos el riesgo, haciendo más difícil reorientar la producción, dado que requiere enfocar a las nuevas generaciones (Polanco et al., 2014). Por último, acogiendo las diferentes sugerencias incluidas en la retroalimentación de los productores, la entrada de los plaguicidas al ambiente debe ser controlada, siguiendo la tendencia mundial hacia la agricultura con una carga menor de sustancias tóxicas (Fierro & Téllez 1997; De Ponti et al., 2012). En este sentido, como punto de partida un MIPE pueden ayudar a reducir el impacto ambiental ampliamente documentado en las regiones de estudio (Bojacá et al., 2014; Gil et al., 2017). Se puede decir que el escenario actual encontrado es de uso excesivo de plaguicidas con resurgencia de plagas y mantenimiento de la productividad, no se ha llegado aún a una situación crítica, y para evitar ese paso, se propone un proceso de reconversión con enfoque basado en MIPE balanceado, con entradas externas reducidas (Ekström y Ekbon, 2012), que han sido demostrados en Colombia en trabajos que han integrado medidas compatibles de control biológico, botánico y química en tomate (Garzón, 2018).

El uso de los principios agroecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas, que buscan el reemplazo de los insumos externos por procesos naturales como la fertilidad del suelo, la alelopatía y el control biológico, es particular a las condiciones de cada agroecosistema (Nicholls y Alieri, 2016) y estos demuestran que mediante la biodiversidad funcional es posible mantener los flujos de materia y energía hacia el balance las poblaciones, imitando los procesos ecológicos en búsqueda de la resiliencia ecosistémica en estos nuevos arreglos espaciales y temporales. Esto implica un cambio radical en los sistemas productivos de tomate dejando de ser monocultivos; se sabe que estos procesos pueden ser lentos (Lotter, 2003), pero logran obtenerse reducciones significativas de poblaciones de plagas y enfermedades, así como incremento en poblaciones de depredadores y parasitoides en agroecosistemas diversificados sin sacrificio de la productividad (Andow, 1991; Letourneau et al., 2011; Boundreau, 2013)

Este esquema de transición no propone llegar a ambientes conservados, sino pasar de ambientes utilizados a ambientes transformados, beneficiando las funciones, procesos y servicios ecosistémicos de los agroecosistemas, que son totalmente influenciados por los ambientes sociales, donde las fuerzas motrices de los actores son las que producen finalmente estos cambios. Desde el metabolismo rural se consideraría que para el cambio de esta situación actual, es necesario pasar de una unidad de apropiación, hacia

la mayoría de unidades de apropiación regionales, dado que es la apropiación el proceso metabólico fundamental para el inicio de la circulación, transformación, consumo y excreción (Toledo, 2008).

A futuro, se propone el cambio del modelo de producción, migrando hacia policultivos, entendiendo las sinergias e interacciones biológicas del agroecosistema, como enfoque alternativo del desarrollo agrícola que responda a las necesidades locales y de mayor escala (Suárez et al., 2017). Lo anterior enmarcado en las Metas del Milenio que manifiestan una transición hacia la agroecología como una forma de alimentar a la población actual de manera sostenible, al tiempo que permite que las generaciones futuras respalden sus medios de subsistencia (FAO, 2016). Un desafío importante es promover cambios institucionales, políticos, de métodos participativos y de capacitación, un mayor apoyo económico, e involucrar a todos los agentes del sistema agrícola, facilitando nuevos entornos institucionales dirigidos a la dinámica social rural (Altieri, 2002; FAO, 2016; Feola & Binder, 2010).

4.5 Conclusiones

El nivel educativo de los productores es similar en las dos regiones, así como el acceso a capacitaciones, impartidas principalmente por empresas del sector privado. Los hábitos de manejo de plaguicidas son compartidos, con uso reducido de implementos de protección personal, baja tecnología de aplicación, no se respetan los periodos de carencia y reentrada a los cultivos, o afiliaciones al Sistema Nacional de Salud, incrementándose los escenarios de exposición a plaguicidas, y los riesgos asociados.

El manejo fitosanitario de cultivos de tomate a campo abierto y bajo invernadero, de la provincia Guantán y la región de Ricaurte Alto, respectivamente, continúa basándose en el uso de PSQ, con un manejo más tecnificado y conocimiento del cultivo por parte de los productores en los sistemas bajo invernadero. Se mantienen las mismas plagas y enfermedades reportadas desde el inicio de la investigación en las dos regiones, con el uso de i.a. similares, pero con cambios en su patrón de uso, dando cabida a nuevos i.a. con características ecotoxicológicas similares a los anteriores.

Los diferentes actores encuestados perciben a los PSQ como efectivos y los aceptan, a pesar de ser conscientes de sus repercusiones sobre el ambiente y la salud humana. Tienen una percepción acertada sobre el destino ambiental, sin embargo, no perciben de la misma manera el riesgo, con una visión antropocentrista, no hay conciencia que hacen parte del agroecosistema de forma activa, y que estas relaciones conllevan a que el riesgo sea generalizado, incluso sobre especies benéficas que no tienen en consideración de manera prioritaria en su percepción.

Las soluciones propuestas desde las comunidades encuestadas giran en torno al cambio del modelo de producción hacia la reducción del uso de plaguicidas o uso de bioinsumos, que son percibidos como una alternativa viable pero insuficiente en su implementación, sumado a capacitación y cambio de costumbres, con intervención del gobierno, que como se evidenció no es la principal fuente de extensión en las regiones de estudio. Estas soluciones propuestas están en armonía con una transición hacia un MIPE con balance de estrategias que pudieran conllevar a un futuro de transición agroecológica.

Para lograr los cambios hacia la intensificación ecológica de los agroecosistemas, y lograr una alimentación más saludable, es fundamental la educación de los actores del sistema alimentario, desde los agricultores hasta los consumidores; para, de esta manera, intervenir parte de sus motivaciones de decisión, que son las que permiten una transformación de los hábitos de producción y consumo, esto conlleva a futuro a un cambio cultural.

Como lo plantean Nicholls et al. (2016), el reto de alinear los sistemas agrícolas con los principios ecológicos es inmenso, especialmente en el contexto actual de desarrollo agrícola con énfasis en la especialización, productividad a corto plazo y eficiencia económica. Esta es una premisa evidente en el panorama de producción de tomate convencional a campo abierto y bajo invernadero evaluado, no obstante, el proceso de transición propuesto es posible y necesario ante el escenario actual de uso excesivo de plaguicidas, para evitar una posible situación de crisis.

5 Conclusiones generales y recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

La población rural que interviene en los sistemas productivos de tomate convencionales estudiados, está compuesta por pequeños productores experimentados, quienes reciben una capacitación sesgada hacia una producción dependiente de agroinsumos, reflejado en el manejo fitosanitario basado principalmente en el uso de productos de síntesis química, con amplia gama de ingredientes activos en proporciones similares entre fungicidas e insecticidas, y categorías toxicológicas moderadas en su mayoría, sin embargo, se hace uso de productos con categoría extremadamente tóxica. Por otro lado, las condiciones agroecológicas de las regiones de estudio son propicias para el desarrollo del cultivo de tomate, con restricciones particulares propias de los aspectos físicos y de infraestructura.

Mediante los seguimientos, se encontró inconsistencia de la información sobre uso de plaguicidas reportada en las encuestas, situación que afecta la veracidad de la información primaria para análisis ambientales, además se evidenció la sobredosisificación en todos los PSQ utilizados. Por otra parte, es necesaria la revisión de la legislación ante la evidencia del uso de productos sin registro para tomate y contradicciones en los registros nacionales e internacionales. A su vez, la implementación de bioinsumos, extractos vegetales o manejo fitosanitario de base ecológica es incipiente en las regiones de estudio.

Se detectaron residuos de plaguicidas en los frutos de las dos regiones de estudio, superando los LMR. Esta exposición es una vía de ingreso de los plaguicidas a los consumidores y un limitante para la comercialización. También, se detectaron residuos de plaguicidas en hojas, como ruta de exposición para distintas especies de los

agroecosistemas y personas en contacto con el cultivo. Se detectaron residuos de plaguicidas en el suelo, en mayor concentración que en tejidos vegetales; estos compuestos ligados al suelo, se mueven mediante infiltración, percolación, lixiviación y escorrentía, pudiéndose encontrar en el agua según su afinidad físico-química.

Bajo la sensibilidad de las metodologías implementadas, no se detectaron plaguicidas en el agua y sedimentos de las principales corrientes de agua de las regiones, sin embargo, estos compuestos tienen potencial de contaminación de aguas subterráneas. En general, el agua de las zonas de estudio es de buena calidad, siendo blandas las de la provincia Guanentá y moderadamente duras a duras las de la región de Ricaurte Alto, y presentan contaminación microbiológica. Según el panorama de destino ambiental de plaguicidas, se puede inferir mayor presencia de estos compuestos a campo abierto que bajo invernadero, donde los factores climáticos influyen sobre el movimiento de estas moléculas, dado que no existe aislamiento del cultivo.

La detección de insecticidas y fungicidas fue proporcional en número de ingredientes activos, indicando la alta incidencia de plagas como *T. vaporariorum*, *B. tabaci*, *T. absoluta*, *N. elegantalis* y patógenos como *P. infestans*, *B. cinerea*, y *O. lycopersici*, que lleva al uso indiscriminado de plaguicidas. Esta situación, soportada en la evidencia del destino ambiental, y bajo las características propias de las regiones, centra la problemática en la escala de la finca, teniendo en cuenta que en la escala regional, no hubo detecciones. En este sentido, las intervenciones de cada finca sumarían a la solución de la problemática general.

Mediante la Evaluación de Riesgo Ambiental se determinó que los plaguicidas evaluados, representan un riesgo ambiental significativo para los organismos de los ecosistemas terrestres y acuáticos superficiales de las dos regiones de estudio, dadas sus características toxicológicas, además del manejo inadecuado. Este riesgo se traduce en la afectación de procesos ecológicos de los agroecosistemas, principalmente a campo abierto, dada la interacción de mayor cantidad de organismos con el cultivo, además de la deriva de estos compuestos xenobióticos que efectivamente se alojan en diferentes destinos ambientales.

Los insecticidas metomilo y tiociclam representan alto riesgo para los servicios ecosistémicos de polinización de cultivos o ciclaje de nutrientes de las dos regiones de estudio, comprobándose que afectan a las abejas melíferas y la formación simbiótica de rizobios en trébol rojo, en este sentido, se ven afectadas interacciones tróficas de diferentes niveles en los agroecosistemas. Además, se comprobó que existe riesgo acumulativo sobre la salud humana por la ingesta de tomate con presencia de los insecticidas carbofuran e indoxacarb, así como de los fungicidas hexaconazol y difenoconazol, sumado a la exposición directa por contacto con plaguicidas en los cultivos, que puede derivar en efectos en la salud y enfermedades crónicas.

En el análisis participativo final con los actores de las regiones de estudio, se evidenció que la composición poblacional y manejo fitosanitario de cultivos de tomate a campo abierto y bajo invernadero, se mantiene en el tiempo, con el uso de plaguicidas similares, dando cabida a nuevos ingredientes activos, pero con características ecotoxicológicas semejantes a las de los usados habitualmente. El esquema de capacitaciones, no ha cambiado y continúa siendo abordado por empresas del sector privado. Los hábitos de manejo de plaguicidas son deficientes, sin afiliaciones al Sistema Nacional de Salud, acentuándose así la exposición a plaguicidas y sus riesgos asociados.

Los productores son conscientes de las repercusiones de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud humana; su percepción es acertada sobre el destino ambiental, sin embargo, no perciben claramente el riesgo asociado, con una visión antropocentrista, sin percibir el riesgo sobre especies benéficas, posiblemente por falta de conocimiento. Las soluciones propuestas se basan en cambios graduales al modelo de producción con reducción del uso de plaguicidas, comenzando desde la educación para los diferentes actores del sistema alimentario, específicamente con los agricultores sobre el uso de bioinsumos, capacitación y sensibilización, con participación del gobierno, percibido como ausente en la extensión en las regiones de estudio. Estas soluciones propuestas están en armonía con una transición agroecológica.

Se aportó una línea base significativa para la ciencia agroecológica en el país que justifica la transición agroecológica de sistemas productivos agrícolas convencionales, además se propuso un proceso de conversión y rediseño de los sistemas agrícolas convencionales, hacia sistemas de producción agroecológicos basado en principios

agroecológicos, con un sustento riguroso y herramientas metodológicas objetivas. Escencialmente, mediante la presente evaluación bajo una perspectiva agroecológica, se determinaron los efectos de los plaguicidas sobre agroecosistemas locales de tomate y sobre la salud humana, con una visión holística que reconoce la complejidad como característica fundamental. Este enfoque permitió validar en el contexto local, que el uso inadecuado de plaguicidas afecta al sistema alimentario completo, generando así un aporte desde la mirada de la agroecología que contribuye a la sostenibilidad.

5.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta el panorama expuesto, es necesaria la educación y capacitación enfocada en los hábitos y cultura rural adaptada a los territorios, para que mediante su participación se pueda implementar y validar medidas de manejo fitosanitario adecuadas y/o alternativas, al uso de PSQ con alto potencial de contaminación, que deben ser paulatinas y enfocadas a un cambio profundo del modelo de producción, donde se logre un balance entre los esquemas de manejo. También, es necesaria la educación de los consumidores, quienes tienen la decisión de compra, para esto deben plantearse estrategias locales y nacionales, con el sector de educación superior como protagonista.

Es importante continuar avanzando en la validación de modelos específicos de los suelos colombianos, ampliando la investigación a lo largo de todo el perfil tanto en cultivos bajo invernadero como a libre exposición para evaluar el movimiento real de los plaguicidas presentes, dado que fue el compartimiento ambiental con mayores concentraciones. A su vez, se recomienda realizar investigaciones sobre bioindicadores principalmente acuáticos, con especies nativas o endémicas, teniendo en cuenta los resultados en especies terrestres. Así mismo, el uso de otras metodologías de muestreo de plaguicidas en aguas y el aire, para refinar los resultados teóricos de destino ambiental y riesgo.

Es fundamental el aporte desde entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, sociales, privadas, empresariales y gremiales relacionadas con el sector agrícola, para aplicar un marco legal y regulatorio acorde a los hallazgos presentados de manera integral en la presente investigación, que pueden ser replicados a otros sistemas de producción del orden nacional. De esta manera, se insta a entidades del sector salud, ambiental y laboral, para emprender acciones de mitigación los

impactos en la salud ecosistémica y en la salud de los consumidores revelados en el presente trabajo, que impactan todo el espectro social, económico, cultural y ambiental.

Los procesos y cambios hacia la transición a un sistema alimentario alternativo y la soberanía alimentaria, inician al lograr instaurar la seguridad alimentaria, la inocuidad en alimentos y el cumplimiento de normas internacionales que aplican a lo local, como camino de cambio cultural. Coexistiendo los sistemas de agricultura limpia y la conversión agroecológica, que hacen esfuerzos paralelos con un objetivo común de sostenibilidad de la agricultura.

Finalmente, se muestra una situación imposible de abordar de manera aislada, que compromete la sostenibilidad de una actividad imprescindible para la humanidad como es la agricultura, ante una sociedad cada vez más conciente, informada y exigente, con tendencia hacia una alimentación saludable basada en el consumo de vegetales, con inclusión social y protección de los recursos naturales; es inevitable que en un futuro cercano no sea más tolerado este riesgo latente y silencioso.

Bibliografía

Abou-Arab, A.A.K. 1999. Behavior of pesticides in tomatoes during commercial and home preparation. *Food Chemistry*. 65: 509-514 p.

Adeola, R.G. 2012. Perceptions of environmental effects of pesticides use in vegetable production by farmers in Ogbomoso, Nigeria. *Global Journal of Science Frontier Research Agriculture & Biology*. 12(4).1-8.

Agronet, 2019. Área cosechada, producción y rendimiento de tomate en Colombia 2006-2018. En: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>. Consulta Julio de 2019.

Ahumada, D. Zamudio, A. 2011. Análisis de residuos de plaguicidas en tomate mediante el uso de QuEChERS y cromatografía líquida ultrarrápida acoplada a espectrometría de masas. *Revista Colombiana de Química*. 40(2): 227-246.

Ahumada, D. Guerrero, J. 2010. Estudio del efecto matriz en el análisis de plaguicidas por cromatografía de gases. *Vitae*. 17 (1): 51-58.

Aktar, W. Sengupta, D. Chowdhury, A. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisc toxicol*. 2 (1): 1-12.

Altieri, M. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 74(1):19-31.

Altieri, M. 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, ecosystems & environment*, 93(1): 1-24.

Altieri, M., Nicholls, C. 2012. Agroecology scaling up for food sovereignty and resiliency. In *Sustainable agriculture reviews*. Springer Netherlands. *Agroecología*, 7(2): 65-83.

- Alza, W. Chaparro, S. García, J. 2016. Estimación del riesgo de contaminación de fuentes hídricas de pesticidas (Mancozeb, Carbofuran) en Ventaquemada, Boyacá Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja. Boyacá Colombia Revista Biodiversidad y servicios ecosistemicos. Acta agronómica 65 (4), 68-374.
- Andow, D. 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. Annual Review of Entomology 36: 561-586.
- Aparicio, C. Barbaro, S. De Gerónimo, E. Portocarrero, R. 2014. Presence of pesticides in surface water from four sub-basins in Argentina. Chemosphere 107, 423-431.
- Artz D.R., Nault, B. 2011. Performance of *Apis mellifera*, *Bombus impatiens*, and *Peponapis pruinosa* (Hymenoptera: Apidae) as pollinators of pumpkin. J. Econ. Entomol. 104(4):1153–1161.
- Ávila-Orozco, F.D., León-Gallón, L.M., Pinzón-Fandiño, M.I., Londoño-Orozco, A., Gutiérrez-Cifuentes, J.A. 2017. Residualidad de fitosanitarios en tomate y uchuva cultivados en Quindío (Colombia). Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria, Mosquera (Colombia), 18(3): 571-582.
- Barnat, S., Boisset, M., Casse, F., Catteau, M., Lecerf, J.-M., Veschambre, D., Periquet, A. 2010. Pesticide residues intake of French adults under increased consumption of fresh fruits and vegetables – A theoretical study. Journal of Environmental Science and Health, Part B. 45(2): 102-107.
- Beddington, J., Asaduzzaman, M., Fernandez, A., Clark, M., Guillou, M., Jahn, M., Scholes, R. 2011. Achieving food security in the face of climate change: Summary for policy makers from the Commission on Sustainable Agriculture and Climate Change. Denmark, CGIAR, CCAFS.
- Berlinger, M.J. Watterson, J.C., Lange, A.H., Fisher, B.B., Ashton, F.F. 1986. Chapters: 10: Pest, 11: Diseases, Weed Control. In The Tomato Crop, A scientific basis for improvement. Atherton, J.G, Rudich, J., Roberts, E.H. (Eds.), Chapman and Hall Ltd. pp 391-509.
- Bhandari, G., Zomer, P., Atreya, K., Mol, H.G.L., Yang, X., Geissen, V. 2019. Pesticide residues in Nepalese vegetables and potential health risks. Environmental Research. 172 (2019): 511–521.
- Blazquez, C. 1973. Residue determination of ethylenethiourea (2-imidazolidinethione) from tomato foliage, soil, and water. J.Agric. Food Chem. 21 (3): 330-332.
- 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., Wyckhuys, K.A., Schrevels, E., 2014. Life cycle assessment of Colombian greenhouse tomato production based on farmer-level survey data. J. Clean. Prod. 69: 26–33.
- Bonmatin, J. M., Moineau, I., Charvet, Colin, R.M.E., Fleche, C., Bengsch, E.R. 2005. Behaviour of Imidacloprid in Fields Toxicity for Honey Bees. In: Environmental Chemistry - Green chemistry and pollutants in ecosystems, Lichtfouse, E., Schwarzbauer, J. Robert, D. (Eds). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp. 483–94.
- Boudreau, M.A. 2013. Diseases in intercropping systems. Annu Rev Phytopathol 51: 499-519.
- Brandt, A., Gorenflo, R. S., Meixner, R. B. 2016. The neonicotinoids thiacloprid, imidacloprid, and clothianidin affect the immunocompetence of honey bees (*Apis mellifera* L.). Journal of Insect Physiology. 86: 40-47.
- Bunemann, E., Schwenke, G., Van Zwieten, L. 2006. Impact of agricultural inputs on soil organisms - a review. J. Soil Res. 44: 379- 406.
- Cancapa, 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.
- Carazo-Rojas, E., Perez-Rojas, G., Perez-Villanueva, M., Chinchilla-Soto, C., Chin-Pampillo, J.S., Aguilar-Mora, P., Alpizar-Marín, M., Masis-Mora, M., Rodríguez-Rodríguez, C.E., Vryzas, Z. 2018. Pesticide monitoring and ecotoxicological risk assessment in surface water bodies and sediments of a tropical agro-ecosystem. Environmental Pollution. 241(2018): 800-809.

- Cárdenas, O. Silva, E. Ortiz, J. 2010. Uso de plaguicidas inhibidores de la acetilcolinesterasa en once entidades territoriales de salud en Colombia, 2002-2005. *Biomédica*. 30(1): 95-106.
- 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.
- Castro, P., Ramos, J., Estévez, S., Andrea, R. 2004. Residuos de Plaguicidas Organofosforados en muestras de tomate. *Revista de Ingeniería*, 20: 14-22
- Cengiz, M.F., Certel, M., Karakas, B., Gocmen, H. 2007. Residue contents of captan and procymidone applied on tomatoes grown in greenhouses and their reduction by duration of a pre-harvest interval and post-harvest culinary applications. *Food Chemistry*. 100: 1611-1619.
- Claeys, W.L., Schmit, J-F., Bragard, C., Maghuin-Rogister, G., Pussemier, L., Schiffers, B. 2011. Exposure of several Belgian consumer groups to pesticide residues through fresh fruit and vegetable consumption. *Food Control*. 22: 508-516.
- Cohen, M. A. 2017. Riesgo Ambiental: La aportación de Ulrich Beck. *Acta Sociológica*. 73: 171-194.
- Cook, S.M., Zeyaur, R.K., Pickett, J.A. 2007. The Use of Push-Pull Strategies in Integrated Pest Management. *Annu. Rev. Entomol*. 52: 375-400.
- Cooper, J. Dobson, H. 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Protection*. 26: 1337-1348.
- Cortés, A. 2004. Suelos colombianos: Una mirada desde la academia. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 126 p.
- Cossettini, O. 2006. Guía de interpretación placas Petrifilm 3M. Buenos Aires. Argentina.
- Costa, E.M., Araujo, E.L., Maia, A. V. P., Silva, F. E. L., Bezerra, C. E. S., Silva, J. G. 2014. Toxicity of insecticides used in the Brazilian melon crop to the honey bee *Apis mellifera* under laboratory conditions. *Apidologie*. 45 (1):34-44.
- Darko, G., Akoto, O. 2008. Dietary intake of organophosphorus pesticide residues through vegetables from Kumasi, Ghana. *Food and Chemical Toxicology*. 46: 3703-3706.
- De Ponti, T., Rijk, B., van Ittersum, M.K., 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agricultural systems*. 108: 1-9.
- Dey, 2010. Use of pesticides in vegetable farms and its impact on health of farmers and environment. *Environmental science and technology*. 2019(2): 134-140.
- Díaz, S. M., Sánchez, F., Varona, M., Eljach, V., Muñoz G.M.N. 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.
- Dorais, M., Ehret, D.L., Papadopoulos, A.P. 2008. Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer. *Phytochem Rev*. 7: 231-250. Editorial Limusa. México.
- Durovic, R. Gajic, J. Dordevic, T. 2009. Effects of organic matter and clay content in soil on pesticide adsorption processes. *Pestic. Phytomed*. 24: 51- 57.
- Edwards, C. 1993. The impact of pesticides on the environment. Capítulo 2: 13-47. Pimentel, D. Lehman, H (eds.). 1993. *The Pesticide Question: Environment, Economics, and Ethics*. Springer. New York, Estados Unidos. 441 p.
- EFSA, 2013. Scientific opinion on the identification of pesticides to be included in cumulative assessment groups on the basis of their toxicological profile. *EFSA J*. 11, 3293.

- Ekström, G., Ekbohm, B. 2012. Pest Control in Agro-ecosystems: An Ecological Approach. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30:1-2, 74-94.
- El-Shahawi, M.S. 1997. Retention profiles of some commercial pesticides, pyrethroid and acaricide residues and their application to tomato and parsley plants. *Journal of Chromatography*. 760: 179-192.
- Encuesta Nacional de Situación Nutricional (ENSIN). 2015. Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), Ministerio de Salud y Protección Social, Instituto Nacional de Salud (INS). En: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/encuesta-nacional-situacion-nutricional>. Consulta Julio de 2019.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1998. Fate, Transport and transformation test guidelines. OPPTS 835.5154. Anaerobic biodegradation in the subsurface. Prevention, Pesticides and Toxic Substances. EPA. United States. 10 pp.
- EPA. 2011. 2006-2007 Pesticide Market Estimates: Sales and Usage. Washington, USA. 41 p.
- EPA. 2019. Integrated Risk Information System (IRIS). En: <https://www.epa.gov/iris>. Consulta Julio de 2019.
- EPA. 2019. Risk Assessment: Ecological Risk Assessment, Human Health Risk Assessment. En: <https://www.epa.gov/risk/ecological-risk-assessment>. Consulta Enero de 2019.
- 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.
- EU Pesticide database (CEE). 2019. Commission Amending Regulation, European Commission, Regulation 1107/2009 (91/414). En: https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/max_residue_levels/eu_rules_en. Consulta Julio de 2019.
- Farias, D.M., Guerrero, J.A., Lozano, A., Piedrahita, W. 2004. Estudio de residuos de permetrina en un cultivo de tomate. *Agronomía Colombiana*, 22(1): 74-80.
- Fenik, J., Tankiewicz, M., Biziuk, M. 2011. Properties and determination of pesticides in fruits and vegetables. *Trends in Analytical Chemistry*, 30 (6): 814-826.
- Fenoll, J., Hellín, P., Martínez, C.M., Miguel, M., Flores, P. 2007. Multiresidue method for analysis of pesticides in pepper and tomato by gas chromatography with nitrogen-phosphorus detection. *Food Chemistry*. 105: 711-719.
- Feola, G., Binder, C.R. 2010. Identifying and investigating pesticide application types to promote a more sustainable pesticide use. The case of smallholders in Boyaca, Colombia. *Crop Protection*. 29: 612-622.
- Fierro, H., Téllez, J. 1997. Motivaciones y uso de plaguicidas en el cultivo de la papa, Corpoica, Tibaitatá. pp : 1-48
- Fife, J. Nokes, S. 2002. Evaluation of the effect of rainfall intensity and duration on the persistence of chlorothalonil on processing tomato foliage. *Crop Protection*. 21: 733-740.
- Finizio, A., Villa, S. 2002. Environmental risk assessment for pesticides: A tool for decision making, *Environmental Impact Assessment Review*, 22(3): 235-248.
- Fisher D., Hayes A. 1982. Effects of some systemic imidazole and triazole fungicides on white clover and symbiotic nitrogen fixation by *Rhizobium trifolii*. *Ann. Appl. Biol.* 101: 19-24.
- Flores-Pacheco, J. A. Mairena, A., 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.

Food and Agriculture organization of the Nations – FAO. 2017. Food and agriculture data-FAOSTAT. Tomatoes. En: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Consulta Julio de 2019.

FAO. 1999. Recommended methods of sampling for the determination of pesticide residues for compliance with MRLS CAC/GL 33-1999. 18 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization (FAO/WHO). 2019. Codex Pesticides Residues in Food Online Database. Pesticide residues in food and feed. *Codex Alimentarius*, VO-0048-Tomato. EN: <http://www.codexalimentarius.net/pestres/data/commodities/details.html?id=320>. Consulta Julio de 2019.

FAO/WHO. 2011. Pesticide residues in food 2010, Joint FAO/WHO Meeting on Pesticides Residues, FAO plant production and protection paper 200. Rome. 55 p.

FAO, 2016. Asistencia técnica y extensión rural participativa en América Latina. Lima. 52 p.

Food and Drug Administration United States (FDA). 2018. Pesticide Analytical Manual (PAM) Sec 302.

Fuentes, L.S., Niño, N.E., Casilimas, H.A., Bojacá, C.R. 2014. Plagas y enfermedades del cultivo de tomate guía técnica de campo. Universidad Jorge Tadeo Lozano. 72 p.

Fytolab, 2015. Manual interno de procesos, basado en Standard Methods, 2005.

Gallego, A.G.H. 1973. Residuos de plaguicidas Organoclorados en productos agrícolas de consumo humano en Cali. Tesis de Ingeniería sanitaria. Universidad del Valle. 48 p.

Gambacorta, G., Faccia, M., Lambacchia, C., Di Luccia, A., La Notte, E. 2005. Pesticide residues in tomato grown in open field. *Food Control*. 16: 629-632.

Garrido, A., Martínez, J.L., López., Cortés S., Martínez, I. 2004. Monitoring multi-class pesticide residues in fresh fruits and vegetables by liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1048: 199-206.

Garzón, A., Manejo sostenible de mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) en tomate (*Solanum lycopersicum*) mediante estrategias basadas en agentes de control biológico. Tesis Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Jorge Tadeo Lozano. 24 p.

Gevao, B. Semple, K. Jones, K. 2000. Bound pesticide residues in soils: a review. *Environmental pollution*. 108: 3-14.

Gil, R., Bojacá, C.R., Schrevens, E. 2019. Understanding the heterogeneity of smallholder production systems in the Andean tropics – The case of Colombian tomato growers. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. 88(2019):1-9.

Gil, R., Bojacá, C.R., Schrevens, E., 2017. Uncertainty of the agricultural grey water footprint based on high resolution primary data. *Water Resour. Manag.* 31 (11), 3389–3400.

Gliessman, S. 2015. *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*, Third ed., 371. Nueva York: Taylor y Francis. 406 p.

Goss, D & Wauchope RD (1990) The SCR/ARS/CES Pesticide Properties Database. II using it with Soils data in a screening Procedure. In D.L. Weigmann Ed., *Pesticides in the next decade: the challenge ahead*, Virginia Resources Research Centre, Blacksburg, VA, USA pp471-493.

Guaiteiro, L.B. 2010. Propuesta metodológica para la evaluación de riesgo ambiental causado por el uso de plaguicidas en sistemas hortofrutícolas de la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. 180 p.

Guerrero, J. 2003. Estudio de residuos de plaguicidas en frutas y hortalizas en áreas específicas de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 21(3): 198-209.

- Gutiérrez, J.A. & Londoño, A. 2009. Determinación de plaguicidas Organoclorados y Organofosforados en tomates de cadena en las ciudades de Pereira y Armenia, Colombia. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas. 8(3): 165-171.
- Hatt, S., Artru, S., Brédart, D., Lassois, L., Francis, F., Haubruge, E. Stassart, P., Dufrene, M., Munty, A., Boeraeve, F. 2016. Towards sustainable food systems: the concept of agroecology and how it questions current research practices. A review. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 20(S1):215-224.
- Harari, R, Harari, H. 2006. Children's environment and health in Latin America: the Ecuatorian case, Annals of the New York Academy of Sciences, 1076(1): 660-677.
- Hernández, L., Guerrero, E., Cubillos, F., Salazar, F. 1986. Niveles sanguíneos de insecticidas Organoclorados en varios grupos de población colombiana. Revista Colombiana de Ciencias Químicas y farmacológicas. 45(1): 49-58.
- Hernández, F. Beltrán, J. 1995. Análisis de residuos de plaguicidas en aguas. Grupo de investigación de medio ambiente y recursos naturales. Departamento de Ciencias Experimentales. Universidad Jaime L. Castellón. pp: 321-355.
- Herridge D., Peoples, M., Boddey R. 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. Plant and Soil, 311: 1-18.
- Hock, W. 1994. Effect of pH on pesticide stability and efficacy. Perential Plants 2(2) 1-2.
- Idrovo, A. 2000. Vigilancia de las Intoxicaciones con Plaguicidas en Colombia. Rev. Salud Pública. 2 (1): 36-46.
- Imfeld, G. Vuilleumier, S. 2012. Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: A critical review. European Journal of soil biology. 49: 22-30.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 2019. Registros de venta de plaguicidas químicos de uso agrícola - y bioinsumos. Julio de 2019. En: <https://www.ica.gov.co/>. Consulta Julio de 2019.
- Iwata, Y. Spear, R. Knaak, J. Foster, R. 1977. Worker reentry into pesticide-treated crops, I, Procedure for the determination of dislodgable pesticide residues on foliage. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 18 (6): 649-655.
- Jaramillo, J. Rodríguez, V. Guzmán, M. Zapata, M. 2006. El cultivo de tomate bajo invernadero (*Lycopersicon esculentum*. mill). Boletín técnico 21. Corpoica. Antioquia, Colombia. 48 p.
- Jardim, A., Caldas, E., 2012. Brazilian monitoring programs for pesticide residues in food e Results from 2001 to 2010. Food Control, 25: 607-616.
- Jenkins, D.; Snoesyink, V.; Ferguson, J.; Leckie, J. 1983. Química del Agua: manual de laboratorio.
- Juraske, R., Antón, A., Castells, F., Huijbregts, M.A.J. 2007. Human intake fractions of pesticides via greenhouse tomato consumption: Comparing model estimates with measurements for Captan. Chemosphere. 67: 1102-1107.
- Juraske, R., Mosquera, C.S., Erazo, A., García, G., Berdugo, M.B., Díaz, J., Binder, C.R., Hellweg, S., Guerrero, J.A. 2011. Pesticide uptake in potatoes: model and field experiments. Environmental Science & Technology. 45 (2) : 651-657.
- Kah, M. 2007. Behavior of ionisable pesticides in soils. PhD Thesis. Environmental Department. University of York. 229 p.
- Katz. J.M., Winter, C.K. 2009. Comparison of pesticide exposure from consumption of domestic imported fruits and vegetables. Food and Chemical Toxicology. 47: 335-338.
- Kaushik, G., Satya, S. Naik, S.N. 2009. Food processing a tool to pesticide dissipation – A review. Food Research International. 42: 26-40.

Kimura, S. Sinha, N. 2008. Tomato (*Solanum lycopersicum*): A Model Fruit-Bearing Crop, Cold Spring Harb Protoc. EN: <http://cshprotocols.cshlp.org/content/2008/11/pdb.emo105.full.pdf+html>. Consulta Octubre 2013.

Kolankaya, D. Oğus, A. Ayas, Z. Akay, M. 1989, Manganese ethylenebisdithiocarbamate (Maneb) and ethylenethiourea (ETU) residues in different parts of tomato plant and soil, Food Chemistry, 34 (3):181-186.

Kong, Z., Dong, F., Xu, J., Liu, X., Zhang, Ch. Li, J., Li, Y., Chen, X., Shan, W., Zheng, Y. 2012. Determination of difeconazole residue in tomato during home canning by UPLC-MS/MS. Food Control. 23: 542-546.

Kontou, S., Tsipi, D., Tzia, C. (2004). Stability of the dithiocarbamate pesticide maneb in tomato homogenates during cold storage and thermal processing. Food Additives and Contaminants. 21(11): 1083–1089.

Lehmann, E., Turrero, N., Kolia, M., Konate, Y., de Alencastro, L.F., 2017. Dietary risk assessment of pesticides from vegetables and drinking water in gardening areas in Burkina Faso. Sci. Total Environ. 601(602)1208–1216.

Leiva, F.R., Fuentes, C.L., Gwaitero, B. 2012. Metodología para la evaluación del riesgo ambiental causado por el uso de plaguicidas en sistemas hortofrutícolas en el departamento de Cundinamarca. Avances de la Investigación Agronómica II, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, pp 99-110.

Letourneau, D., Armbrrecht, I., Salguero, B., Montoya, J., Jiménez E., Daza, M., Escobar, S., Galindo, V., Gutiérrez, C., Duque, S., López, J., Acosta, A., Herrera, J., Rivera, L., Saavedra, C., Torres, A., Reyes, A. 2011. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. Ecol Appl 21: 9-21.

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.

Li, L., Jiang, G., Liu, C., Liang, H., Sun, D., Li, W. 2012. Clothianidin dissipation in tomato and soil, and distribution in tomato peel and flesh. Food Control. 25: 265-269.

Lloret L., Martínez, R. E. 2005. Evolución y filogenia de *Rhizobium*. Rev. Latinoam. Microbiol. 47: 43-6.

Lobatón J., Cure J., Almanza M. 2012. Fenología y Oferta Floral de Trébol Rojo *Trifolium pratense* (Fabales: Fabaceae) en Praderas de Kikuyo *Penisetum clandestinum* (Poales: Poaceae), como Fuente Alimento para *Bombus atratus* (Hymenoptera, Apoidea) en Cajicá, Colombia. Revista de Ciencias Básicas. Universidad Militar Nueva Granada, 8(1), 18-27.

Londoño, R., Barreto, J.R. 1982. Muestreo y manejo de muestras de productos agrícolas para análisis de residuos de plaguicidas. Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá (Colombia). 30 p.

Lotter, D.W. 2003. Organic agriculture. J Sustainable Agric 21: 37-51.

Lyon, A., Bell, M., Gratton, C., Jackson, R. 2011. Farming without a recipe: Wisconsin graziers and new directions for agricultural science. Journal of Rural Studies. 27(4): 384-393.

Macias-Macias, O., Chuc, J., Ancona-Xiu, P., Cauich, O., Quezada-Euán, J. J. G. 2009. Contribution of native bees and Africanized honey bees (Hymenoptera: Apoidea) to Solanaceae crop pollination in tropical México. J. Appl. Entomol. 133(6):456–465.

MacLachlan, D.J., Hamilton, D. 2010. Estimation methods for maximum residue limits for pesticides. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 58: 208-218.

Mahugija, J. Kishimba, M. 2007. Organochlorine pesticides and metabolites in young leaves of *Mangifera indica* from sites near a point source in Coast region, Tanzania. Chemosphere. 68: 832-837.

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.

Martínez, R. Balaguera, J. Arias, H. Velásquez, M. Ruiz, F. Janeth, A. 2012. Plan de Desarrollo Municipal: Municipio Valle de San José, Colombia. 235 p.

- McRae RJ, Hill SB, Mehuys FR, Henning J. 1990. Farm scale agronomic and economic conversion from conventional to sustainable agriculture. *Advances in Agronomy* 43: 155-198.
- Medina, D. Abreu, de V. Buscema, A. Ettiene, G. & Prieto A. (1999). Persistence of Organophosphorus Pesticide Residues in Limón River Waters. *Environmental Contamination and Toxicology*. 63, 39-44.
- Mejías, J., Jerez, J. 2006. Guía para la toma de muestras de residuos de plaguicidas Agua, sedimento y suelo. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile.
- Miranda, D., Fischer, G., Barrientos, J.C., Carranza, C., Rodriguez, M., Lancho, O. 2009. Characterization of productive systems of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in producing zones of Colombia. *Acta horticulturae*, 821: 35-45.
- 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.
- Mosquera-Vivas, C.S., Martinez, M.J., García-Santos, G., Guerrero-Dallos, J.A. 2018. Adsorption-desorption and hysteresis phenomenon of tebuconazole in Colombian agricultural soils: Experimental assays and mathematical approaches. *Chemosphere*. 190 (2018) 393 – 404.
- Mosquera-Vivas, C.S., Walthe, E., García-Santos, G., Obregón-Neira, N., Celis-Ossa, R.E., González-Murillo, C.A., Juraske, R., Hellweg, S., Guerrero-Dallos, J.A. 2016. The effect of the soil properties on adsorption, single-point desorption, and degradation of chlorpyrifos in two agricultural soil profiles from Colombia. *Soil Science*. 181 (9/10): 446-456.
- Municipio De Villa de Leyva. 2004. Plan de Desarrollo Municipal 198 p.
- Murcia, A.M., Stashenko, E. 2008. Determinación de plaguicidas organofosforados en vegetales producidos en Colombia. *Agro Sur*. 36(2): 71-81.
- Naizaque, J. 2008. Esquema de ordenamiento territorial: Municipio de Combita. Corpoboyaca. Bogotá. p 43.
- Narváez, J., Palacio, J., Molina F. 2012. Persistencia de plaguicidas en el ambiente y su ecotoxicidad: Una revisión de los procesos de degradación natural. *Revista Gestión y Ambiente*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 15(3): 27-38.
- Nasreddine, L., Parent-Massin, D. 2002. Food contamination by metals and pesticides in the European Union. Should we worry?. *Toxicology Letters*. 127: 29-41 pp.
- Nicholls, C.I, Altieri M.A., Vazquez. L. 2016. Agroecology: Principles for the Conversion and Redesign of Farming Systems. *J Ecosys Ecograph*. S5: 010, 8p.
- Niewiadomska, A. 2003. Effect of carbendazim, imazetapir and thiram on nitrogenase activity, the number of microorganisms in soil and yield of red clover (*Trifolium pretense* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*. 13(4): 403-410.
- OECD. 2003. OECD Environmental Indicators. Development, measurement and use. Reference paper. Organisation for Economic Co- Operation and development. France.
- Oo, M.L, Yabe, M., Khai, H.V. 2012. Farmers' Perception, Knowledge and Pesticide Usage Practices: A Case Study of Tomato Production in Inlay Lake, Myanmar. *Journal- Faculty of Agriculture Kyushu University*. 57 (1), 327–331 (2012).
- Ortíz, M. Sánchez, E. Olvera, A. Folch, J. 2011. Pesticides in the Environment: Impacts and their Biodegradation as a Strategy for Residues Treatment. Cap 27. Pp 25. En: Stoytcheva, M (Ed). 2011. Pesticides- Formulations, Effects, Fate. InTech. Baja California, Mexico. 808 p.

- Osman, K.A., Al-Humaid, A.I., Al-Rehiyani, S.M., Al-Redhaiman, K.N. 2011. Estimated daily intake of pesticide residues exposure by vegetables grown in greenhouses in Al-Qassim región, Saudi Arabia. *Food Control*. 22: 947-953.
- Ownby, D.R., Trimble, T.A. Cole, M.J.L. 2004. Pesticide Residues in Water, Sediment and Fish at the Sparta, IL, USA National Guard Armony. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 73(5): 802-809.
- Páez, M.I., Varona, M., 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, Universida del Valle*. 15: 153-166.
- Pardo, S., Suárez, H., Pertuz, V. 2009. Interacción de los suelos sulfatados ácidos con el agua y sus efectos en la sobrevivencia del Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en cultivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. Medellín. Colombia. 22(4).
- Penido, P., Clarete, E., Rath, S., Reyes, F.G. 2009. Residue content of oxytetracycline applied on tomatoes grown in open field and greenhouse. *Food Control*. 20: 11-16.
- 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.
- Pesticide Action Network (PAN). 2019. Pesticide Database, North America. Version 12.0. En <http://www.pesticideinfo.org/>. Consulta Julio de 2019.
- Pinzón, G. 2007. Historia de la formación de Santander, sus provincias y municipios. (Sic) Editorial. 526 p.
- Polanco, Y., Salazar, J.C., Curbow, B. 2014. A quantitative analysis of Colombian campesinos' use of pesticides: perceived control and confidence in this use. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública* 2014; 32(3): 373-382.
- Pesticide Properties Database (PPDB). 2019. University of Hertfordshire. En: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/>. Consulta Julio de 2019.
- R Core Team, 2017. R: a language and environment for statistical computing. URL. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez, H. 2010. Geología. Diagnostico esquema de ordenamiento territorial de Páramo- Santander.
- Ramírez, J. Lacasaña, M. 2001. Plaguicidas: clasificación, uso, toxicología y medición de la exposición. *Arch Prev Riesgos Labor*. 4(2): 67-75.
- Ravelo-Pérez, L.M., Hernández-Borguez, J., Borgues-Miguel, T.M., Rodríguez-Delgado, M.A. 2008. Pesticide analysis in tomatoes by solid-phase microextraction and micellarelectrokinetic chromatography (Short communication). *Journal of Chromatography.A*(1185): 151-154.
- Rodríguez, D., Ahumada, D.A., Díaz, A.C., Guerrero, J.A. 2014. Evaluation of pesticide residues in honey from different geographic regions of Colombia. *Food Control*. 37 (2014): 33-40.
- Roldán, G. Ramírez, J. 2008. Fundamentos de limnología neotropical: Editorial Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia. 440 p.
- 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.
- Sabara, H. A., Gillespie, D. R., Elle, E., Winston, L. 2004. Influence of brood, vent screening, and time of year on honey bee (Hymenoptera: Apidae) pollination and fruit quality of greenhouse tomatoes. *J. Econ. Entomol*. 97(3): 727-734.

- Sabara, H.A., Winston, M.L. 2003 Managing Honey Bees (Hymenoptera : Apidae) for Greenhouse Tomato Pollination. *J. Econ. Entomol.* 96: 547–554.
- Sadlo, S. 1997. Adaption of the internal standard method to a pesticide residues study in/on plants. Short communication. *Journal of Chromatography.* 765: 115- 119.
- Shetty, P.K., Murugan, M., Hiremath, M.B., Sreeja. K.G. 2010. Farmers' education and perception on pesticide use and crop economies in Indian agriculture. *Journal of Experimental Sciences* 1(1): 3-8.
- Shankar, P., Shaikh N., Sharmishtha P. 2012. Effect of Different Herbicides on the Nodulation Property of Rhizobial Isolates. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2(4): 293-299.
- Shegunova, P. Klanova, J. Holoubek, I. 2007. Residues of organochlorinated pesticides in soils from the Czech Republic. *Environmental Pollution.* 146: 257-261.
- Silici, L. 2014. Agroecology-what it is and what it has to offer. Issue Paper 14629IIED. London: International Institute for Environment and Development.
- Solano, L. Malaver, T. Alarcon, R. Porras, M. Pineda, L. Duque, G. Gutiérrez, N. Vega, N. 2012. Plan de Desarrollo Municipal: Municipio de Paramo. Paramo, Colombia. 174 p.
- Standard Methods. 2005. Examination of Water and Wastewater; APHA, AWWA and WEF, 21st Edition.
- Stephenson, G. Solomon, K. 2013. Plaguicidas y ambiente. Versión en español editada por Carazo, E. 1 ed. 580 p.
- Suárez, J., Suárez, J., López, D., Morocho, H., Cachiguango, L., & Dellai, W. 2017. Agroecology and Health: Lessons from Indigenous Populations. *Current Environmental Health Reports*, 4(2), 244-251.
- Tittonell, P. 2014. Ecological intensification of agriculture sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8: 53-61.
- Toledo, V.M. 2008. Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica.* 7: 1-26
- Tuo, Y., Hala, N. 2011. Impact of terrestrial spraying of thiocyclam hydrogen oxalate on oil palm pollinating insects. *J. Agric. Biol. Sci.* 2: 208–213.
- Urrego, C.J., Cachique, J.A. 1986. Cuantificación de residuos de plaguicidas Organoclorados y Organofosforados en cultivo de tomate en zonas de Cundinamarca y Boyacá. Tesis Agrología. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá (Colombia). 107 p.
- Vaarst, M., Getz, A., Chappell, M.J., Brinkley, C., Nijbroek, R. Arraes, N., Andreasen, L., Gattinger, A., De Almeida, G., Bossio D., Halberg, N. 2018. Exploring the concept of agroecological food systems in a city-region context, *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6): 686-711.
- Vallejo, F. Estrada, E. 2004. Producción de hortalizas de clima cálido. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. 344 p.
- Van der Werf. 1996. Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 60: 81-96.
- Verschueren, K. 1983. Handbook of environmental data on organic chemicals. 2nd. edition. Van Nostrand Reinhol Company, pp: 22-137.
- Vincent J. M. 1970. A Manual for the Practical Study of Root-Nodule Bacteria. Handbook. International Biological Programme Blackwell Scientific. 164 p.
- Wang, C. Liu, Z. 2007. Foliar uptake of pesticides—Present status and future challenge. *Pesticide Biochemistry and Physiology.* 87: 1-8.

Ware, G., Estes, B., Buck, N. 1980. Dislodgeable insecticide residues on cotton foliage: Acephate, AC 222,705, EPN, fenvalerate, methomyl, methyl parathion, permethrin, and thiodicarb. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 25: 608-615.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4): 503-515.

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J., Ferrer, A., Peigné, J. 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture A review. *Agronomy for sustainable development*, 34(1): 1-20.

Williamson, S. M., Wright, G. A. 2013. Exposure to multiple cholinergic pesticides impairs olfactory learning and memory in honeybees. *J. Exp. Biol.* 216 (10): 1799–1807.

Willis, G., McDowell, L. 1987. Pesticide persistence on foliage. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 100: 23-73.

Wood, S. A., Karp, D.S., DeClerck, F., Kremen, C., Naeem, S., Palm Ch. 2015. Functional traits in agriculture: agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*: 1–9.

World Health Organization - WHO. 1997. Guidelines for predicting dietary intake of pesticide residues. Switzerland. 33 pp.

World Health Organization - WHO. 2012. Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (JMPR). En: <http://apps.who.int/pesticide-residues-jmpr-database/Home/Range/All>. Consulta Julio de 2019.

Yang, T., Doherty, J., Zhao, B., Kinchla, A., Clark, J., He, L. 2017. Effectiveness of Commercial and Homemade Washing Agents in Removing Pesticide Residues on and in Apples. *J. Agric. Food Chem.* 9 p.

Zamar, A.B., Uddin, S., Moniruzzaman, B., Karim, M, Hua, S. 2012. Organophosphorus and carbamate pesticide residues detected in water samples collected from paddy and vegetable fields of the savar and dhamrai upazilas in bangladesh. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 9:3318-3329.

Zhang, W., Jiang, F., Ou, J. 2011. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 1 (2): 125-144.

Zhang, W., Ricketts, T., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S. 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological economics*, 64(2): 253-260.

Publicaciones autoría y coautoría:

Arias, L.A., Bojacá, C.R., Ahumada, D.A., Schrevens, E. 2014. Monitoring of pesticide residues in tomato marketed in Bogota. *Food Control*. 35: 213 - 217.

Ahumada, D.A., **Arias, L.A.**, Bojacá, C.R. 2013. Multiresidue determination and uncertainty analysis of pesticides in soil by ultrafast liquid chromatography coupled to mass spectrometry. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 24(7): 1188-1197.

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: 400- 403.

Bojacá, C.R., Gil, R., Casilimas, H., **Arias, L.A.**, Schrevens, E. 2012. Modelling the environmental impact of pesticides sprayed on greenhouse tomatoes: a regional case study in Colombia. *Acta Horticulturae (ISHS)* 957:61-68.

Tesis y trabajos de grado:

Serrato, N.A. 2018. Evaluación de Riesgo Ambiental de plaguicidas en agroecosistemas de tomate bajo invernadero y libre exposición de colombia. Director: **Arias L.A.** Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Jorge Tadeo Lozano. 28 p.

Saéznz, M.Y., Rosso, M. 2017. Efecto de cuatro plaguicidas sobre la nodulación de trébol rojo (*Trifolium pratense*) de Santa Sofía (Boyacá). Director: **Arias L.A.** Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Jorge Tadeo Lozano. 30 p.

Rodríguez, F.A. 2017. Efecto de plaguicidas sobre la polinización de tomate bajo invernadero por *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). Director: **Arias L.A.** Codirectora: Garzón, A. Biología Ambiental, Universidad Jorge Tadeo Lozano. 38 p.

Aux, S.M. 2016. Evaluación de residuos de plaguicidas y condiciones fisicoquímicas en aguas de ríos aledaños a sistemas agrícolas de la región del Ricaurte Alto, Boyacá, Colombia. Director: **Arias L.A.** Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Jorge Tadeo Lozano. 45 p.

Garzón, A. 2014. Determinación de residuos de plaguicidas en hojas, frutos y suelo de sistemas productivos de tomate bajo invernadero y libre exposición en Colombia. Director: **Arias L.A.** Codirector: Bojacá, C.R. Biología Ambiental, Universidad Jorge Tadeo Lozano. 80 p.

Ayarza, A. 2014. Evaluación de residuos de plaguicidas en tejidos cuticulares y subcuticulares de frutos de tomate cultivados bajo invernadero y libre exposición en Colombia. Director: **Arias L.A.** Codirector: Bojacá, C.R. Biología Ambiental, Universidad Jorge Tadeo Lozano. 65 p.

Ponencias en eventos nacionales e internacionales:

Rodríguez, F.A., Garzón, C.A., **Arias, L.A.** Efecto de plaguicidas sobre la polinización de tomate bajo invernadero por *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). En: Congreso Sociedad Colombiana de Entomología, Memorias & Resúmenes. 44 Congreso SOCOLEN. Bogotá, D.C., 5, 6 y 7 de julio de 2017. ISBN: 2389-7694. p 517.

Arias, L.A., Garzón, A., Ayarza, A., Ahumada, D.A., Mojica, A., Bojacá, C.R. Comparison among pesticide residues in soil from greenhouses and open field tomato farming systems in Colombia. 13th IUPAC International Congress of Pesticide Chemistry. Crop, Environment, and Public Health Protection: Technologies for a Changing World. August 10 – 14, 2014. San Francisco, California, USA. p 128.

Garzón, A., **Arias, L.A.**, Ayarza, A., Ahumada, D.A., Mojica, A. Analysis of pesticide residues in tomato foliar tissues from greenhouses and open field production systems in Colombia. 13th IUPAC. August 10 – 14, 2014. San Francisco, California, USA. p 251.

Ayarza, A., **Arias, L.A.**, Garzón, A., Ahumada, D.A., Mojica, A. Determination of pesticide residues in cuticular and sub-cuticular tissues in tomato grown in greenhouses and open field farming systems in Colombia. 13th IUPAC. August 10 – 14, 2014. San Francisco, California, USA. p 146.

Arias, L.A., Bojacá, C.R., Ahumada, D.A., Casilimas, H.A., Schrevens, E. Monitoring of pesticide residues in tomatoes produced under open field and greenhouse systems and marketed in Colombia. Book of abstracts: 4th Latin American Pesticide Residue Workshop, Food and Environment – LAPRW 2013, Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia. May. pp 72. ISBN: 978-958-99607-3-8.

Garzón, A., **Arias, L.A.**, Ahumada, D.A. Analysis of pesticide residues in side-shoots tomato after pinch-off procedure from greenhouses of Boyaca (Colombia). LAPRW 2013, Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia. May. pp 181.

Ayarza, A., **Arias, L.A.**, Ahumada, D.A. Evaluation of pesticide residues in pulp and skin of tomatoes produced under greenhouse in Boyaca (Colombia). LAPRW 2013, Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia. May. pp 182.

Brito, A., **Arias, L.A.**, Ahumada, D.A. Determination of pesticide residues in soil from greenhouse tomato farming systems in Boyaca (Colombia). LAPRW 2013, Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia. May. 163.

Otro producto relacionado con el desarrollo del proceso doctoral:

Arias L.A. 2019. Programa Profesional en **AGROECOLOGÍA**, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Resolución 008924 Ministerio de Educación Nacional (MEN) del 27 de agosto de 2019. Proponente, Líder del Proceso de Creación y Director del Programa. En: <https://www.utadeo.edu.co/es/facultad/ciencias-naturales-e-ingenieria/programa/bogota/agroecologia>