UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**Departamento de Economía Agraria, Estadística y Gestión de
Empresas**

**Estrategias agrícolas de mitigación
y adaptación al cambio climático:
Comparación en sistemas de producción
en la Región Andina y en España**

Tesis Doctoral

Jhenny Marlene Cayambe Terán

Ingeniera Agrónoma
Máster en Economía Agraria, Alimentaria
y de los Recursos Naturales

Madrid 2017

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**Departamento de Economía Agraria, Estadística y Gestión de
Empresas**

**Estrategias agrícolas de mitigación
y adaptación al cambio climático:
Comparación en sistemas de producción
en la Región Andina y en España**

Tesis Doctoral

Jhenny Marlene Cayambe Terán

Directores

Ana Iglesias Picazo
Dr. Ingeniero Agrónomo

Víctor Barrera
Dr. Ingeniero Agrónomo

Madrid 2017

CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid,
el día de de 201...

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:.....

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 201... en
la E.T.S.I./Facultad

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A Dios, a quien se lo debo todo.
A Él sea la Gloria.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser mi guía en este largo camino que ha durado cinco años de mi vida. Gracias Dios por extenderme tu mano cuando levantarme sola, era muy difícil. Gracias Señor por tus provisiones, por tu fidelidad, por tu amor, porque sé que nada de esto sería posible si no fuese por ti.

Durante estos años que ha durado mi tesis, he recibido el apoyo y los ánimos de muchas personas, a quienes hago el siguiente agradecimiento:

A mis padres, por el apoyo constante, por su amor. Gracias mami por su paciencia, por su trabajo abnegado y por ser una madre ejemplar. Gracias papi, por sus consejos y por apoyar mis decisiones. Gracias ñaña por esperarme con ansias cada año, preparando mi recibimiento en Ecuador y contagiarme tu alegría. Yamilet gracias por darme felicidad con tus ocurrencias diarias. Gracias Luis por tus consejos, por ser esa mitad que me faltaba. Gracias tío Miguel por tu cariño. A toda mi familia, gracias por los ánimos que me daban a la distancia.

Extiendo un agradecimiento especial la Secretaría de Educación Superior Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por las becas del Programa Convocatoria Abierta financiadas durante el Gobierno del ex presidente, el Econ. Rafael Correa; puesto que gracias a su excelente gestión, muchos ecuatorianos nos capacitamos en el exterior.

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a mis dos directores de tesis, Ana Iglesias y Víctor Barrera; sin ustedes, esta tesis no hubiera sido posible. Muchas gracias Ana, por tu ayuda, por darme la oportunidad de participar en proyectos de investigación, por guiar muy bien esta tesis, por los ánimos que me has dado y por siempre motivarme a hacer mejor todo lo que me proponía. Muchas gracias Víctor por confiar en mí, por abrirme las puertas de INIAP, por su apoyo profesional y por su amistad.

También quiero agradecer al personal del INIAP de Ecuador: Tania, Luis, Fernando, Rosita, gracias por el apoyo brindado en la fase de campo y estancias que realicé en INIAP. Gracias a Patrik Riga de Neiker y a la Cooperativa de Productores UDAPA, por toda su ayuda en la elaboración de la fase investigativa, en España. Gracias al CIP de Perú, Magaly y Carlitos por su ayuda en las encuestas.

Gracias a todos los que conformaron y conforman el CEIGRAM: Esperanza, Katherina, Begoña, Noura, Omar, Cristhian, Ana Félix, Teresa, Axel, Marina, Iñigo, Chenli, Ivanka, Renato, Vanessa, Maritza, Vicky, Edna, Marilyn y todos los demás que pasaron por el centro.

Gracias al Departamento de Economía y Ciencias Sociales Agrarias y a todos los profesores del Máster de Economía Agraria. Gracias a las coordinadoras del Programa de Doctorado TAPAS por su ayuda, especialmente a Carmen Dieguez.

Gracias a todas las personas con las que compartí momentos especiales e inolvidables en España. Gracias Marta, Fabián y Emily por ser mi segunda familia, pronto nos volveremos a ver en Ecuador. Gracias Sofy por tus consejos, por tu tiempo, por escucharme y por ayudarme en uno de los momentos más difíciles de mi vida. Gracias Amanda por tu cariño, por tu comida deliciosa y por dejarme conocer a tus niños bellos. A Narciso por sus cuidados y consejos. Gracias Mishel por tu ayuda durante mis primeros días en España. Gracias Danny por los últimos paseos que nos dimos y en donde conocimos rincones de España muy bonitos. Todos ustedes permanecerán en mi mente y en mi corazón porque se ganaron un lugar especial.

Finalmente, y no por ser lo menos importante sino porque ahora son las personas con quien comparto casi 12 horas de mis días, quiero agradecer a las siguientes personas: gracias a mis ‘amiguís’ de Ecuador, Sandy y Belen por los ánimos que me daban desde el lindo Quito de mi vida, por las carcajadas, por las farras, por los paseos. Gracias Inge José, Paty, Anne, Pablo, Carmis, Ivan, por cada salida de reencuentro, por la hermosa amistad que hemos cultivado y seguimos cultivando. Gracias Carmita por tu ayuda en estos temas ‘show’ de cada día. Mil gracias Ivan por los consejos que me das ahora, por tu ayuda como pana, por ser ese amigo en quien confiar. Gracias ‘guambritos’ por ser los asistentes que nunca había tenido, son los mejores y estoy muy agradecida con ustedes.

GRACIAS a todas las personas que vivieron conmigo la realización de esta tesis doctoral.

Resumen

Hoy en día, adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos es uno de los desafíos más importantes del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La acción por el cambio climático está incluida en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que han sido ratificados en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible aprobada por las Naciones Unidas y que ha entrado en vigor desde el 1 de enero del 2016. Desde el punto de vista de implementación de soluciones, las acciones sobre el cambio climático requieren la participación de múltiples interesados, incluidos los encargados de formular políticas, los agentes de extensión, las ONG, los investigadores, las comunidades y los agricultores.

Esta Tesis aporta un análisis de las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en distintos sistemas agrarios, integrando los estudios científicos en un marco participativo para co-definir las acciones de adaptación y mitigación. La relevancia del estudio tiene tres componentes. Primero, en España el estudio contribuye al diseño de un modelo que sirve para estimar el potencial de mitigación de cultivos. Segundo, en Ecuador para los proyectos desarrollados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), el estudio ayuda a la toma de decisiones considerando el aspecto medioambiental. Tercero, en la Región Andina, el estudio se convierte en una contribución al proyecto GEF/MAE/PNUD, una iniciativa del Ministerio del Ambiente del Ecuador que cuenta con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo como agencia implementadora del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés).

En España, los productores de patata han sido involucrados directamente en el diseño del modelo que permite la estimación de emisiones en los sistemas de cultivo. En Ecuador, esta investigación se analizan acciones sectoriales orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y se identifica iniciativas de adaptación al cambio climático adecuadas a las circunstancias nacionales. De esta manera, esta Tesis muestra un proceso de planificación participativa en donde el cambio climático es un tema fundamental en diversos sectores sociales, ambientales y económicos.

El objetivo principal de esta investigación está enfocado en evaluar las potenciales opciones agrícolas y políticas para la mitigación y adaptación al cambio climático en el

cultivo de patata. A nivel local, el análisis se lleva a cabo en dos estudios de caso en España y Perú. A nivel regional, se ha dirigido la Tesis a tres provincias de la Región Andina del Ecuador en el cultivo mixto patata-pasto.

Esta Tesis se compone de seis Capítulos. El primer Capítulo contiene una introducción general, que establece el contexto de la investigación, descripción del problema, los objetivos y las cuestiones que se abordarán en este trabajo. El Capítulo 2 resume el estado del arte de los principales conceptos utilizados como cambio climático, el efecto del cambio climático en el sector agrícola, y la evaluación de prácticas costo-efectivas de mitigación y adaptación. El Capítulo 3 resume el marco metodológico de la Tesis, que luego se detalla en cada uno de los capítulos de resultados (4 y 5). Los Capítulos 4 y 5 contienen las principales contribuciones empíricas y originales de la Tesis en dos estudios, los cuales a su vez interactúan y retroalimentan. El Capítulo 6 presenta las principales conclusiones obtenidas en esta Tesis.

La Tesis está estructurada en dos estudios consecutivos e interrelacionados, que analizan las estrategias al cambio climático desde dos perspectivas. El Estudio I, cubre el objetivo de estimar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) del cultivo de patata en dos países con tecnologías de producción diferentes, España y Perú. En el caso de España, se analizaron las posibles prácticas agrícolas que generarían una reducción de emisiones en el sistema a través de un análisis de sensibilidad. Este análisis permitió seleccionar los parámetros de entrada claves en el modelo y poder determinar los aspectos que mayor influencia tienen en las emisiones. El análisis del coste económico de dichas medidas de mitigación también formó parte de este capítulo. Por último, en esta sección se comparan las estrategias de mitigación en función del potencial de reducción de gases y del ahorro en términos económicos.

En el Estudio II, el análisis promueve el conocimiento de las diferentes políticas de mitigación del cambio climático que difieren en la Región Andina, proporcionando una mayor comprensión de las opciones con las que cuentan los productores, la comprensión del efecto ambiental de las medidas, y el coste para los agricultores en diferentes áreas. Prácticas de manejo actuales han evolucionado relativamente bien para adaptarse a las características regionales, guiados por el potencial agroclimático, recursos hídricos y mercados. Por el contrario, la agricultura climáticamente inteligente necesita información más allá de los sistemas tradicionales, y un grupo de flexibles

opciones pueden ser guiadas en el corto plazo por pequeños cambios en el sistema actual.

Los datos de agricultores fueron obtenidos de: (1) encuesta para productores de patata en España y Perú, y (2) encuesta de hogares productores de patata en la Región Andina. La definición de las posibles medidas de mitigación adaptadas a la realidad de los sistemas agropecuarios fue realizado a través de discusiones con grupo de expertos que incluyen técnicos de todos los sectores. Las encuestas y las discusiones entre expertos representaron el enfoque participativo de la metodología.

La recopilación de datos para esta Tesis se realizó en dos períodos. El primer período fue de septiembre de 2014 a enero de 2015, el segundo período fue de diciembre de 2015 a marzo de 2016, y el tercer período fue desde noviembre de 2016 a enero de 2017. Se utilizó una amplia gama de enfoques para recolectar los datos. Estos enfoques incluyen datos de agricultores, discusiones con grupo de expertos y bases de datos públicas.

La Tesis también integra bases de datos elaboradas por instituciones públicas, principalmente Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente (MAPAMA), Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET), Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Instituto Geográfico Militar (IGM), entre otras.

Los resultados muestran que más del 40 por ciento de las emisiones de la agricultura puede ser reducido por cambios relativamente pequeños. Por lo tanto, existe un potencial considerable para mejorar la gestión agrícola en apoyo a la mitigación. Las alternativas, en el futuro, se ven afectadas por los determinantes locales, las cuales requieren indirectamente apoyo nacional para las políticas de mitigación. Finalmente, un mayor número de evaluaciones de prácticas agrícolas parecen ser particularmente apropiadas. Según nuestros resultados, las medidas de eficiencia de recursos pueden ser promulgadas (teóricamente dentro de las explotaciones agrícolas) para ayudar a conciliar los objetivos contrapuestos de mejoras en el rendimiento y en la reducción de costes. El análisis responde a la necesidad de demostrar las posibilidades de intensificación sostenible, permitiendo a Región Andina satisfacer las ambiciones de crecimiento económico del sector.

La falta de conocimiento es una barrera fundamental en el desarrollo de políticas de mitigación de emisiones agrícolas. Por lo tanto, es esencial promover tecnologías que utilicen insumos de manera más eficiente, promover mercados que a su vez apoyen la producción de alimentos de manera más respetuosa con el medio ambiente y que intenten mantener el bienestar actual de los agricultores junto con otras actividades económicas diversificadas.

Summary

Today, urgent action to combat climate change and its effects is one of the most important challenges of the United Nations Development Program. Action for climate change is included in the 17 Sustainable Development Objectives (ODS) that have been ratified in the Agenda 2030 for Sustainable Development approved by the United Nations and that has come into force since January 1, 2016. Since From the point of view of implementing solutions, actions on climate change require the participation of multiple stakeholders, including policy makers, extension agents, NGOs, researchers, communities and farmers.

This thesis provides an analysis of mitigation strategies and adaptation to climate change in different agricultural systems, integrating scientific studies in a participatory framework to co-define adaptation and mitigation actions. The relevance of the study has three components. First, in Spain the study contributes to the design of a model that is used to estimate the potential of crop mitigation. Second, in Ecuador for the projects developed by the National Institute of Agricultural Research (INIAP), the study helps decision making considering the environmental aspect. Third, in the Andean Region, the study becomes a contribution to the GEF / MAE / UNDP project, an initiative of the Ministry of the Environment of Ecuador, which has the support of the United Nations Development Program as the implementing agency of the Fund for The Global Environment Facility (GEF for its acronym in English).

In Spain, potato producers have been directly involved in the design of the model that allows the estimation of emissions in cropping systems. In Ecuador, this research analyzes sectoral actions aimed at reducing greenhouse gas emissions and identifies climate change adaptation initiatives appropriate to national circumstances. In this way, this thesis shows a participatory planning process where climate change is a fundamental issue in diverse social, environmental and economic sectors.

The main objective of this research is to evaluate the potential agricultural and political options for climate change mitigation and adaptation in potato cultivation. At the local level, the analysis is carried out in two case studies in Spain and Peru. At the regional level, the Thesis has been directed to three provinces of the Andean Region of Ecuador in mixed potato-pasture cultivation.

This thesis is composed of six chapters. The first chapter contains a general introduction, which establishes the context of the research, description of the problem, objectives and issues to be addressed in this paper. Chapter 2 summarizes the state of the art of the main concepts used as climate change, the effect of climate change on the agricultural sector, and the evaluation of cost-effective mitigation and adaptation practices. Chapter 3 summarizes the methodological framework of the thesis, which is then detailed in each of the results chapters (4 and 5). Chapters 4 and 5 contain the main empirical and original contributions of the Thesis in two studies, which in turn interact and feed. Chapter 6 presents the main conclusions obtained in this thesis.

The thesis is structured in two consecutive and interrelated studies, which analyze strategies for climate change from two perspectives. Study I covers the objective of estimating greenhouse gas (GHG) emissions from potato cultivation in two countries with different production technologies, Spain and Peru. In the case of Spain, the possible agricultural practices that would generate a reduction of emissions in the system were analyzed through a sensitivity analysis. This analysis allowed to select the key input parameters in the model and to be able to determine the aspects that have greater influence in the emissions. The analysis of the economic cost of such mitigation measures was also part of this chapter. Lastly, this section compares mitigation strategies in terms of the potential for gas reduction and savings in economic terms.

In Study II, the analysis promotes knowledge of different climate change mitigation policies in the Andean Region, providing a better understanding of the options available to producers, understanding the environmental impact of measures, and The cost to farmers in different areas. In our analysis, the environmental effect of the different measures is not uniform in the case studies, even though they are all in the Andean Region. This empirically reflects that there are small differences in climate and agricultural practices that generate large differences in costs and emissions of greenhouse gases. Current management practices have evolved relatively well to adapt to regional characteristics, guided by agroclimatic potential, water resources and markets. On the contrary, climate-smart agriculture needs information beyond traditional systems, and a group of flexible options can be guided in the short term by small changes in the current system.

Farmers data were obtained from: (1) survey for potato producers in Spain and Peru, and (2) survey of potato-producing households in the Andean Region. The definition of possible mitigation measures adapted to the reality of agricultural systems was carried out through discussions with a group of experts that included technicians from all sectors. Surveys and discussions between experts represented the participatory approach to methodology.

The data collection for this thesis was carried out in two periods. The first period was from September 2014 to January 2015, the second period was from December 2015 to March 2016, and the third period was from November 2016 to January 2017. A wide range of approaches were used to collect the data. These approaches include farmer data, expert group discussions, and public databases.

The Thesis also integrates databases developed by public institutions, mainly the Ministry of Agriculture and Fisheries, Food and Environment (MAPAMA), the Spanish State Meteorological Agency (AEMET), the Ministry of Agriculture, Livestock, Aquaculture and Fisheries (MAGAP) National Meteorology and Hydrology (INAMHI), Instituto Geográfico Militar (IGM), among others.

The results show that over 40 percent of agriculture's emissions can be reduced by relatively small changes. Therefore, there is considerable potential to improve agricultural management in support of mitigation. Alternatives in the future are affected by local determinants, which indirectly require national support for mitigation policies. Finally, a greater number of evaluations of agricultural practices appear to be particularly appropriate. According to our results, resource efficiency measures can be enacted (theoretically within farms) to help reconcile the conflicting objectives of performance improvements and cost reduction. The analysis responds to the need to demonstrate the possibilities of sustainable intensification, allowing the Andean Region to meet the economic growth ambitions of the sector.

Lack of knowledge is a fundamental barrier in the development of policies to mitigate agricultural emissions. Therefore, it is essential to promote technologies that use inputs more efficiently, to promote markets that in turn support food production in a more environmentally friendly way and that seek to maintain the current well-being of farmers along with other economic activities diversified.

Contenido

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Summary	vii
Contenido	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tablas.....	xvi
Lista de Abreviaciones	xvii
1. Contexto de la investigación y objetivos.....	20
1.1 Contexto de la investigación	20
1.2 Descripción del problema.....	23
1.3 Objetivos	25
1.4 Estructura de la Tesis	26
1.5 Difusión de resultados y publicaciones	28
2. Estado del Arte	30
2.1 La producción de patata	30
2.1.1 La patata a través de la historia	30
2.1.2 Importancia económica mundial del cultivo de patata	31
2.1.3 La producción de patata en España	33
2.1.4 La producción de patata en la Región Andina	36
2.1.5 El sistema mixto patata-pasto.....	37
2.2 El Cambio Climático.....	38
2.2.1 Escenarios de cambio climático	39
2.2.2 Cambio climático en Europa	42
2.2.3 Proyecciones climáticas en Europa	42
2.2.4 Cambio climático en Centroamérica y Sudamérica	43
2.2.5 Proyecciones climáticas en Centroamérica y Sudamérica	44
2.3 Efecto del cambio climático en la agricultura y seguridad alimentaria.....	45
2.4 Estrategias frente al cambio climático.....	49
2.4.1 Adaptación al cambio climático en el sector agrícola	50
2.4.2 Mitigación del cambio climático en el sector agrícola	51
2.5 Barreras de comportamiento para implementar acciones de cambio climático	53
3. Metodología del estudio	58
3.1 Área de estudio.....	58
3.1.1 Localización geográfica y clima del área de estudio.....	60

3.1.2	Contexto socioeconómico de los sistemas de producción.....	62
3.1.3	Políticas de cambio climático ejecutadas en el ámbito del cultivo de patata	63
3.1.4	Fuentes de datos	64
3.2	Marco metodológico	65
3.2.1	Esquema metodológico	65
3.2.2	Diseño y datos de muestreo.....	67
3.2.3	Métodos analíticos.....	68
4.	Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata	73
4.1	Introducción	73
4.2	Materiales y métodos	76
4.2.1	Ámbito geográfico.....	76
4.2.2	Recolección de datos	77
4.2.3	Determinación de las emisiones de GEI.....	79
4.2.4	Análisis de sensibilidad del programa Cool Farm Tool	81
4.2.5	Curvas de Coste Marginal de Mitigación.....	83
4.2.6	Propuesta de medidas para reducir emisiones de GEI.....	84
4.3	Resultados y Discusión	85
4.3.1	Emisiones de CO ₂ e	85
4.3.2	Análisis de sensibilidad del programa Cool Farm Tool – Potato	89
4.3.3	Evaluación de la reducción potencial de fertilizante nitrogenado mediante el análisis MACC.....	90
4.3.4	Evaluación de la reducción potencial de la dosis de riego mediante el análisis MACC	91
4.3.5	Propuesta de medidas de mitigación	93
5.	Coste de la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de la Región Andina.....	95
5.1	Introducción	95
5.2	Métodos y datos	99
5.2.1	Métodos.....	99
5.2.2	Definición del escenario base: Sistemas de cultivo del estudio de caso y datos	100
5.2.3	Selección de las posibles medidas de mitigación	101
5.2.4	Definición del potencial de mitigación de las medidas seleccionadas	102
5.2.5	Coste de implementación de medidas alternativas. Cambios en el margen neto de los agricultores	103
5.2.6	Curvas de Coste Marginal de Mitigación para guiar las decisiones políticas ...	104

5.3	Resultados y discusión	105
5.3.1	Definición de la línea base en el sistema patata-pasto	105
5.3.2	Medidas seleccionadas con alto potencial de mitigación	106
5.3.3	Potencial de mitigación de las medidas seleccionadas	107
5.3.4	Coste de aplicación de medidas alternativas. Cambios en el margen neto de los agricultores	109
5.3.5	Curvas de Coste Marginal de Mitigación. Coste-efectividad de las medidas de mitigación para orientar las decisiones de política.....	111
6.	Discusión general.....	114
7.	Conclusiones	118
7.1	Conclusiones metodológicas	118
7.2	Conclusiones de los resultados.....	118
7.3	Limitaciones y futuras investigaciones	120
	Referencias.....	122
	Anexos	138
	Anexo 1. Encuesta para productores de patata en España y Perú. 2013	138
	Anexo 2. Encuesta aplicada a productores de la Región Andina	142
	Anexo 3. Modelado del margen neto con un modelo de optimización	144
	Anexo 4. Tasa de mitigación potencial y coste-efectividad de cada práctica	147

Lista de Figuras

Figura 2.1. Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI (GtCO ₂ eq/año) por grupos de gases 1970-2010: CO ₂ procedente de combustibles fósiles y procesos industriales, CO ₂ procedente del sector forestal y otros usos del suelo, metano, óxido nitroso, gases fluorados (IPCC 2014).	39
Figura 2.2. Cambios proyectados al período 2081-2100 a nivel mundial en (a) temperatura media anual de la superficie, (b) precipitación media anual (%) y (c) nivel promedio del mar. Comparación con el período 1986-2005 (IPCC 2014).....	41
Figura 2.3. Cambios proyectados en la temperatura promedio anual (panel izquierdo) y el promedio de los porcentajes de precipitación media anual (panel derecho) para 2046-2065 y 2081-2100 en RCP2.6 y RCP8.5, en relación con 1986-2005 (Magrin et al. 2014)	45
Figura 2.4. Impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos (IPCC 2014).	47
Figura 3.1. Mapa global del área de estudio.....	60
Figura 3.2. Mapa ampliado de cada Caso de Estudio. A: España. B: Ecuador. C: Perú	61
Figura 3.3. Resumen del contenido de los dos Estudios que integran la Tesis	66
Figura 4.1. Análisis de sensibilidad del programa CFT-patata para las emisiones de CO ₂ por: a) Aplicación de nitrógeno. b) Uso de energía eléctrica en riego. c) Combustible utilizado en actividades agrícolas.	89
Figura 4.2. Análisis MACC para el uso de fertilizante nitrogenado. Medida 1: reducción del aporte de N en un 10%, medida 2: del 20%, medida 3 del 34%.	91
Figura 4.3. Análisis MACC para consumo de energía en riego. Medida 1: reducción de riego en 10%, medida 2: en 20%, medida 3: en 34%	92
Figura 5.1. Marco metodológico para definir el coste-efectividad de las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero	99
Figura 5.2. Emisiones de gases de efecto invernadero en los lugares representativos de los sistemas agrícolas mixtos en la región Andina; panel de la izquierda en unidades y panel de la derecha en porcentaje	108
Figura 5.3. Curvas de Coste Marginal de Mitigación para el sistema de patata-pasto en la Región Andina.	111
Figura 5.4. Reducción acumulada del sistema patata-pasto en la Región Andina.....	113

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Lista de publicaciones	28
Tabla 2.1 Producción, área cosechada y rendimiento de patata a nivel mundial. 2014. (FAOSTAT 2017)	33
Tabla 2.2. Serie histórica de superficie, producción, rendimiento y precio de la patata en España. Período 2000-2014	34
Tabla 3.1. Criterios que describen los Casos de Estudio y fuentes de datos	58
Tabla 4.1. Caracterización de sistemas de producción de patata en España y Perú	79
N: número de réplicas, X: media, D.E.: desviación estándar.	79
Tabla 4.2. Emisiones de CO2 en los sistemas de producción de patata en España y Perú. Año 2013. Para cada país se presenta la media y la desviación estándar (D.E.).....	86
Tabla 5.1. Zonas seleccionadas en la región andina y ubicaciones representativas incluidas en el estudio. Fuentes de datos: INAMHI 2015; INEC 2016	101
Tabla 5.2. Caracterización de los sistemas de cultivo en los sitios seleccionados basados en datos de 40 fincas representativas en cada provincia para definir la línea de base	106
Tabla 5.3. Medidas agrícolas seleccionadas por los expertos para el sistema patata-pasto	107
Tabla 5.4. Costes e ingresos de las prácticas seleccionadas a nivel de explotación.....	109
Tabla 5.5. Cambios en el margen neto de los productores en la Región Andina	110
Tabla 5.6. Potencial de mitigación de los sistemas mixtos en la Región Andina de Ecuador asumiendo 100% de aplicabilidad.....	113
Tabla A2.1 Encuesta aplicada a productores en Carchi, Chimborazo, Cañar. Ecuador. 2014..	142
Tabla A3.2 Coeficientes del modelo y variables, valores y fuentes de datos	144
Tabla A3.3 Restricciones del modelo para el sistema mixto patata-pasto	145
Tabla A4.1 Tasa de mitigación potencial y coste-efectividad de cada práctica	147

Lista de Abreviaciones

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología de España

ASABE: American Society of Agricultural and Biological Engineers

CEIGRAM: Centro de Investigación para la Gestión de Riesgos Agrícolas y Ambientales

CFT: Cool Farm Tool

CIAT: Centro Internacional de Agricultura Tropical

CIP: Centro Internacional de la Patata

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

ECLAC: Economic Commission for Latin America and the Caribbean

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEF: Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GLADA: Global Land Degradation Assessment and Improvement

GNH: Felicidad Nacional Bruta

IFA: International Fertilizer Industry Association

IFAD: Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola

IGM: Instituto Geográfico Militar

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

iSQAPER: Interactive Soil Quality Assessment

IUSS: International Union of Soil Sciences

MACC: Curvas de Coste Marginal de Mitigación

MAE: Ministerio del Ambiente del Ecuador

MAGAP: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca

MAPAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente

NAMA: Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación

NRCS : Natural Resources Conservation Service

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

PRAA: Proyecto Regional Andino de Adaptación al Cambio Climático

RCPs: Vías de Concentración Representativas

SENAMHI: Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología

SENESCYT: Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

SmartSOIL: Sustainable farm Management Aimed at Reducing Threats to SOILs under climate change)nteractive Soil Quality Assessment

TAPAS: Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible

UPM: Universidad Politécnica de Madrid

USDA: United States Department of Agriculture

WFP: World Food Programme

WRB: World Reference Base

1. Contexto de la investigación y objetivos

1.1 Contexto de la investigación

Hoy en día, adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos es uno de los desafíos más importantes del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, reconociendo que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático es el principal foro intergubernamental internacional para negociar la respuesta mundial al cambio climático. La acción por el cambio climático está incluida en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que han sido ratificados en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible aprobada por las Naciones Unidas y que ha entrado en vigor desde el 1 de enero del 2016.

Esta Tesis aporta un análisis de las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en distintos sistemas agrarios. La relevancia del estudio tiene tres componentes. Primero, en España el estudio contribuye al diseño de un modelo que sirve para estimar el potencial de mitigación de cultivos. Segundo, en Ecuador para los proyectos desarrollados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), el estudio ayuda a la toma de decisiones considerando el aspecto medioambiental. Tercero, en la Región Andina, el estudio se convierte en una contribución al proyecto GEF/MAE/PNUD, una iniciativa del Ministerio del Ambiente del Ecuador que cuenta con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo como agencia implementadora del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés).

En España, la tesis fue desarrollada en colaboración con Neiker-Tecnalia, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario, y con la Cooperativa de Productores de Patata de Álava “UDAPA”. Neiker-Tecnalia es un instituto público sin fines de lucro que se encarga de mejorar la productividad y cuyo fin es la competitividad de los sistemas de producción agraria contribuyendo al desarrollo económico y social a través del fomento de la Innovación Tecnológica. La cooperativa UDAPA participó de manera conjunta con Neiker-Tecnalia proveyendo información de los productores de patata para el diseño del modelo que permite la estimación de emisiones en los sistemas de cultivo.

En Ecuador, el estudio se ha realizado con una estrecha colaboración del INIAP. El INIAP participa como institución pública de investigación que genera conocimiento técnico-científico y provee tecnologías e información en el sector agricultura. Esta investigación se vincula con cinco objetivos nacionales: 1) Apoyar la elaboración del Plan Nacional de Cambio Climático 2) Elaborar un sistema de Inventarios de Gases de efecto invernadero en el sector Agricultura, 3) Desarrollar sistemas de Monitoreo, Reporte y Verificación en el sector Agricultura, 4) Diseñar e implementar de Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMAs), que constituyen acciones sectoriales orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y 5) Identificar iniciativas de adaptación al cambio climático adecuadas a las circunstancias nacionales. De esta manera, esta Tesis muestra un proceso de planificación participativa en donde el cambio climático es un tema fundamental en diversos sectores sociales, ambientales y económicos en el territorio nacional.

La investigación se realizó de 2013 a 2017 en el Centro de Investigación para la Gestión de Riesgos Agrícolas y Ambientales (CEIGRAM) que pertenece a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). La Tesis se desarrolló en el marco del Doctorado Internacional de Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible (TAPAS) y fue coordinado por la Dra. Ana Iglesias. Recibí financiamiento del gobierno de Ecuador para obtener mi título de máster y doctorado, a través de una beca del Programa Convocatoria Abierta 2011 de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (ex SENESCYT), desde septiembre de 2012 a septiembre de 2017.

El trabajo de campo fue realizado de octubre a noviembre del 2013 en Álava (España) y consistió en la ejecución de las encuestas a los productores de patata de la cooperativa UDAPA. En Ecuador, la fase experimental se realizó a través de una estancia de 12 meses en el INIAP, dividida en tres etapas pre-doctorales: primer período (septiembre 2014 - enero 2015), segundo período (diciembre 2015 - marzo 2016), tercer período (noviembre 2016 - enero 2017). Esto, se llevó a cabo en colaboración con el investigador principal Dr. Víctor Barrera del INIAP, quien es co-director de esta Tesis. El trabajo de campo en España y Ecuador contó con la participación de diversos actores (expertos, formuladores de políticas, asesores agrícolas y agricultores) e incluyó entrevistas, cuestionarios y talleres. Durante mi estancia y participación en el proyecto de investigación en Ecuador, tuve la oportunidad de aprender a evaluar el impacto

económico de las políticas agrícolas enfocadas al cambio climático y reunirme con otros colegas que trabajan en temas de cambio climático.

En esta investigación, el equipo de la UPM desarrolló diferentes enfoques sociales y económicos para evaluar la adaptación y mitigación de la agricultura frente al cambio climático junto con las opciones de políticas en las zonas de estudio de España y la Región Andina, específicamente en el sistema mixto (patata-pasto). También la UPM apoyó esta Tesis proporcionando la base del conocimiento en el análisis de los impactos del cambio climático de la producción de patata en España y en la Región Andina a través del planteamiento de estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero desde una perspectiva “bottom-up” y el análisis coste-efectividad de dichas medidas.

Finalmente tuve la oportunidad de participar en reuniones del proyecto iSQAPER (Interactive Soil Quality Assessment) y del Proyecto SmartSOIL (Sustainable farm Management Aimed at Reducing Threats to SOILs under climate change) ambos proyectos de investigación pertenecen a la Comisión Europea.

SmartSOIL es un proyecto del Séptimo Programa Marco de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Demostración de la Unión Europea (Número de proyecto: 289694; 2011-2015, <http://smartsoil.eu/>). SmartSOIL tiene como objetivo analizar y proponer alternativas de mitigación y adaptación que optimicen la productividad de los cultivos y a su vez promuevan un restablecimiento sostenible de las propiedades de los suelos. SmartSOIL evalúa la rentabilidad de políticas y el manejo de los sistemas agrícolas bajo escenarios actuales y futuros en las regiones europeas. SmartSOIL desarrolla diferentes enfoques sociales y económicos para evaluar la mitigación adecuada y la agricultura de adaptación, así como las opciones de política en zonas del Mediterráneo.

El proyecto iSQAPER (Interactive Soil Quality Assessment) forma parte del Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea para la investigación y la innovación entre la Academia China de Ciencias Agrícolas y la Secretaría de Estado de Suiza para la Educación, Investigación e Innovación (Número de proyecto: 63570, contrato: 15.0170-1; 2015-2020, <http://www.isqaper-project.eu>). El proyecto iSQAPER tiene como objetivo evaluar de manera interactiva la calidad del suelo en Europa y China para la productividad agrícola y la resiliencia ambiental, proporcionando a los tomadores de decisiones herramientas científicas, fáciles de aplicar y rentables para manejar la calidad

y la funcionalidad del suelo. El proyecto iSQAPER genera información sobre prácticas alternativas de uso de la tierra, fácilmente disponible, que apoya a los agricultores en la mejora de su manejo de la tierra. Además compromete a las principales partes interesadas en las regiones de estudio de casos en el desarrollo de los resultados científicos, las directrices, las recomendaciones y los instrumentos de política.

Las juntas científicas de estos proyectos a las que asistí, me permitieron recopilar diferentes y enriquecedoras ideas que aportaron a las conclusiones de mi Tesis.

1.2 Descripción del problema

La evidencia científica indica que el clima de la tierra está cambiando rápidamente, debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Stern 2007, IPCC 2014). En la actualidad, el cambio climático es una de las cuestiones ambientales más difíciles, ya que representa una amenaza potencial para diferentes sectores de la economía a nivel mundial (Ahlawat y Kaur 2015, Stern 2007). La agricultura como actividad abierta depende principalmente de factores climáticos y el cambio en las condiciones climáticas afecta la producción, calidad y cantidad de la producción agrícola. (Iglesias et al. 2011, Ahlawat y Kaur 2015), convirtiéndose en una de las actividades humanas más afectadas por el cambio climático (Lobell et al. 2008).

El incremento de la concentración de gases de efecto invernadero ha generado aumento de la temperatura media y una alteración de la cantidad y distribución de las precipitaciones a nivel mundial (IPCC 2014). Los impactos del cambio climático difieren considerablemente entre regiones (Magrin et al. 2014, IPCC 2014).

En Europa, la temperatura media ha seguido aumentando, siendo las tasas de calentamiento regionales y estacionales más altas en las altas latitudes del norte de Europa. Los modelos climáticos muestran un acuerdo significativo para todos los escenarios de emisiones en cuanto al calentamiento en toda Europa. Se proyecta un calentamiento más fuerte en Europa meridional en verano y en Europa septentrional en invierno. El impacto del cambio climático en esta región se relaciona a un aumento medio de la temperatura global hasta 2°C (Magrin et al. 2014).

En América Latina, la variabilidad en las últimas décadas ha estado afectando a grandes sectores de la población, especialmente aquellos más vulnerables y expuestos a los riesgos climáticos. En la Región Andina se prevé que habrá reducción de las precipitaciones e incremento de la temperatura del aire (Magrin et al. 2014). Existe una creciente evidencia de que los fenómenos extremos, como sequías e inundaciones, han sido las incidencias comunes (IPCC 2014). Esto afectará la disponibilidad de agua para la producción de cultivos, particularmente a los pequeños agricultores en los países en desarrollo que dependen en gran medida de la agricultura de secano como medio de vida (IPCC 2007b, Altieri y Nicholls 2017, Iglesias et al. 2011, Iglesias y Garrote 2015). Cambios significativos en las condiciones climáticas no solo desafiarán la producción de alimentos, sino que también desafiarán la seguridad alimentaria de cada región debido a la disminución de la productividad de los cultivos, el aumento de plagas agrícolas, enfermedades y malas hierbas, así como la disminución de la calidad de los alimentos (Magrin et al. 2014, IPCC 2014, Ahlawat y Kaur 2015)

Limitar los daños generados por el cambio climático se ha convertido en un reto para la comunidad mundial. En este sentido, la mitigación del cambio climático y la adaptación son cruciales (McCarthy et al. 2011). La mitigación se refiere a las opciones y estrategias para reducir las emisiones de GEI y aumentar las reservas de carbono en el suelo (Denton et al. 2014, Peters et al. 2013). La adaptación se refiere a acciones que ayudan a la agricultura y al medio ambiente a adaptarse a las consecuencias del cambio climático (Klein et al. 2007). La adaptación puede manejar los impactos, pero no puede por sí solo resolver el problema del cambio climático (Adger et al. 2003). En los países en desarrollo, la adaptación del sector agrícola al cambio climático es importante para asegurar medios de vida de las comunidades pobres (Magrin et al. 2014). Las acciones de política de adaptación no deben resultar en aumentos de las emisiones de GEI, por lo que es importante considerar su potencial de mitigación (Klein et al. 2007).

Las acciones sobre el cambio climático requieren la participación de múltiples interesados, incluidos los encargados de formular políticas, los agentes de extensión, las ONG, los investigadores, las comunidades y los agricultores (Anderson et al. 2010, Harvey et al. 2014). Una mejor comprensión de cómo los agricultores perciben el cambio climático, es necesaria para formular políticas y diseñar programas dirigidos a

promover la mitigación y adaptación exitosas en el sector agrícola. Una combinación de factores influye en la percepción de los agricultores sobre la variabilidad del clima y la decisión de utilizar las estrategias de adaptación seleccionadas (Deressa et al. 2009).

La falta de conocimiento específico sobre los impactos climáticos futuros es una razón para retrasar las acciones de adopción. Se considera que la toma de decisiones no solo depende de factores: económicos, tecnológicos, ecológicos y físicos. La percepción del riesgo, factores de tipo cultural, ético y conocimiento sobre el cambio climático pueden ser factores limitantes. De manera que la sociedad no cree que el riesgo sea lo suficientemente grande como para justificar la acción. (Adger et al. 2009, Lorenzoni et al. 2007). Por esta razón, recientemente una gran cantidad de literatura ha tratado de analizar la influencia de factores tanto psicológicos como socioeconómicos para ayudar a desarrollar políticas orientadas a motivar o alentar la adopción de acciones de cambio climático (Wreford et al. 2010).

1.3Objetivos

El objetivo principal de esta investigación está enfocado en evaluar las potenciales opciones agrícolas y políticas para la mitigación y adaptación al cambio climático en el cultivo de patata. Para alcanzar este objetivo, este trabajo revisa los conocimientos actuales y desarrolla un marco metodológico a nivel local y regional. A nivel local, el análisis se lleva a cabo en dos estudios de caso en España y Perú. A nivel regional, se ha dirigido la Tesis a tres provincias de la Región Andina del Ecuador en el cultivo mixto patata-pasto.

Para alcanzar el objetivo principal de esta Tesis, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar las emisiones de GEI del cultivo de patata en España y Perú, utilizando el programa Cool Farm Tool (Haverkort y Hillier 2011)
- Explorar el potencial de mitigación de prácticas agrícolas específico para cada región.
- Evaluar la adecuación del programa CFT para la estimación de emisiones de GEI en sistemas agrarios tradicionales que no han integrado tecnologías

modernas de producción (Perú) y en sistemas que han implementado agricultura de precisión (España).

- Evaluar las posibles medidas de mitigación en el cultivo de patata de España, mediante un análisis económico, valorando el potencial de mitigación de las medidas propuestas y sus costes económicos.
- Identificar los efectos potenciales del sistema mixto (patata-ganadería) en tres provincias de la región Andina de Ecuador sobre las emisiones de gases de efecto invernadero
- Determinar prácticas agrícolas con alto potencial de mitigación, específicas para el cultivo y la región, con mínimas barreras de implementación.
- Cuantificar el efecto del factor económico en la implementación de las prácticas agrícolas seleccionadas a través de la variación del margen neto de los agricultores.
- Analizar los factores interrelacionados que influyen en la adopción de prácticas de gestión de las explotaciones agrícolas en respuesta al cambio climático
- Evaluar la percepción de la sociedad sobre el cambio climático y apoyar la implementación de acciones en la Región Andina de Ecuador.

1.4 Estructura de la Tesis

Esta Tesis se estructura en seis Capítulos. El primer Capítulo contiene una introducción general, que establece el contexto de la investigación, descripción del problema, los objetivos y las cuestiones que se abordarán en este trabajo. El Capítulo 2 resume el estado del arte de los principales conceptos utilizados como cambio climático, el efecto del cambio climático en el sector agrícola, y la evaluación de prácticas costo-efectivas de mitigación y adaptación. El Capítulo 3 resume el marco metodológico de la Tesis, que luego se detalla en cada uno de los capítulos de resultados (4 y 5). Los Capítulos 4 y 5 contienen las principales contribuciones empíricas y originales de la Tesis en dos estudios, los cuales a su vez interactúan y retroalimentan. Debido a que cada uno tiene sus propios objetivos, alcance y métodos, se organizan canónicamente con una introducción y secciones posteriores que contienen la metodología, resultados, discusión y conclusiones respectivamente. Ellos ilustran los métodos y herramientas multidisciplinarios aplicados para explorar opciones estratégicas de agricultura para

responder a la mitigación y adaptación al cambio climático. El Capítulo 6 presenta una discusión general de los resultados de la Tesis. El Capítulo 7 presenta las principales conclusiones obtenidas en esta Tesis. Los Anexos 1 al 4 presentan información adicional en apoyo de los datos y resultados. La Figura 1.1 resume el contexto de la investigación.

Figura 1.1. Enlaces entre los métodos de investigación y la estructura de la Tesis

1.5 Difusión de resultados y publicaciones

De mi participación en los proyectos de investigación vinculados a esta Tesis, de la estancia realizada en Ecuador, del análisis cualitativo y cuantitativo, y el extenso trabajo de campo en España, Ecuador y Perú, presenté comunicaciones orales a Congresos Internacionales y escribí trabajos de investigación que se han publicado o están en revisión en diferentes revistas científicas. Las principales contribuciones científicas se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Lista de publicaciones

Componentes de la Tesis, Publicaciones

I: Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata (Capítulo 4).

Publicación en JCR journal

Cayambe J, Iglesias A, García de Jalón S, Chuquillanqui C, Riga P (2015). Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata. ITEA-Información Técnica Económica Agraria. 111-2 (154-173). Doi: <http://dx.doi.org/10.12706/itea.2015.011>

Actas de Congresos

Cayambe J, Iglesias A (2014) Evaluación de la capacidad de mitigación de gases de efecto invernadero y de la eficiencia económica de la producción de patata. Análisis comparativo entre España, Ecuador y Perú. Presentación póster en el Tercer Workshop sobre Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Provenientes del Sector Agroforestal. 10-11 Abril de 2014. Valencia, España.

Cayambe J, Iglesias A, García de Jalón S, Chuquillanqui C, Riga P (2014) Evaluación económica de las estrategias de mitigación de Gases de Efecto Invernadero en sistemas de producción de patata. Presentación oral en la Primera Conferencia de Gases de Efecto Invernadero en Sistemas Agropecuarios de Latinoamérica. 3 de octubre de 2014. Osorno, Chile.

Cayambe J, Iglesias A, Riga P (2013) Evaluación de la capacidad de mitigación de gases de efecto invernadero y de la eficiencia económica de la producción de patata para consumo. Análisis comparativo entre España, Ecuador y Perú. Presentación de póster en el Segundo Workshop sobre Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Provenientes del Sector Agroforestal. 11-12 Abril de 2013, Zaragoza, España.
http://digital.csic.es/bitstream/10261/75407/1/Libro_de_comunicaciones_Remedia_2013.pdf

Cayambe J, Iglesias A, García de Jalón S, Riga P (2013) Cuantificación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en sistemas de producción de patata para consumo en España, Ecuador y Perú: Propuesta de medidas de mitigación. Presentación oral en el IX Congreso de Economía Agraria. 3-5 de septiembre de 2013. Barcelona, España.

Cayambe J, Iglesias A, García de Jalón S, Chuquillanqui C, Riga P (2013) Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata en Ecuador, España y Perú. Presentación oral en el Sexto Congreso Iberoamericano de Desarrollo y Ambiente. CISDA VI de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica. 12-13 de diciembre 2013. Quito, Ecuador.

II: The cost of mitigating greenhouse gas emissions in farms in the Andean region. Journal of Environmental Management (Capítulo 5)

Publicación en JCR journal

Cayambe J, Iglesias A, Barrera V (2017) The cost of mitigating greenhouse gas emissions in farms in the Andean region. Journal of Environmental Management (bajo revisión)

Actas de Congresos

-
- Cayambe J, Iglesias A, Barrera V (2017) Determinantes de la elección de los métodos de mitigación de los agricultores al cambio climático en la región andina. Presentación oral en el IX Congreso de Estudiantes de Ciencia, Tecnología e Ingeniería Agronómica. 9-10 de mayo de 2017. Madrid, España.
- Cayambe J, Iglesias A, Barrera V (2017) Coste-efectividad de las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en la agricultura de los Andes: una perspectiva económica y medioambiental. Presentación póster en el Quinto Workshop sobre Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Provenientes del Sector Agroforestal. 29-30 Marzo de 2017. Barcelona, España.
- Cayambe J, Iglesias A, Barrera V (2016) Calculating the cost-effectiveness of mitigating greenhouse gas emissions in farm mixed Systems (potato - pasture) in Andean region. Poster presentation in 5^o Conference of the Italian Association of Agricultural and Applied Economics: The changing role of regulation in the bio-based economy. 16-17 June 2016, Bologna, Italia.
- Cayambe J, Iglesias A, Barrera V (2016) Cost-effectiveness of greenhouse gases mitigation measures in the Andean agriculture: an economic and environmental perspective. Oral presentation in VIII Congress of APDEA and II Lusophone Meeting in Economics, Sociology, Environment and Rural Development: Public Policies for Agriculture towards 2020 (ESADR 2016). 7-9 September 2016, Coimbra, Portugal.
- Cayambe J, Iglesias A, Barrera V (2016) Coste-efectividad de las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en la agricultura de los Andes: una perspectiva económica y medioambiental. Oral presentation in XI Iberian Conference on Rural Studies (XICIER) on Smart and Inclusive Development in Rural Areas. 13-15 octubre 2016, Vila Real, Portugal.
http://xicier2016.utad.pt/sites/all/themes/professional_responsive_theme/images/files/Book_proceedings.pdf
-

2. Estado del Arte

Esta sección provee los antecedentes sobre los asuntos generales y aspectos de la Tesis. El estado del arte específico y los métodos utilizados se incluyen en cada capítulo pertinente.

La historia de la patata comienza hace más de 8000 años, cerca del lago Titicaca, a 3800 metros sobre el nivel del mar, en la cordillera de los Andes, América del Sur, en la frontera de Bolivia y Perú. La biodiversidad de la patata corre peligro, algunas variedades antiguas cultivadas durante milenios se han perdido y las especies silvestres sufren a causa del cambio climático. Dentro del estudio de las consecuencias del Cambio Climático en la agricultura andina y para mejorar la capacidad de adaptación frente a él, es importante entender algunos factores relevantes e interdependientes que han repercutido en la evolución de los sistemas agrícolas en la región.

2.1 La producción de patata

Diversos factores endógenos y exógenos han influido y determinado la evolución del cultivo de patata, entre ellos diversos aspectos políticos, socioeconómicos y ambientales han contribuido en esta evolución y han determinado la estructura del sector.

2.1.1 La patata a través de la historia

El centro de origen de la patata es la frontera de Perú y Bolivia y el archipiélago de Chiloé, en Chile meridional, son los centros principales de la diversidad de los dos grupos más importantes de *Solanum tuberosum*: el *andigena* y el *tuberosum*. (Swaminathan y Magoon, 1961). En la región andina, generaciones de agricultores han domesticado miles de variedades de patata. Este tubérculo fue llevado a Europa por los españoles y se propagó rápidamente en todo el mundo (Pumisacho y Sherwood 2002). Hoy se cultiva patata en una superficie estimada de 25 millones de hectáreas en todo el mundo (FAOSTAT 2017). Actualmente, los campesinos cultivan hasta 50 variedades en sus fincas. En la reserva de biodiversidad del archipiélago de Chiloé, en Chile, la población local cultiva cerca de 200 variedades de patata autóctonas (Graves 2006). Utilizan prácticas agrícolas heredadas oralmente de generaciones de agricultores, principalmente mujeres (FAO 2008).

Alrededor del año 500 d.C., los pueblos andinos fueron grandes innovadores agrícolas, construyeron acueductos, sistemas de irrigación, terrazas y otras tecnologías conocidas como "campos alzados", que son parcelas elevadas bordeadas de canales de riego, cuya productividad se ha estimado en unas 10 toneladas por hectárea (FAO 2008, Graves 2006). Este tubérculo ha desempeñado un papel sumamente importante en la seguridad alimentaria mundial. Se les atribuye la introducción de la patata a Europa a Sir Walter Raleigh y Sir Francis Drake (Graves 2006). La primera evidencia del cultivo de patata en Europa data de 1565, en las Islas Canarias de España. En 1573 se cultiva la patata en la península ibérica. En 1597 ya se había difundido en Londres, Francia y los Países Bajos. A principios del siglo XVII llegó a la India, China y Japón. Este tubérculo tuvo una gran acogida en Irlanda, donde se adaptó fácilmente al clima fresco y al suelo húmedo. Los emigrantes irlandeses llevaron este tubérculo a América del Norte a principios del siglo XVIII, con el nombre de "patata irlandesa" (FAO 2008).

La historia de la patata advierte la necesidad de mantener la diversidad genética de nuestros alimentos básicos. En el siglo XIX, Irlanda dependía en exceso de unas cuantas variedades de patata, mismas que no tenían resistencia a la enfermedad denominada tizón tardío (*Phytophthora infestans*). El primer indicio se presentó entre 1844-1845, el tizón tardío, acabó con los campos de patata en toda Europa continental, desde Bélgica hasta Rusia. Lo peor fue en Irlanda, donde la patata suministraba el 80% del consumo de calorías. Entre 1845 y 1848 el tizón tardío destruyó tres cosechas de patata, lo que condujo a una hambruna que mató a un millón de personas y más de otro millón tuvo que emigrar. La atención de la ciencia se enfocó en este cultivo, mientras los investigadores buscaban genes que ofrecieran resistencia en las distintas especies de patatas nativas. Los mejoradores de Europa y América del Norte, con nuevo germoplasma importado de Chile, produjeron muchas de las modernas variedades que sentaron las bases de la enorme producción de patata en ambas regiones durante la mayor parte del siglo XX (FAO 2008, Graves 2006).

2.1.2 Importancia económica mundial del cultivo de patata

La contribución de la patata en la seguridad alimentaria es algo que conlleva un interés mundial. Las políticas estatales así como los avances en tecnologías y servicios experimentados durante el siglo XX han permitido mantener el índice de crecimiento de la producción de alimentos por encima del índice de población en la mayoría de los

países. Además, la patata ha demostrado ser un alimento que satisface las necesidades de alimentación y nutrición del siglo XXI.

Desde inicios de la década de los sesenta, el área sembrada de patata en las naciones en desarrollo ha crecido más rápidamente que el de cualquier otro cultivo principal. La producción de patata en el mundo refleja una expansión hacia los países en desarrollo. En la década de los 90, el 70% de la producción del tubérculo se encontraba en los países desarrollados y el 30% restante en los países en desarrollo (Devaux et al. 2010). La producción de patata en los países desarrollados, especialmente en Europa y en la Comunidad de Estados Independientes, ha disminuido a una tasa de -2.4% anual en los últimos 20 años, participando en la producción mundial con un 49.4%; mientras que la producción de los países en desarrollo creció a una tasa del 8.4% anual. Los países asiáticos, en particular China y la India, han impulsado este crecimiento (Devaux et al. 2010, Graves 2006).

La producción mundial de este tubérculo a inicios del siglo XXI fue, en promedio, de 16 toneladas por hectárea (FAOSTAT 2017). Cabe recalcar, que esta cifra comprende enormes variaciones de país en país. En algunas partes de Holanda, se han dado cosechas de más de 100 toneladas por hectárea; en Argentina han llegado a las 70 toneladas. Mientras que en Bolivia se ha tenido rendimientos promedio de 6 toneladas, y en Uganda y Malawi la producción promedio ha sido de 7 toneladas. Considerando la heterogeneidad en cuestiones de clima y topografía, no todos los países podrán cosechar más de 40 toneladas, como lo hace Holanda (Graves 2006). Una serie de factores influyen en la baja productividad del cultivo en algunos países: restricciones bióticas (enfermedades y plagas), insuficiencia de insumos (agua de riego y fertilizantes), baja calidad de la semilla, las pérdidas después de la cosecha reducen la cantidad y calidad de patata que llega finalmente a los mercados, los reducidos niveles de inversión en investigación, extensión rural e infraestructura agrícolas agudizan más estos problemas (Devaux et al. 2010, Graves 2006).

Actualmente el crecimiento de la población conlleva a una significativa reducción de la disponibilidad de tierra agrícola y de agua de riego per cápita. La evidencia demuestra que las emisiones de GEI que agravan el efecto invernadero y el daño a la capa de ozono generarán cambios considerables en la temperatura, precipitación, el nivel del mar y la radiación ultravioleta (FAO 2008).

Asia y Europa son las principales regiones productoras de patata del mundo y en 2014 suministraron el 80% de la producción mundial. Si bien en África y América las cosechas fueron de un volumen mucho menor, la producción alcanza 60 millones de toneladas (Tabla 2.1) (FAOSTAT 2017).

Tabla 2.1 Producción, área cosechada y rendimiento de patata a nivel mundial. 2014.
(FAOSTAT 2017)

	Producción (toneladas)	Área Cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)
América	42241119	1576901	26.78
Asia	186886889	9932183	18.81
Europa	124542089	5616844	22.17
Oceanía	1620508	39216	41.32
África	26391538	1933185	13.65
Total	381682143	19098329	

A diferencia del arroz, trigo y maíz, la patata no interviene en el comercio mundial y generalmente sus precios se determinan a través de la oferta y la demanda locales. La inflación de precios de la patata es mucho menor respecto a la de los cereales. Por lo tanto, es un cultivo sugerido para la seguridad alimentaria, que puede ayudar a los países de bajos ingresos a equilibrar los problemas causados por el aumento de los precios de los alimentos (FAO 2008).

2.1.3 La producción de patata en España

Se desconoce la fecha exacta de la introducción de la patata en Europa, es probable que haya llegado a través de las Islas Canarias de España, donde se cultivaba la variedad *S. tuberosum* por lo menos desde mediados del siglo XVI.

Si bien la patata, como se la llama en España, al principio era máspreciada por su flor que como cultivo alimentario, fue esencial en la agricultura española durante casi todo el siglo XX, con una producción anual superior a 5 millones de toneladas hasta el decenio de 1990. Sin embargo, hoy en día, como en el resto de Europa, la producción de patata en España, ha experimentado a un descenso importante de las superficies de cultivo de patata. En el año 2000 había en España una superficie cultivada de 118800 ha y ha ido descendiendo hasta las 76100 ha en 2014. La producción también ha sufrido un descenso, pasando de los 3,1 millones de toneladas a los 2,5 millones de 2014.

En la última década el rendimiento del cultivo se ha visto ligeramente incrementado (Tabla 2.2) (MAPAMA 2014).

Tabla 2.2. Serie histórica de superficie, producción, rendimiento y precio de la patata en España. Período 2000-2014

Año	Superficie (miles de hectáreas)	Rendimiento (t/ha)	Producción (miles de toneladas)	Precio medio percibido por agricultores (euros/100kg)
2000	118,8	11,92	3078,1	16,6
2001	115,1	11,96	2992,4	20,6
2002	110,1	12,86	3078,1	16,3
2003	101,1	12,86	2665,0	21,2
2004	102,1	12,49	2773,6	22,1
2005	95,0	12,41	2563,5	17,1
2006	87,2	13,26	2515,0	26,7
2007	85,7	13,30	2479,6	24,4
2008	81,8	12,06	2145,2	22,5
2009	85,4	14,65	2719,3	15,0
2010	77,6	13,62	2297,6	25,9
2011	79,9	14,14	2455,1	21,2
2012	72,0	14,00	2192,3	24,6
2013	72,4	13,86	2182,1	34,7
2014	76,1	15,37	2544,0	17,3

Durante el año 2016, España sembró un total de 58.314 ha, de la cuales 12.794 ha eran cultivo de secano y 45.521 ha estaban bajo riego. La producción de patata en España se concentra en determinadas Comunidades Autónomas: Galicia (13390 ha), Andalucía (8586 ha) y Castilla y León (21512 ha) que representan el 71,2% de la superficie nacional (MAPAMA 2016). Sin embargo, el tipo de producción no es el mismo, variando de una a otra comunidad autónoma en función del momento de comercialización, especializándose algunas comunidades autónomas en patatas extra tempranas y tempranas, y otras en patatas de media estación o tardías.

La exportación española de patata en el año 2014 ascendió a 286842 toneladas, por un valor de 93 millones de euros. La exportación española de patata en el año 2014 ascendió a 286842 toneladas, pero también importa un gran volumen; en el 2015, la importación ascendió a 682070 toneladas por un valor de 162 millones de euros (MAPAMA 2016). Desde 1990, las importaciones anuales de patatas crudas y

elaboradas, principalmente de Francia, Alemania, Italia y Marruecos, han aumentado de 395 000 toneladas a 1,2 millones de toneladas (FAO 2008).

Actualmente se utilizan numerosas variedades de patata, según su orientación de cultivo (temprana, media estación, tardía) e incluso orientación comercial (consumo humano, industria). Las variedades más frecuentemente utilizadas en esta tipología de patata son Mona Lisa, Caesar, Jaerla, Ágata, Liseta, Spunta, Blanca Agria (MAPAMA 2010). En España existe aproximadamente más de 22000 explotaciones productoras de patata, ya sea como actividad principal o como producciones asociadas a otras actividades principales (sobre todo cereales). Para una producción total de 2,48 millones de toneladas indicaría una producción promedio de 113,6 t por explotación y una superficie promedio de 3,9 ha/explotación. Además de 8000 explotaciones, con una producción de 2,25 millones de toneladas, con un promedio de 8,8 ha/explotación y una producción de 281,3 t/explotación. Sin embargo, agricultores especializados en patata, con superficies de producción superiores a 1.5 ha, posiblemente no haya más de 9000 o 10000, aproximadamente; los demás productores tal vez figurarían englobados en otras categorías de actividades agrarias (especialmente como productores de cereales) (MAPAMA 2010).

El cultivo de patata en España es intensivo y por lo tanto mecanizado, presenta una gran variedad de tipologías de explotaciones en las cuales los agricultores se encargan de sembrar, cultivar, recoger el producto y ponerlo a disposición de la comercialización en origen, la mayor parte de la producción se destina a la comercialización (MAPAMA 2010)

Las denominaciones de origen o protegidas no se han desarrollado en el sector de la patata, sólo cabría citar dos Indicaciones Geográficas Protegidas: “Pataca de Galicia” y “Patates de Prades” en Tarragona. Tampoco se cuenta con una Organización Interprofesional de la Patata, lo cual redundaría en una débil estructura y reguladora del sector. No obstante, es obligado señalar en este aspecto el enorme esfuerzo integrador y coordinador que realizan algunas organizaciones o asociaciones (MAPAMA 2010).

2.1.4 La producción de patata en la Región Andina

La región andina es una región agrícola intensiva con muchos desafíos, uno de ellos, el cambio climático (Seo y Mendelsohn 2008). La biodiversidad de la patata corre peligro, algunas variedades antiguas cultivadas durante milenios se han perdido y las especies silvestres sufren a causa del cambio climático (FAO 2008). Esta región abarca principalmente cuatro países (Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia) con características similares en población, cultura y recursos naturales.

En el 2014, la región Andina produjo alrededor del 50% (es decir, 8.1 millones de toneladas) de la producción de patata de toda América del Sur (es decir, 15.6 millones de toneladas) (FAOSTAT 2017). La patata es una de las principales fuentes de empleo e ingresos de los agricultores y es un alimento básico en la dieta (Devaux et al. 2010). El consumo per cápita de patata en el 2011 fue 27,4; 18,9; 82,4 y 66 kg·año⁻¹ en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, respectivamente, superando el promedio mundial (FAOSTAT 2017).

El consumo de patatas frescas, que era la forma básica de consumo de este producto, está disminuyendo en muchos países, sobre todo en las regiones en desarrollo. Por lo general, las patatas son consideradas un producto voluminoso, perecedero y cuyo transporte es costoso, con reducido potencial de exportación, que se limita principalmente al comercio transfronterizo. A pesar de estas limitaciones, el comercio de la patata no ha disminuido; por el contrario, se ha duplicado en volumen y su valor casi se ha cuadruplicado desde mediados del decenio de 1980. Este crecimiento se debe a la demanda internacional de productos elaborados, particularmente patatas congeladas y patatas deshidratadas. A pesar del crecimiento del comercio, los países en desarrollo no se han beneficiado del mismo y se han convertido en principales importadores netos de patata. El comercio internacional de patata y sus derivados continúa siendo inferior a la producción, ya que sólo un 6% de la producción llega al mercado internacional. El elevado costo del transporte y de refrigeración, son importantes barreras para extender el comercio internacional de este producto (FAO 2008). El 83% de las exportaciones de patata fresca a nivel mundial está concentrado en países desarrollados, mientras que el 17% restante lo exportan los países en desarrollo (Devaux et al. 2010).

2.1.5 El sistema mixto patata-pasto

El principal sistema mixto de la región andina es la asociación patata-pasto, que representa entre el 25 y 40% del total de sistemas en áreas de gran altitud de América del Sur (Kendall y Rodríguez 2009; Tapia y Fries 2007)

Este sistema consiste en el cultivo de patata durante dos o tres ciclos en suelos previamente ocupados por pastos durante aproximadamente dos años, completando un ciclo de tres a cuatro años (Paladines y Jácome, 1999, Proaño y Paladines, 1998). El pasto se utiliza para la alimentación del ganado y por lo tanto la producción de leche. Después de la patata, se puede plantar otro cultivo durante un solo ciclo para aprovechar el fertilizante residual. Alrededor del 75% de la superficie cultivada no está irrigada (INEC 2016).

La producción de leche que se obtiene en el sistema varía según el nivel de proteína suministrada por el pasto, de la madurez de la especie utilizada y el tipo de vaca. Los niveles de producción varían entre cinco y ocho litros de leche por vaca por día, sin recurrir a suministros de suplementación alimenticia. Las vacas se encuentran bajo un sistema de pastoreo rotacional utilizando cerca eléctrica o el sistema al “sogeo”, que consiste en mantener a las vacas atadas a una cuerda de un extremo y del otro a un árbol o un soporte (Barrera 2004).

En el componente agropecuario, la patata es el cultivo más dinámico, debido principalmente, a los precios del mercado de la patata y a los diferentes aspectos edafoclimáticos y de manejo que afectan su productividad. Si los productores registran pérdidas económicas en el cultivo de patata, se desestimula la decisión de nuevas siembras y conduce a la producción de leche como estrategia para subsistir. La ganadería de leche ha servido como sustento para volver a sembrar patata y arriesgar todo su capital disponible (Barrera 2010). La patata-pasto es el sistema agropecuario clave en esta región (INIAP 2003). La mano de obra dentro del sistema en su mayoría es de tipo familiar y ocasionalmente se contrata mano de obra. La labranza del suelo es mayormente manual o con tracción animal, aunque también se utiliza labranza mecanizada para mullir el suelo. Los altos índices de fertilización y el uso frecuente de pesticidas, son comunes en el sistema patata-pasto (Barrera 2004, Cayambe et al. 2013).

2.2 El Cambio Climático

El cambio climático plantea desafíos a la agricultura, especialmente en los países en desarrollo, y muchas prácticas agrícolas actuales dañan el medio ambiente y son una fuente importante de gases de efecto invernadero (GEI). La seguridad alimentaria es una prioridad en la agenda política mundial. En un mundo cada vez más globalizado, la inseguridad alimentaria en una región puede tener ramificaciones políticas y económicas generalizadas. Hay una mayor competencia por la tierra, el agua, la energía y otros insumos en la producción de alimentos. La demanda de alimentos aumenta a medida que las poblaciones crecen y adquieren riqueza para adquirir las dietas más variadas y consumen muchos recursos (Garnett et al. 2013). Las actividades antropogénicas tales como el cambio del uso del suelo, la agricultura y la gestión de residuos han alterado las emisiones de gases de efecto invernadero; y el aumento resultante, particularmente de metano y de óxido nitroso, pueden contribuir al cambio climático (Ciais et al. 2013).

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (mediante pruebas estadísticas) por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, generalmente décadas o más (IPCC 2014). Se refiere a cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de cambios antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra (IPCC 2007). La CMNUCC define como el cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición atmosférica global y además a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables (IPCC 2014).

Las emisiones acumuladas de CO₂ han sido liberadas a la atmósfera principalmente por la combustión de combustibles fósiles, la producción de cemento y la quema (420 ± 35 GtCO₂ en 1750 para triplicarse a 1300 ± 110 GtCO₂ en 2010) y las emisiones producto del cambio de uso de la tierra (490 ± 180 GtCO₂ en 1970 a 680 ± 300 GtCO₂ en 2010) (IPCC 2013). De 2000 a 2010, las emisiones totales de GEI antropogénicas fueron las más altas de la historia humana y alcanzaron $49 (\pm 4,5)$ GtCO₂eq / año en 2010 (IPCC 2014). Las emisiones anuales de GEI crecieron en promedio 1,0 gigatoneladas equivalente de dióxido de carbono (GtCO₂eq) (2,2%) por año entre 2000 y 2010 comparado con 0,4 GtCO₂eq (1,3%) por año entre 1970 y 2000. Las emisiones

antropogénicas de GEI fueron las más altas de la historia humana de 2000 a 2010 y alcanzaron $49 (\pm 4,5)$ GtCO₂eq/año en 2010. La crisis económica mundial 2007/2008 sólo redujo temporalmente las emisiones (IPCC 2014) (Figura 2.1).

Figura 2.1. Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI (GtCO₂eq/año) por grupos de gases 1970-2010: CO₂ procedente de combustibles fósiles y procesos industriales, CO₂ procedente del sector forestal y otros usos del suelo, metano, óxido nitroso, gases fluorados (IPCC 2014).

Las emisiones incesantes de GEI provocarán un mayor calentamiento que perdurará durante muchos siglos, incluso aunque cesen las emisiones de CO₂; lo que supone el cambio climático de manera irremediable durante varios siglos, debido a las emisiones de CO₂ pasadas, presentes y futuras. Para reducir el cambio climático, será necesario mitigar sustancialmente y a lo largo del tiempo las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC 2013).

2.2.1 Escenarios de cambio climático

Los escenarios son imágenes del futuro o futuros alternativos, no son ni pronósticos ni proyecciones (Moss et al. 2010). Cada escenario representa una imagen acerca de cómo el futuro puede cambiar. Hay cierta incertidumbre asociada a los escenarios de cambio climático, sin embargo son capaces de representar futuros potenciales basados en diferentes suposiciones y mejorar la comprensión del desarrollo del sistema natural de la Tierra (Stainforth et al. 2005). Los escenarios pueden ser herramientas útiles para el

análisis del cambio climático, incluyendo el modelado del clima, la evaluación del impacto y las posibles medidas de mitigación y adaptación (van Vuuren et al. 2011).

Normalmente se generan una serie de escenarios contrastantes para definir una gama realista de futuros potenciales mediante la representación de diferentes proyecciones. Los nuevos escenarios de cambio climático se generan sobre la base de los siguientes tipos de modelos y marcos analíticos: (a) un conjunto de cuatro nuevas vías, vías de concentración representativas (RCPs) basados en pruebas experimentales anteriores para proporcionar los insumos necesarios de emisiones, concentraciones y uso/coertura de la tierra para modelos climáticos (van Vuuren et al. 2011); (b) nuevos escenarios socioeconómicos y políticos que determinan las emisiones de gases de efecto invernadero basados en un conjunto de factores como la demografía, el uso de la energía, tecnología, economía, agricultura, silvicultura y el uso de la tierra (van Vuuren et al. 2013). Algunos de estos escenarios socioeconómicos son consistentes con las características de forzamiento radiactivo usadas para identificar los (RCPs) y algunos para explorar futuros completamente diferentes (Moss et al. 2010); (c) modelos climáticos globales basados en supuestos físicos y químicos que determinan los sistemas naturales de la Tierra para estudiar cómo el clima responde a los cambios en las perturbaciones naturales e inducidas por el hombre; y (d) la evaluación integrada de los escenarios climáticos y socioeconómicos para evaluar los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad al cambio climático que incluyan enfoques tanto cuantitativos como cualitativos basados en suposiciones hechas para regionalizar los resultados de modelos globales (van Vuuren et al. 2011) .

Muchos aspectos del sistema climático muestran evidencia de un clima cambiante, tales como incremento en la temperatura media global (superficie y océano), aumento del nivel del mar y aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. (Stocker et al. 2013, Burkett et al. 2014). Se prevé que la temperatura atmosférica global aumentará aproximadamente 4°C en 2080, lo que está relacionado a un incremento de la concentración atmosférica de CO₂. Se espera que las temperaturas medias aumenten a un ritmo más rápido en las latitudes superiores, con tasas más lentas en las regiones ecuatoriales. Se espera que el aumento de la temperatura media en la altitud sea más alto que en el nivel del mar, resultando en la intensificación de la precipitación y la aceleración del deshielo y el retroceso de los glaciares. (Turrall et al. 2011)

Los impactos previstos debido a la variabilidad climática difieren según el contexto analizado: local, regional o global. Se prevé que para el período 2081-2100 habrá cambios significativos en (a) la temperatura media anual de la superficie, (b) cambio en la precipitación media anual, en porcentajes, y (c) cambio en el nivel promedio del mar. Los cambios han sido analizados en relación con el período 1986-2005 (Figura 2.2) (IPCC 2014).

Figura 2.2. Cambios proyectados al período 2081-2100 a nivel mundial en (a) temperatura media anual de la superficie, (b) precipitación media anual (%) y (c) nivel promedio del mar. Comparación con el período 1986-2005 (IPCC 2014).

2.2.2 Cambio climático en Europa

La temperatura media en Europa ha seguido aumentando, siendo las tasas de calentamiento regionales y estacionales más altas en las altas latitudes del norte de Europa. Desde los años 80, el calentamiento ha sido más fuerte sobre Escandinavia, especialmente en invierno, mientras que la Península Ibérica se calentó sobre todo en verano (Magrin et al. 2014).

Desde 1950, los extremos de alta temperatura (días calurosos, noches tropicales y olas de calor) se han vuelto más frecuentes, mientras que los extremos de baja temperatura (heladas, días de heladas) se han vuelto menos frecuentes (EEA 2012). Los recientes inviernos fríos de la Europa septentrional y atlántica reflejan la alta variabilidad natural de la región (Peterson et al. 2012), y no contradicen la tendencia general del calentamiento. En Europa oriental, incluida la parte europea de Rusia, el verano de 2010 fue excepcionalmente caliente, con una amplitud y extensión espacial que superó la ola de calor de 2003 (Barriopedro et al. 2011). Así también, la precipitación anual ha aumentado en el norte de Europa (hasta por encima de los 70 mm por década) y ha disminuido en algunas partes del sur de Europa (EEA 2012, Magrin et al. 2014).

En la región mediterránea, los efectos del cambio climático podrán ser negativos, sobre todo por la disminución de agua de riego para la agricultura, lo cual generará cambios en la zonificación y productividad. La posición de la agricultura en algunos países exportadores de clima templado puede verse afectada. La alteración de los ciclos de carbono y nitrógeno puede tener importantes consecuencias para la erosión del suelo, la calidad del agua y los ecosistemas (Iglesias y Medina 2009).

2.2.3 Proyecciones climáticas en Europa

Los modelos climáticos muestran un acuerdo significativo para todos los escenarios de emisiones en cuanto al calentamiento en toda Europa. Se proyecta un calentamiento más fuerte en Europa meridional en verano y en Europa septentrional en invierno (Kjellström et al. 2011). Además, se advierte un aumento medio de la temperatura global limitado a 2°C en comparación con los tiempos preindustriales (Magrin et al. 2014).

Las señales de precipitación varían regional y estacionalmente. Las tendencias son menos claras en Europa continental, con un acuerdo en el aumento en el norte de Europa y una disminución en el sur de Europa (Kjellström et al. 2011). Se prevé que la precipitación disminuirá en los meses de verano hasta el sur de Suecia y aumentará en invierno, con más lluvia que nieve en las regiones montañosas (Steger et al. 2013). Existe falta de información sobre los cambios pasados y futuros en la ocurrencia de granizo en Europa. Los cambios en los patrones de circulación en el futuro y las tendencias de la velocidad media del viento son inciertos (Kjellström et al. 2011)

2.2.4 Cambio climático en Centroamérica y Sudamérica

En Centroamérica y Sudamérica, la variabilidad decadal y los cambios extremos han afectado a grandes sectores de la población, especialmente aquellos más vulnerables y expuestos a los riesgos climáticos. Los cambios observados se han atribuido a la variabilidad natural del clima y al cambio en el uso de la tierra, lo que significa que el cambio en el uso de la tierra es el resultado de la actividad humana (Magrin et al. 2014).

América Central se ha caracterizado tradicionalmente como una zona con alta exposición a los riesgos geo-climáticos derivados de su ubicación y topografía y con alta vulnerabilidad de sus asentamientos humanos (ECLAC 2010). En los últimos 30 años se ha evidenciado un aumento constante en eventos extremos incluyendo tormentas, inundaciones, y sequías. En el período 2000-2009, ocurrieron 39 huracanes en la cuenca del Caribe en comparación con 15 y 9 en los años ochenta y noventa, respectivamente (UNEP y ECLAC 2010).

En los Andes centrales, Perú, la precipitación muestra una fuerte tendencia negativa, mientras que el calentamiento también se detecta (SENAMHI 2007). En el sur de los Andes, Perú, las temperaturas del aire han aumentado durante 1964-2006, pero no se ha detectado una señal clara sobre los cambios de precipitación (Marengo et al. 2009). En los Andes septentrionales (Colombia, Ecuador), se identificó cambios en temperatura y lluvia en 1961-1990 (Villacís 2008). La temperatura en los Andes ha aumentado aproximadamente 0.1 °C por década. La precipitación ha aumentado ligeramente en la segunda mitad del siglo XX en los trópicos interiores y ha disminuido en los trópicos exteriores. Además, una tendencia significativa positiva en la temperatura media de 0,09 °C por década durante 1965-2007 se ha detectado en los Andes peruanos (Lavado et al.

2012). Con respecto a la Amazonía, lluvias fuertes están aumentando con frecuencia (Donat et al. 2013). Dos sequías importantes y tres inundaciones han afectado a la región entre 2005 y 2012, aunque estos eventos se han relacionado con la variabilidad climática natural y no con la deforestación (Marengo et al. 2012 2013; Espinoza et al. 2013, Satyamurty et al. 2013).

2.2.5 Proyecciones climáticas en Centroamérica y Sudamérica

Las proyecciones climáticas en Centroamérica prevén un calentamiento anual promedio de 2,5°C y una reducción de la precipitación del 10%, junto con una reducción en la precipitación del verano. En Sudamérica, sugieren reducciones de la precipitación y calentamiento, junto con un aumento en la evaporación y reducciones en la humedad del suelo (Magrin et al. 2007), se pronostica un calentamiento promedio de 4°C, con reducción de lluvias hasta 15% en las selvas tropicales de Sudamérica (este de los Andes), y un aumento de alrededor del 15 al 20% en la Región Andina y Sureste de Sudamérica. Los cambios que se muestran para mediados del siglo XXI son pequeños. Existe cierto grado de incertidumbre sobre las proyecciones del cambio climático para las regiones, particularmente para las precipitaciones en Centro América y Sudamérica tropical (Magrin et al. 2014).

Las proyecciones en la temperatura y precipitación promedio anuales para finales del siglo XXI, se muestra en la Figura 2.3. Proyecciones promedio de los cambios de temperatura promedio anual (panel izquierdo) y el promedio de los porcentajes de precipitación media anual (panel derecho) para 2046-2065 y 2081-2100 en RCP2.6 y RCP8.5, en relación con 1986-2005. Los colores sólidos indican áreas con un acuerdo muy fuerte ($\geq 90\%$ de los modelos) respecto al signo en la variación de temperatura y precipitación. Los colores con puntos blancos indican áreas con un fuerte acuerdo, donde $\geq 66\%$ de los modelos concuerdan en signo de cambio. Gris indica áreas con cambios divergentes, donde se presenta un cambio pero $<66\%$ están de acuerdo en el signo de cambio. Los colores con líneas diagonales indican áreas con poco o ningún cambio, donde $<66\%$ de los modelos muestran un cambio, aunque puede haber cambios significativos en períodos más cortos como temporadas, meses o días (Magrin et al. et al. 2014).

Figura 2.3. Cambios proyectados en la temperatura promedio anual (panel izquierdo) y el promedio de los porcentajes de precipitación media anual (panel derecho) para 2046-2065 y 2081-2100 en RCP2.6 y RCP8.5, en relación con 1986-2005 (Magrin et al. 2014)

2.3 Efecto del cambio climático en la agricultura y seguridad alimentaria

Hay muchos estudios sobre las implicaciones del cambio climático en el sector agrícola (Olesen y Bindi 2002, Lobell y Field 2007, Iglesias et al. 2012), que también reflejan la preocupación por las posibles consecuencias sobre las tasas de pobreza y el desarrollo sostenible en las zonas más marginales (Parry et al. 2004, Mendelsohn et al. 2006, Stern 2007, Iglesias et al. 2011a).

La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera determinará el clima futuro (IPCC 2013). A su vez, las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las actividades humanas dependerán de factores socioeconómicos como el uso de la tierra, la población y el crecimiento económico y la tecnología energética, entre otros (Stern 2007). A nivel mundial, el crecimiento económico y demográfico son los principales impulsores del aumento de las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles fósiles y el crecimiento económico está creciendo

rápidamente (IPCC 2014). En 2010, las emisiones totales de GEI antropogénicas emitidas por los diferentes sectores económicos fueron 49 ($\pm 4,5$) GtCO₂eq / año.

Los riesgos de impactos totales a nivel global son moderados para un calentamiento adicional entre 1 y 2 °C, lo que refleja tanto los impactos en la biodiversidad de la Tierra como en la economía general global (nivel de confianza medio). El riesgo de pérdida amplia de biodiversidad con destrucción conexa de bienes y servicios ecosistémicos es alto en caso de un calentamiento adicional de alrededor de 3 °C (nivel de confianza alto). Los daños económicos totales se aceleran con el aumento de la temperatura (con una evidencia limitada y un nivel de acuerdo alto), pero son pocas las estimaciones cuantitativas completadas para un calentamiento adicional de alrededor de 3 °C o superior (IPCC 2014).

De esta manera, aunque se espera un aumento de los rendimientos en algunas regiones de latitudes altas, se proyecta una disminución general de los rendimientos a nivel mundial (Field et al. 2014, Lobell et al. 2008). El IPCC (2014) señala que a partir de la década de 2080 en adelante, los impactos de rendimiento negativo en los trópicos son muy probables, independientemente del escenario de adaptación o emisión. Por lo tanto, los riesgos son mayores en los países tropicales debido a los impactos proyectados, menor capacidad de adaptación y mayores tasas de pobreza en comparación con las regiones templadas.

El impacto previsto del cambio climático en un conjunto de sistemas agrícolas será mayor en sistemas en situación de riesgo (Iglesias et al. et al. 2011, Stern 2007, Turrall et al. 2011). Existen fuertes evidencias de impactos en la agricultura debido a la sensibilidad de la producción de cultivos a los cambios en las condiciones climáticas (Field et al. 2014, Lobell et al. 2008, Howden et al. 2007) Los efectos previstos del cambio climático se evidenciarán en la disponibilidad de agua para la agricultura y tendrá implicaciones en la seguridad alimentaria a nivel mundial ya que la falta de agua limitará la productividad de los cultivos (Iglesias et al. 2012, Turrall et al. 2011). Además, el aumento de la frecuencia y la gravedad de fenómenos meteorológicos extremos aumentarán considerablemente el riesgo de fracaso de las cosechas. Se ha estimado que los países en desarrollo soportarán el 70-80 por ciento del coste de los daños causados por el cambio climático (World Bank 2009). La Figura 2.5 muestra los cambios proyectados en el rendimiento de los cultivos en períodos de veinte años (eje

horizontal), incluyendo casos sin adaptación y con adaptaciones incrementales, los datos de cada período de tiempo suman 100%. Se observa que los impactos negativos sobre los rendimientos medios serán probables a partir de la década de 2030 y aumentarán durante el siglo XXI, siendo mayores las reducciones del rendimiento para finales del siglo (IPCC 2014).

Figura 2.4. Impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos (IPCC 2014).

Los impactos observados y previstos del cambio climático en la agricultura son diferentes según la región y la escala analizada (global, regional o local). Las consecuencias potenciales del cambio climático producirán impactos beneficiosos en algunas regiones y nocivos en otros (IPCC 2007a).

En Europa, un aumento de la temperatura regional de 2.5°C en la década de 2080 podría conducir a pequeños cambios (en promedio + 3%) en los rendimientos de los cultivos, mientras que un calentamiento regional de 5.4°C podría reducir los rendimientos medios en un 10% según un estudio basado en modelos climáticos regionales (Ciscar et al. 2011). Un beneficio inicial de la creciente concentración de CO₂ para los rendimientos de los cultivos de secano contrastaría a finales del siglo con descensos en el rendimiento en la mayoría de las subregiones europeas. Para un aumento de la temperatura global de 5°C, los índices agroclimáticos muestran una frecuencia creciente de años extremadamente desfavorables en las zonas de cultivo europeas (IPPC 2014). Es probable que la distribución regional de los impactos del cambio climático sobre la producción agrícola varíe ampliamente. En el sur de Europa se registrarían las mayores

pérdidas de rendimiento (-25% en 2080 bajo un calentamiento de 5,4 ° C, Ciscar et al. 2011). Las condiciones más cálidas y más secas para 2050 (Trnka et al. 2011) provocarían una disminución moderada de los rendimientos de los cultivos en las regiones de Europa Central (Ciscar et al. 2011). En Europa occidental, el aumento del estrés térmico alrededor de la floración podría causar considerables pérdidas de rendimiento en el trigo (Semenov, 2009). Para el norte de Europa, existen evidencias divergentes sobre los impactos futuros. Los cambios de rendimiento positivos combinados con la expansión de las áreas climáticamente adecuadas podrían conducir a aumentos en la producción de cultivos (entre 2,5°C y 5,4°C de calentamiento regional) (Bindi y Olesen, 2011).

Centro América y América del Sur, es enormemente heterogénea desde el punto de vista de clima, topografía, ecosistemas, distribución de la población humana y tradiciones culturales. Esta región cuenta con una gran variedad de ecosistemas, que abarcan desde los bosques tropicales amazónicos, los bosques nublados, los páramos andinos, las praderas, y los suelos de matorrales hasta los desiertos, los pastizales, y los humedales. Las cordilleras montañosas y las mesetas influyen en la determinación no sólo del clima regional y del ciclo hidrológico, sino también de su biodiversidad. (Benegas et al. 2009, Aguilar et al. 2009, Campos y de Carvalho Studart 2008, de Souza Filho y Brown 2009):

Las praderas cubren cerca de un tercio de los suelos de América Latina. América Latina se conoce como una de las regiones con mayor concentración de biodiversidad del planeta, tanto terrestres como marinas, y su diversidad genética se encuentra entre las más ricas del mundo. Siete de las áreas más diversas y amenazadas del mundo se encuentran en América Latina y Centro América. Las culturas precolombinas habían desarrollado actividades agrícolas y pecuarias en las mesetas altas, en donde la mayoría de las comunidades indígenas de América Latina aún se encuentran establecidas. Los cambios en el uso de los suelos se han convertido en un aspecto influyente en los ecosistemas. Muchos ecosistemas ya se encuentran en riesgo debido a actividades humanas, y el cambio climático va a constituir un problema adicional (Magrin et al. 2014).

Los bosques tropicales de América Latina, particularmente los de la Amazonía, son cada vez más susceptibles a los incendios debido al aumento de las sequías relacionadas

con El Niño y al cambio en el uso de la tierra (deforestación, tala selectiva y fragmentación de los bosques) (Jarvis et al. 2010). Los bosques de manglares ubicados en zonas costeras bajas son particularmente vulnerables a la subida del nivel del mar, el aumento de las temperaturas medias y la frecuencia e intensidad de los huracanes (Alongi 2008, Giri et al. 2008), especialmente en México, América Central y el Caribe. Además, las inundaciones aceleran los cambios en áreas de manglar y en la interfaz terrestre (Magrin et al. 2014).

Cambios significativos en las condiciones climáticas no solo desafiarán la producción de alimentos, sino que también desafiarán la seguridad alimentaria de cada región debido a la disminución de la productividad de los cultivos, el aumento de plagas agrícolas, enfermedades y malas hierbas, así como la disminución de la calidad de los alimentos.

2.4 Estrategias frente al cambio climático

La aplicación inmediata de estrategias frente al cambio climático es urgente a fin de que los sistemas agrícolas se tornen resistentes (Turrall et al. 2011). El desafío de reducir las emisiones agrícolas es particularmente agudo, ya que las reducciones alcanzables por las prácticas agrícolas cambiantes son limitadas (Franks y Hadingham 2012) y se ven obstaculizadas por el rápido aumento de la demanda de alimentos (Alexandratos y Bruinsma 2012, Tilman et al. 2011).

Las negociaciones actuales se enfocan en estabilizar las temperaturas de fin de siglo a no más de 2 °C para minimizar los impactos negativos (IPCC 2014). Para lograr esto, los países han presentado contribuciones nacionales definidas que definen su acción climática post-2020. El acuerdo de París obliga a los países a desarrollar, actualizar y publicar inventarios de las emisiones de cada país. Estos inventarios pueden utilizarse para elaborar estrategias nacionales y formular políticas para ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Rogelj et al. 2016, CMNUCC 2015, Turrall et al. 2011).

Crear sinergias entre la adaptación y la mitigación puede aumentar la rentabilidad de las acciones y hacerlas más atractivas para las partes interesadas. Sin embargo, estas sinergias no garantizan que los recursos se utilicen de la manera más eficiente. Las

oportunidades de sinergias son mayores en el sector de la agricultura y silvicultura que en otros sectores (por ejemplo, energía, salud y sistemas costeros) (Burkett et al. 2014).

2.4.1 Adaptación al cambio climático en el sector agrícola

La agricultura es desafiada por el cambio climático y por otros retos como impulsar la agricultura sostenible, reducir las emisiones de GEI y satisfacer las crecientes demandas de conservación de alimentos y medio ambiente, entre otras. A lo largo de la historia, la agricultura ha demostrado tener gran capacidad de adaptación a los cambios. Por lo tanto, la agricultura actual necesita adaptarse a los nuevos escenarios.

Una miscelánea de opciones de adaptación interrelacionadas entre sí, sugiere ser lo más recomendable en términos de adaptación en lugar de determinar a la "mejor" opción o proceso. Estas opciones de adaptación están enmarcadas en un contexto ambiental, social y de políticas locales, desde la integración de opciones de las partes interesadas y las posibles opciones políticas.

Se han propuesto algunas medidas de adaptación para reducir los impactos del cambio climático en el sector agrícola, por ejemplo, a través de la conservación de ecosistemas clave, el uso de sistemas de alerta temprana y la implementación de sistemas de vigilancia de enfermedades. Los avances genéticos y la gestión adecuada del suelo y de la tecnología pueden inducir un aumento del rendimiento de algunos cultivos a pesar de las condiciones climáticas futuras desfavorables (Magrin et al. 2014).

En Ecuador se propusieron opciones como la zonificación agroecológica y las estaciones apropiadas de siembra y cosecha, la introducción de variedades de mayor rendimiento, la instalación de sistemas de riego, el uso adecuado de fertilizantes y la implementación de un sistema de control de plagas y enfermedades (NC-Ecuador 2011, Magrin et al. 2007). Sin embargo, varias limitaciones como la falta de información básica, observación y sistemas de monitoreo, falta de creación de capacidad, falta de marcos políticos, institucionales y tecnológicos adecuados, bajos ingresos, y los asentamientos en áreas vulnerables, superan la efectividad de estos esfuerzos (Magrin et al. 2014).

Las técnicas genéticas, el conocimiento científico específico y la planificación del uso de la tierra se consideran fuentes prometedoras de adaptación (Urcola et al. 2010). Los

ajustes en las fechas de siembra y en las tasas de fertilización podrían reducir los impactos negativos, aumentar los rendimientos de los cultivos (Magrin et al. 2009; Meza y da Silva 2009; Travasso et al. 2009) o permitir la realización de dos cultivos por temporada, aumentando la productividad por unidad de tierra (Monzón et al. 2007; Meza et al. 2008). En otros cultivos, las estrategias de adaptación incluyen plantación a altas densidades, suelo con vegetación, riego preciso y programas de mejoramiento, y sistema de manejo de sombreado (arborización) (Camargo 2010). Plantar cultivares tempranos es otra forma de adaptarse al cambio climático (Walter et al. 2010).

Medidas de regulación, principios de sostenibilidad, expansión de áreas protegidas, certificación de productos forestales y expansión de plantaciones forestales en áreas no forestales (Tomaselli 2001) son medidas implementadas para la adaptación. La mayoría de los países ofrecen incentivos para la gestión de sus bosques nativos: exención de impuestos a la tierra (Chile, Ecuador), asistencia técnica (Ecuador) y subsidios (Argentina, México y Colombia) (UNEP 2003). Los resultados concluyen que existe la necesidad de regímenes institucionales flexibles y adaptativos, la investigación social y la participación pública, y un mejor monitoreo y mecanismos para el intercambio de información entre otros, que parecen ser bastante concurrentes con estudios similares (Tisdell 2010 Méndez et al. 2012).

2.4.2 Mitigación del cambio climático en el sector agrícola

El último informe del IPCC (2014) define la mitigación como *"una intervención humana para reducir las fuentes o aumentar los sumideros de carbono"*. Además menciona que la mitigación, junto con la adaptación al cambio climático, contribuye al objetivo expresado en el artículo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): *"lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evite interferencias antropógenas peligrosas con el sistema climático. Dicho nivel debería alcanzarse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, para garantizar que la producción de alimentos no se vea amenazada y para permitir que el desarrollo económico avance de manera sostenible"*.

Las reducciones de las emisiones agrícolas dependen de los detalles cuantitativos del potencial de mitigación y el coste de las medidas a nivel de finca, las barreras al cambio de comportamiento y la política agrícola que influye en las decisiones de los agricultores (Smith et al. 2007, Stern 2007)

Para lograr una mitigación efectiva es necesaria una cooperación internacional, no se alcanzará efectividad si los agentes individuales hacen avanzar sus propios intereses de manera independiente. El cambio climático es un problema de acción colectiva a escala global, ya que la mayoría de gases de efecto invernadero se acumulan con el tiempo y se mezclan a nivel mundial, y las emisiones de cualquier agente (por ejemplo, individuo, comunidad, empresa, país) afectan a otros agentes. La cooperación internacional puede desempeñar un papel constructivo en la generación, difusión y transferencia de conocimiento y tecnologías ambientalmente sostenibles (IPCC 2014).

Existe heterogeneidad en las contribuciones de los países, tanto pasadas como futuras, a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, por lo que los países deben enfrentarse a diferentes capacidades y circunstancias para abordar la mitigación y la adaptación (IPCC 2014). La financiación de las actividades de mitigación sigue siendo un problema, en particular para las personas y los países pobres.

Se reconoce ampliamente la importancia de la economía en la lucha contra el cambio climático. No existe un acuerdo sobre cuánta mitigación debe emprender el mundo y los costes económicos de la acción (costes de mitigación) y la inacción (los costes de adaptación y los daños residuales de un cambio climático). La incertidumbre sigue siendo (1) los costes de reducir las emisiones de GEI, (2) los daños causados por un cambio climático y (3) el coste, practicidad y efectividad de las medidas de mitigación/adaptación. Los costes y los ingresos económicos no son el único insumo en la toma de decisiones sobre el cambio climático, pero este análisis puede ayudar a orientar la acción política de los países, siempre que se incorporen en los métodos económicos los supuestos éticos apropiados, adecuados y transparentes. Para una persona o empresa, la mitigación implica costes reales, mientras que los beneficios para sí mismos de sus propios esfuerzos de mitigación son pequeños e intangibles. Esto reduce los incentivos para que individuos o países reduzcan unilateralmente las emisiones. La mitigación de las emisiones de GEI es un bien público, lo cual inhibe la

mitigación, y explica el fracaso de las naciones en llegar a un acuerdo sobre cómo resolver el problema (IPCC 2014).

2.5 Barreras de comportamiento para implementar acciones de cambio climático

La evaluación de las barreras de comportamiento regionales contribuye a la comprensión de cómo se pueden implementar las opciones de adaptación potenciales. Esta comprensión de la adopción puede contribuir a averiguar dónde es más probable que las políticas de adaptación sean apoyadas y donde la política debe intervenir para minimizar el efecto negativo de las barreras de comportamiento. Por lo tanto, la inclusión de todos los tipos de barreras en la adopción de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático es crucial para garantizar una implementación exitosa de las políticas de cambio climático.

Las barreras de comportamiento analizan la influencia de los procesos psicológicos y de pensamiento en los actores individuales frente a estímulos de cambio climático (Jones y Boyd 2011). En la última década, ha aumentado la preocupación por el papel que las barreras de comportamiento de los agricultores pueden tener en la adopción potencial de acciones contra el cambio climático (Le Dang et al. 2013). Un ejemplo de esto podría ser cuando no se adoptan opciones de "no arrepentimiento" (es decir, proporcionar beneficios incluso en ausencia de cambio climático) y "opciones ganar-ganar" (es decir, reducir las emisiones de GEI y los costos de ahorro). Estos casos, en los que no existen barreras biofísicas ni económicas, son ejemplos claros en la economía conductual del papel crucial que las barreras de comportamiento pueden jugar en la implementación de acciones contra el cambio climático (García de Jalón et al. 2013).

Tradicionalmente, la literatura sobre psicología social y ambiental utiliza diferentes tipos de escalas y análisis de factores para analizar la preocupación social por el cambio climático y el medio ambiente (Davis et al. 2009; Davis et al. 2011; Michel-Guillou y Moser 2006; Milfont y Duckitt 2004). En la mayoría de estos estudios se pregunta directamente a los encuestados por su preocupación personal por el cambio climático o por su compromiso ambiental en general, sin enfocarse en un problema específico en un estudio de caso (García de Jalón et al. 2013).

Las percepciones y actitudes sobre el cambio climático determinan la intención de adoptar medidas de mitigación y adaptación. El comportamiento hacia la mitigación y la adaptación puede ser impulsado por diferentes fenómenos debido a la distribución espacial de los costos y beneficios de las medidas. Sin embargo, la percepción y las actitudes hacia el cambio climático se refieren a la amenaza del cambio climático independientemente de los beneficios y costos de las acciones de mitigación y adaptación. Por lo tanto, el desentrañamiento entre los comportamientos hacia la mitigación y la adaptación podría ser notablemente complicado con respecto a la percepción y las actitudes hacia el cambio climático. Además, si los individuos no están familiarizados con los términos "cambio climático", "mitigación" y "adaptación", el desentrañar el comportamiento de los individuos hacia la mitigación y la adaptación puede ser particularmente complejo y conducir a conclusiones engañosas. Otro ejemplo que dificulta la evaluación separada del comportamiento es cuando las medidas de adaptación también pueden proporcionar beneficios colaterales en términos de mitigación y viceversa. En este contexto, se han sugerido numerosas prácticas agrícolas sostenibles para sus beneficios simultáneos como la labranza de conservación, la siembra de árboles, rotaciones de cultivos, cultivos de cobertura, recolección de agua, agrosilvicultura y mejoramiento de la gestión de agua y nutrientes (FAO 2009; Lal 2004; Ngigi et al. 2009). Debido a esta complejidad para separar el comportamiento hacia la mitigación y la adaptación, estudios recientes han afirmado que el comportamiento hacia la mitigación y la adaptación podría ser conducido de manera similar, ya que los determinantes de las respuestas conductuales frente a la capacidad de adaptación y mitigación son esencialmente los mismos (Yohe 2001; Adger et al. 2009).

Las percepciones y las reacciones a la incertidumbre y al riesgo pueden depender no sólo de la realidad externa, sino también de los procesos cognitivos y emocionales (IPCC 2014). Algunos factores dificultan que la gente piense en el cambio climático y los llevan a una infra-ponderación, generando pensamientos como: el cambio climático ocurre gradualmente, es probable que los efectos mayores se produzcan en el futuro lejano, los efectos se sentirán en otra parte, y su naturaleza es incierta. Por otra parte, el clima es naturalmente variable, y la distinción entre tiempo y clima es a menudo mal entendida (Reynolds et al. 2010). Las percepciones y la comprensión de las personas sobre el cambio climático no corresponden necesariamente al conocimiento científico

porque son más vulnerables a las emociones, los valores, las opiniones y las fuentes (poco confiables) (Weber y Stern 2011).

Una de las principales conclusiones sobre los países en desarrollo es que los actores no estatales, como las tribus, los clanes, las castas o los gremios, pueden influir sustancialmente en la elección y difusión de las decisiones sobre políticas climáticas en lugar de tomar decisiones a nivel de la unidad individual o gubernamental. Por ejemplo, una comunidad agrícola puede abordar los riesgos climáticos y las incertidumbres que enfrenta su comunidad y optar por un sistema de rotación de cultivos para retener la fertilidad del suelo. Esto subraya por qué los riesgos y la incertidumbre asociados con el cambio climático han desplazado la responsabilidad gubernamental hacia los actores no estatales (Rayner 2007).

Los efectos adversos del cambio climático sobre la alimentación, el agua, la seguridad y la incidencia de enfermedades influenciadas por la temperatura (Shah y Lele 2011), son alimentados aún más por la falta general de conciencia sobre el cambio climático en los países en desarrollo (UNDP 2007). La asignación de recursos y las restricciones a la inversión pueden también inducir a los responsables de las políticas a aplazar las decisiones políticas para hacer frente al cambio climático (CMNUCC 2007). El retraso puede impedir aprender y aumentar futuras vulnerabilidades. La tensión entre las prioridades a corto y largo plazo en los países de bajos ingresos se acentúa a menudo por la incertidumbre en la cultura política y las políticas reguladoras (IPCC 2014). Esto puede conducir a políticas que son defectuosas en el diseño y/o la implementación o aquellas que tienen consecuencias negativas no deseadas. Otros factores institucionales y de gobernanza impiden una gestión eficaz del riesgo de cambio climático en los países en desarrollo. Estos incluyen la falta de experiencia con el seguro (Patt et al. 2010), la escasez de datos y la capacidad analítica. Las limitaciones financieras sugieren la importancia de la asistencia internacional y la contribución del sector privado para implementar estrategias de adaptación y mitigación para enfrentar el cambio climático en los países en desarrollo (IPCC 2014).

Tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, los gobiernos, las organizaciones sociales y los individuos han intentado cambiar las actitudes culturales hacia las emisiones, el uso de la energía y los estilos de vida. Algunos han argumentado que el patrimonio biocultural de los pueblos indígenas es un recurso que debe ser

valorado y preservado, ya que constituye un paquete insustituible de enseñanzas sobre las prácticas de mitigación y sostenibilidad (Sheridan y Longboat 2006; Russell-Smith et al. 2009, Kronik y Verner 2010). A veces las estrategias e índices locales se han visto plasmadas en políticas nacionales, como el caso del Buen Vivir en Ecuador (Choquehuanca 2010; Gudynas 2011, IPCC 2014) y "Felicidad Nacional Bruta" (GNH), vista como un proceso dirigido a equilibrar los costos ambientales y sociales de un desarrollo económico sin control (Frame 2005; Taplin et al. 2013). En los países ricos y entre los grupos sociales con altos niveles de conciencia ambiental, el interés por la sostenibilidad ha dado lugar a movimientos culturales que promueven el cambio en los modos de pensamiento, producción y consumo. La inclusión de la dimensión cultural en las políticas de mitigación facilita la aceptación social (IPCC 2014).

3. Metodología del estudio

3.1 Área de estudio

Este Tesis se realizó en cinco Casos de Estudio: Ecuador (3), Perú (1), España (1). Para describir las áreas de estudio, desarrollamos un marco que nos permite organizar fácilmente conceptos similares bajo subtemas o componentes comunes. Nuestro marco para presentar la información base consta de cuatro componentes principales (Tabla 3.1), es decir, (1) ubicación geográfica y antecedentes climáticos, que incluye la zona agroecológica y fenómenos meteorológicos de la zona de estudio, (2) contexto socioeconómico de los sistemas de producción (3) políticas de cambio climático que se han implementado en la zona, y (4) las fuentes de datos de las que hemos obtenido la información.

Tabla 3.1. Criterios que describen los Casos de Estudio y fuentes de datos

Casos de estudio	Características de los sistemas de producción	Políticas de Cambio Climático ejecutadas	Fuentes de datos
Ecuador 1 (Carchi) 2700-3500 m.s.n.m. Temperatura promedio anual: 4-21°C Precipitación promedio anual: 1003 mm Tipo de suelos: andisoles	Sistema patata-pasto Nivel educación: primario Mano de obra familiar 78% Mano de obra contratada 22% Superficie patata (ha): $2,4 \pm 1,8$ Superficie pasto (ha): $7,7 \pm 6,0$ Rendimiento patata ($t \cdot ha^{-1}$): 14,4 Producción de leche ($l \cdot día^{-1}$): 12 Labranza mecanizada: 40% Labranza manual-animal: 60 % Explotaciones secano Destino del producto: Autoconsumo, semilla, comercialización Procesamiento primario del producto: Ninguno	Capacitaciones regionales a investigadores: - “Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la Región Andina, dentro del contexto del cambio climático”. Varios países participantes. Acciones nacionales: - Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura y del recurso hídrico en la región Andina de Ecuador.	40 encuestas presenciales Productores de Carchi Sierra ecuatoriana Agricultores dispersos: ± 5 km distancia
Ecuador 2 (Chimborazo) 2700-3800 m.s.n.m. Temperatura promedio anual: 6-18°C Precipitación promedio anual: 750 mm Tipo de suelos: andisoles	Sistema patata-pasto Nivel educación: primario Mano de obra familiar 80% Mano de obra contratada 20% Superficie patata (ha): $0,6 \pm 0,4$ Superficie pasto (ha): $2,8 \pm 2,4$ Rendimiento: $13,6 t \cdot ha^{-1}$ Producción de leche ($l \cdot día^{-1}$): 10 Labranza mecanizada: 40% Labranza manual-animal: 60 % Explotaciones secano Destino del producto: autoconsumo, semilla, comercialización Procesamiento primario del producto: Ninguno	Capacitaciones regionales a investigadores: - “Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la Región Andina, dentro del contexto del cambio climático”. Varios países participantes. Acciones nacionales: - Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura y del recurso hídrico en la región Andina de Ecuador.	40 encuestas presenciales Productores de Chimborazo Sierra ecuatoriana Agricultores dispersos: ± 5 km distancia

<p>Ecuador 3 (Cañar) 2700-3500 m.s.n.m. Temperatura promedio anual: 6-18°C Precipitación promedio anual: 467 mm Tipo de suelos: andisoles</p>	<p>Sistema patata-pasto Nivel educación: primario Mano de obra familiar 90% Mano de obra contratada 10% Superficie patata (ha): $0,7 \pm 0,5$ Superficie pasto (ha): $4,7 \pm 5,5$ Rendimiento patata ($t \cdot ha^{-1}$): 10,9 Producción de leche ($l \cdot día^{-1}$): 10 Labranza mecanizada: 40% Labranza manual-animal: 60 % Explotaciones secano Destino del producto: Autoconsumo, semilla, comercialización Procesamiento primario del producto: Ninguno</p>	<p>Capacitaciones regionales a investigadores: - “Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la Región Andina, dentro del contexto del cambio climático”. Varios países participantes. Acciones nacionales: - Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura y del recurso hídrico en la región Andina de Ecuador.</p>	<p>40 encuestas presenciales Productores de Cañar Sierra ecuatoriana Agricultores dispersos: ± 5 km distancia</p>
<p>Perú 4 2200-3800 m.s.n.m. Temperatura promedio anual: 4-21°C Precipitación promedio anual: 500- 2000 mm Tipo de suelos: andisoles</p>	<p>Sistema patata-pasto Nivel educación: primario Mano de obra familiar 90% Mano de obra contratada 10% Superficie patata (ha): $2,9 \pm 1,2$ Rendimiento patata ($t \cdot ha^{-1}$): 14,3 Labranza mecanizada: 50% Labranza manual-animal: 50 % Explotaciones secano Destino del producto: Autoconsumo, semilla, comercialización Procesamiento primario del producto: Ninguno</p>	<p>Capacitaciones regionales a investigadores: - “Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la Región Andina, dentro del contexto del cambio climático”. Varios países participantes. Acciones nacionales: - Análisis de la vulnerabilidad del sector agrícola al cambio climático estudiado el impacto del cambio climático en el cultivo de patata así como la priorización de medidas de adaptación</p>	<p>8 encuestas presenciales Productores de Puno y Cajamarca Sierra peruana Agricultores dispersos: ± 5 km distancia</p>
<p>España 5 660 m.s.n.m. Variación entre meses cálidos y fríos: 11-18°C Precipitación promedio anual: 1000 mm Tipo de suelos: Xerochrept y Ustochrept</p>	<p>Sistema intensivo patata Nivel educación: tercer nivel Mano de obra contratada 100% Superficie patata (ha): $3,9 \pm 1,4$ Rendimiento patata ($t \cdot ha^{-1}$): 24,3 Labranza mecanizada: 100% Explotaciones con riego tecnificado Destino del producto: comercialización Procesamiento primario del producto: Lavado, empaado bolsas 2,5 kg</p>	<p>Acciones dentro de la empresa UDAPA - Concienciación medioambiental en productores - Reciclaje de residuos - Manejo integrado en campo - Certificación del producto elaborado (2005) - Certificación ISO 14001 (2007) - Auditorías de eficiencia energética (2009) - Cambios y mejoras en instalaciones (2010) - Innovación y automatización de procesos (2012) - Cálculo de Huella de Carbono de organización (2013) Acciones nacionales: Compromiso de España con el Acuerdo de París y reducción de GEI</p>	<p>13 encuestas presenciales Productores de Álava. Comunidad Autónoma del País Vasco Agricultores asociados en Cooperativa UDAPA</p>

3.1.1 Localización geográfica y clima del área de estudio

La Figura 3.1 es una representación global de los Casos de Estudio en los que se ha realizado la investigación.

Figura 3.1. Mapa global del área de estudio

La región Andina de Ecuador y Perú tiene extremos climáticos y ecológicos con alturas que varían entre 2200 y 3800 metros sobre el nivel del mar, la temperatura oscila entre 4 y 21°C y la precipitación oscila entre 500 y 2000 milímetros por año. La patata-pasto es el sistema agropecuario clave en esta región (INIAP 2003). Los suelos de esta región son andisoles que se caracterizan principalmente por tener un alto contenido de materia orgánica (Buytaert et al. 2006; IUSS Working Group WRB 2014). En el caso de Perú, se contó con el apoyo del Centro Internacional de la Patata de Perú, quién se encargó de realizar 8 encuestas a productores de patata de la sierra peruana, correspondientes a las provincias de Puno y Cajamarca. En Ecuador, se realizaron un total de 120 encuestas a productores de Carchi, Chimborazo y Cañar, realizando 40 encuestas en cada caso (Figura 3.2)

Figura 3.2. Mapa ampliado de cada Caso de Estudio. A: España. B: Ecuador. C: Perú

La zona de Álava (España) tiene numerosos obstáculos montañosos que llegan a una altura de 660 metros sobre el nivel del mar. En la costa, las diferencias entre los meses más cálidos y los más fríos son de tan sólo unos 11°C o 12°C aproximadamente, mientras que en el interior aumentan sensiblemente, hasta llegar a ser de unos 17°C o 18°C. La mayor o menor pluviosidad viene definida no sólo por la cuantía de las precipitaciones sino también por su duración, produciéndose períodos de ausencia de éstas (sequías) o lluvias torrenciales. La precipitación promedio anual en Álava es de 1000 mm. Los suelos pertenecen a suelos del tipo Xerochrept y Ustochrept según la clasificación USDA-NRCS (Fernández 2011), caracterizados por tener bajo contenido de materia orgánica, lo cual hace necesario la aplicación de altas dosis de abonos químicos para compensar la falta de materia orgánica. Los datos fueron recopilados mediante 13 encuestas presenciales a productores de la provincia de Álava situada en la Comunidad Autónoma del País Vasco (Figura 3.2). Estos productores pertenecían a la Cooperativa UDAPA, que colaboró facilitando información adicional.

3.1.2 Contexto socioeconómico de los sistemas de producción

La tabla 3.1 resume las características socioeconómicas de Caso de Estudio. El sistema mixto patata-pasto presente en Ecuador y Perú es un sistema que consiste en el cultivo de patata durante dos o tres ciclos en suelos previamente ocupados por pastos durante aproximadamente dos años, completando un ciclo de tres a cuatro años (Paladines y Jacome, 1999, Proaño y Paladines, 1998). El pasto se utiliza para la alimentación del ganado y por lo tanto la producción de leche. Después de la patata, se puede plantar otro cultivo durante un solo ciclo para aprovechar el fertilizante residual; este otro cultivo no se considera en el estudio. Alrededor del 75% de la superficie cultivada no está irrigada (INEC 2016). Las pendientes pronunciadas (más del 20% de pendiente) impiden el uso de maquinaria agrícola, en su lugar se emplea labranza manual y tracción animal (Devaux et al. 2010; Pumisacho y Sherwood 2002), lo cual aumenta los costes de producción. Ocasionalmente contratan mano de obra ya que utilizan principalmente la mano de obra familiar. El rendimiento de patata en Ecuador varía entre 10 y 14 t·ha⁻¹. La producción de leche al día varía entre 10 y 12 litros. No se realiza lavado del producto y el destino de la producción es para autoconsumo, semilla y comercialización.

En España, el sistema de cultivo es intensivo solo patata. No existe mano de obra familiar, la labranza es mecanizada, la superficie media cultivada de patata es de 3,9 ±

1,4 ha. El rendimiento promedio llega a 24 t·ha⁻¹. El riego es tecnificado. Se realiza lavado y empacado en bolsas de 2,5 kg. El destino de la producción es consumo, industria o semilla.

3.1.3 Políticas de cambio climático ejecutadas en el ámbito del cultivo de patata

La tabla 3.1 resume las políticas de cambio climático que se han ejecutado en los últimos años en cada Caso de Estudio, específicamente en el cultivo de patata. En Ecuador, específicamente en el cultivo de patata y en la región andina, se han desarrollado algunas políticas de cambio climático. El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) desarrolló el proyecto “Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura y del recurso hídrico en la región Andina de Ecuador”. El objetivo de este estudio fue evaluar la vulnerabilidad al cambio climático del sector agrícola de 154 cantones ubicados en la región Andina de Ecuador e identificar algunas medidas de adaptación (CIAT 2014). También se ha generado modelos de predicción de cosechas del cultivo de patata, basados en metodologías espaciales y espectrales, con el fin de determinar la incidencia del cambio climático mediante tres escenarios en la producción del cultivo de patata como estrategia tecnológica para reducir la vulnerabilidad del sector agrícola al cambio climático (Rueda-Ayala et al. 2016).

En Perú se ha estudiado el impacto del cambio climático en el cultivo de patata así como la priorización de medidas de adaptación, en el marco del Proyecto de adaptación al impacto del retroceso acelerado de glaciares en los Andes tropicales (PRAA), con la finalidad de brindar una herramienta técnica útil para la planificación agrícola y la reducción de la vulnerabilidad ante un escenario de clima futuro (SENAMHI 2013)

En Ecuador y en Perú se han desarrollado programas regionales que conllevan al análisis de sistemas de producción animal y mediciones de GEI. En el proyecto “Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la Región Andina, dentro del contexto del cambio climático” han participado además otros países de América del Sur, entre ellos Chile, Colombia, Bolivia. (FONTAGRO 2017).

En España, las acciones en el cultivo de patata son ejecutadas de manera privada por las empresas productoras y comercializadoras. La empresa UDAPA con sede en la

Comunidad Autónoma del País Vasco se planteó los siguientes ejes de acción: generar una concienciación medioambiental en productores, y gestionar el reciclaje de residuos junto con un manejo integrado del cultivo. En el 2005, la empresa consiguió la Certificación del Producto Elaborado. En el 2007 la Certificación ISO 14001. En el 2009 se realizaron auditorías de eficiencia energética. Desde el 2010 al 2012 se generaron cambios y mejoras en las instalaciones además de la inserción de sistemas de innovación y automatización de procesos. Y finalmente en el año 2013 se realizó el cálculo de huella de carbono como organización (UDAPA 2013).

3.1.4 Fuentes de datos

La tabla 3.1 resume las fuentes de datos utilizadas en cada Caso de Estudio. En Ecuador se seleccionaron tres zonas, cada una con una localidad representativa. La selección se estableció en base a los siguientes criterios: a) la producción de patata y leche en la zona es importante para el ingreso familiar y la nutrición, b) la tecnología es importante para la sostenibilidad de la producción y c) los lugares seleccionados son representativos para la región. Se realizaron 40 encuestas a pequeños y medianos agricultores en cada zona que tengan una superficie promedio de 500 m² de producción, en cada provincia seleccionada (Anexo 1). La encuesta se centra en aspectos relacionados con la gestión de cultivos (rendimiento, área, cantidad de fertilizante, combustible para maquinaria agrícola). Se obtuvo información adicional de entrevistas cara a cara con el grupo de expertos del INIAP y CIP-Ecuador. Los datos secundarios se obtuvieron del Ministerio de Agricultura (MAGAP), del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y del Instituto Geográfico Militar (IGM) y contienen información sobre las características poblacionales, físicas, biológicas, socioeconómicas y agrometeorológicas (suelo-agua-planta-animal) de los lugares seleccionados.

La información a nivel de España fue recopilada mediante 13 encuestas presenciales a productores alaveses, realizadas en colaboración con la Cooperativa UDAPA (Anexo 1). Estos productores participaron voluntariamente en las encuestas, ya que la mencionada cooperativa estaba interesada en integrar la huella de carbono en las iniciativas voluntarias de reducción y compensación de emisiones de GEI de dicha organización.

En el caso de Perú, se contó con el apoyo del Centro Internacional de la Patata de Perú, quién se encargó de realizar las encuestas a 8 productores de patata de la sierra peruana, correspondientes a las provincias de Puno y Cajamarca. La superficie media cultivada es de $2,9 \pm 1,2$ ha. Se utilizó la misma plantilla de encuestas utilizada en Álava (España), con ciertas adecuaciones en las preguntas, debido a que la mayoría de las actividades agrícolas en Perú no están mecanizadas. Los encuestados fueron seleccionados al azar de un grupo de productores pertenecientes a un consorcio de productores de patata. En Perú, se cultiva patata en las regiones de la costa y de la sierra, pero el 95% se siembra en la sierra; razón por la cual se consideró únicamente los datos de esta zona.

3.2 Marco metodológico

3.2.1 Esquema metodológico

Este Tesis está estructurada en dos estudios consecutivos e interrelacionados (estudio I-II). La recopilación de datos, el grupo objetivo y las metodologías difieren de un capítulo a otro (Figura 3.3). Esto abarca las estrategias al cambio climático desde dos perspectivas: 1) Definición del modelo para la estimación de emisiones de GEI, estimación de emisiones en dos sistemas intensivos de patata y propuesta de prácticas agrícolas de mitigación a nivel local, y 2) Estudio de adaptación al cambio climático, estimación de emisiones de GEI en el sistema de producción patata-pasto y análisis coste-efectividad de las estrategias de adaptación/mitigación a nivel regional, representación de Curvas de Coste Marginal de Mitigación.

El Estudio I, cubre el objetivo de estimar las emisiones de GEI del cultivo de patata en dos países con tecnologías de producción diferentes, España y Perú. En el caso de España, se analizaron las posibles prácticas agrícolas que generarían una reducción de emisiones en el sistema a través de un análisis de sensibilidad. Este análisis permitió seleccionar los parámetros de entrada claves en el modelo y poder determinar los aspectos que mayor influencia tienen en las emisiones. El análisis del coste económico de dichas medidas de mitigación también formó parte de este capítulo. Por último, en esta sección se comparan las estrategias de mitigación en función del potencial de reducción de gases y del ahorro en términos económicos (Figura 3.3).

Figura 3.3. Resumen del contenido de los dos Estudios que integran la Tesis

En el Estudio II se analizan las medidas de adaptación que pueden ser implementadas por los agricultores del sistema patata-pasto en la Región Andina. Algunas de estas estrategias pueden cumplir simultáneamente funciones en el contexto de adaptación y de mitigación. En este capítulo también se realizó una estimación de emisiones generadas en el cultivo de patata y en la producción de leche. Se definieron medidas aplicables en cada región agro-climática a través de una selección efectuada por un grupo de investigadores con experiencia en el sistema patata-pasto. Finalmente se realizó una propuesta de acciones que contribuirían a la adaptación-mitigación del cambio climático en la región a través del análisis de coste-efectividad. Este análisis comprende la comparación del efecto marginal de reducción de emisiones en las estrategias planteadas (Figura 3.3).

3.2.2 Diseño y datos de muestreo

La recopilación de datos para este estudio se realizó en dos períodos. El primer período fue de septiembre de 2014 a enero de 2015, el segundo período fue de diciembre de 2015 a marzo de 2016, y el tercer período fue desde noviembre de 2016 a enero de 2017. Se utilizó una amplia gama de enfoques para recolectar los datos. Estos enfoques incluyen datos de agricultores, discusiones con grupo de expertos y bases de datos públicas.

Datos de agricultores

Los datos de agricultores fueron obtenidos de: (1) encuesta para productores de patata en España y Perú (Anexo 1), y (2) encuesta de hogares productores de patata en la Región Andina (Anexo 2). La muestra de los datos de los hogares del estudio I consistió 8 productores de Perú y 13 productores de España. Las encuestas fueron realizadas con la finalidad de obtener información necesaria para insertar en el modelo que estima las emisiones de GEI. En el estudio II, 120 productores del sistema mixto patata-pasto fueron encuestados (40 encuestas en cada caso de estudio). Estas encuestas fueron realizadas en las provincias antes mencionadas. La distancia entre un productor y otro, aproximadamente era de 5 km, a ser recorridos por cada encuestador. Fue necesario ser meticulosos al momento de realizar las preguntas, para mantener la confianza entre el productor y el entrevistador, puesto que los productores temen que la información sea utilizada para el cobro de impuestos.

Discusiones con grupo de expertos

La definición de las posibles opciones de medidas de mitigación adaptadas a la realidad de los sistemas agropecuarios; fue realizado a través de discusiones con grupo de expertos que incluyen técnicos de todos los sectores. Los miembros del grupo de expertos regionales fueron seleccionados en base a diferentes criterios tales como: (1) el experto debe ser investigador; (2) el experto debe haber trabajado en cuestiones relacionadas con la mitigación de gases de efecto invernadero en la agricultura durante al menos cinco años; (3) el experto debe mantener contacto regular con los agricultores, y (4) el experto debe tener un amplio conocimiento en pasturas y patata para determinar si las medidas de adaptación-mitigación son aplicables. El objetivo de las discusiones de grupos de expertos era depurar una lista de medidas aplicables a nivel mundial y generar

una nueva lista en la que consten aquellas estrategias que tengan mayor tasa potencial de mitigación específica para la región y sistema de cultivo, y que a su vez tengan menos barreras de implementación. Las encuestas y las discusiones entre expertos representaron el enfoque participativo de la metodología.

Bases de datos públicas

En el caso de España se utilizó la base de datos del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) para obtener información referente a la producción nacional del cultivo de patata, la superficie cultivada y el manejo del cultivo. La información referente a la características agrometeorológicas en Álava (País Vasco-España) correspondiente a los meses que duró el ciclo del cultivo fue tomada de la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET 2012).

En el caso de Ecuador se utilizaron bases de datos públicas del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y del Instituto Geográfico Militar (IGM) que proporcionaron información sobre producción nacional, características poblacionales, físicas, biológicas, socioeconómicas y agrometeorológicas (suelo-agua-planta-animal) de los lugares seleccionados.

3.2.3 Métodos analíticos

Análisis descriptivo

Este estudio combina análisis cualitativo y cuantitativo. La descripción de los contextos, la caracterización y las narrativas de los datos cualitativos fue uno de los métodos cualitativos utilizados repetidamente en este estudio. Además de las narrativas cualitativas, se utilizó el análisis estadístico, como la media y la desviación estándar. Estos resultados analíticos se presentaron en cifras o diagramas absolutos.

Modelo de estimación de emisiones de GEI

Para cuantificar las emisiones de CO₂e, se introdujeron los datos procedentes de cada encuesta en el programa de cálculo de la huella de carbono, Cool Farm Tool (CFT). El programa presenta siete secciones de entrada en relación con: la información general (lugar, año, producto, zona de producción, clima), manejo del

cultivo (operaciones agrícolas, protección de cultivos, uso de fertilizantes, gestión de residuos), secuestro de carbono (uso y gestión del suelo, biomasa vegetal), ganadería (opciones de alimentación, fermentación entérica, excreción de N, gestión del estiércol), uso de energía (riego, maquinaria agrícola), procesamiento primario (fábrica, almacenes), transporte (carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo). Los datos de salida que genera el programa corresponden a las emisiones de CO₂e desde la plantación hasta la cosecha en función de tres criterios: por área cultivada (hectárea), por unidad de producto (tonelada) y según las prácticas agrarias tales como producción de semilla, producción de fertilizante, antecedentes de óxido nitroso en suelo, emisiones inducidas por uso de fertilizante en campo, emisiones por uso de pesticidas, uso de energía, transporte interno en finca, manejo de residuos de cosecha (Haverkort y Hillier 2011).

El programa considera las emisiones dentro del Ciclo de Vida del cultivo, contemplándose únicamente la fase de producción, excluyéndose la fase de procesamiento del producto, almacenamiento, cadena de distribución y comercialización fuera de finca.

CFT calcula las emisiones de GEI procedentes de diferentes fuentes utilizando los índices de conversión de modelos previamente publicados. En el caso de la producción y distribución de fertilizantes utiliza la base de datos Ecoinvent (Ecoinvent 2007). Para las emisiones de óxido nitroso (N₂O) relacionados con la aplicación de fertilizantes, utiliza el modelo empírico multivariante de Bouwman et al. (2002) que considera el tipo de fertilizante, frecuencia de aplicación, clima y características físico-químicas del suelo. Las emisiones de NO y de NH₃ son calculadas según el modelo de la FAO/IFA (2001) y convertidas a N₂O a través de factores de conversión que figuran en el IPCC (2006). También se utilizan factores de conversión para el cálculo de la lixiviación y de las emisiones de CO₂ como consecuencia de la aplicación de urea o encalado. Las emisiones procedentes del suelo se calculan introduciendo datos climáticos, características del suelo, prácticas de labranza y manejo de residuos de cosecha. Los efectos de la adición de materia orgánica sobre las existencias del C del suelo se derivan de los datos de Smith et al. (1997). Las emisiones debido al uso directo de energía (gasolina, diesel, electricidad) para las operaciones de campo y el procesamiento primario, se han calculado a partir de las normas técnicas de ASABE (ASABE 2006). Las emisiones debido al uso de la electricidad de cada país se basan en

el protocolo de GEI por sector y se emplean factores de conversión del GHG Protocol (2003).

El programa CFT modeliza las emisiones de GEI en base, entre otros, a parámetros climáticos (temperatura media) y a las propiedades físico-químicas del suelo introducidas por el usuario. Por lo tanto el modelo permite personalizar los cálculos para cada explotación. En caso de que se desconozca los datos climáticos, el programa ofrece la opción de elegir valores estándares en función de la localización geográfica, a nivel del país. Este aspecto afecta las emisiones de los fertilizantes y la gestión de carbono del suelo (enmiendas orgánicas, labranza, cultivos de cobertura). Además, el programa considera aspectos propios de cada zona: textura del suelo, contenido de materia orgánica, humedad del suelo, buen o mal drenaje, pH del suelo. En el caso de las emisiones producidas por las fábricas de fertilizantes, se considera que las plantas de producción que datan de la década de los años 2000 utilizan tecnologías antiguas y en el caso de aquellas que son posteriores al 2006, se estima que emplean tecnologías modernas de reducción de las emisiones de N₂O.

El programa CFT ha sido probado mediante una evaluación comparativa de cuatro sistemas de producción de patata en Países Bajos (Haverkort y Hillier 2011). Los resultados obtenidos han sido comparados satisfactoriamente, utilizando otras metodologías de cálculo de las emisiones de GEI (Hillier et al. 2011 a, b). También se han realizado referencias cruzadas con otros cultivos como el trigo o la colza, observándose mínimas variaciones (J.G Hillier, datos no publicados). Recientemente se ha publicado un estudio comparativo entre 11 programas de cálculo de la emisión de GEI aplicados a la agricultura en donde la evaluación multi-criterio ha permitido clasificar el programa Cool Farm Tool en primera posición (Whittaker et al. 2013).

Una de las limitaciones del programa CFT es que no es un modelo dinámico que permita calcular la respuesta del rendimiento al modificar alguno de los parámetros de cultivo como puede ser la fertilización, la dosis de riego o el laboreo del suelo. Por lo tanto, para obtener el análisis de sensibilidad referente a los abonos nitrogenados, fue necesario establecer la variación del rendimiento según la dosis de nitrógeno aplicada al cultivo.

Análisis de sensibilidad del programa Cool Farm Tool

Se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de seleccionar los parámetros de entrada claves en el modelo, y poder determinar los aspectos que mayor influencia tienen en las emisiones de CO₂. El análisis de sensibilidad, la evaluación y propuesta de medidas se realizó únicamente para el Caso de Estudio en España.

Modelo de optimización económica

El modelo de análisis utilizado en esta Tesis fue un modelo de optimización económica, específicamente se utilizó el modelo de maximización del margen neto. El software de programación lineal LINDO (LINDO Systems 2003) fue utilizado para maximizar los ingresos.

Los costes de producción que se presentan cuando se implementan nuevas prácticas agrícolas son estimados mediante el modelo de maximización del margen neto y a su vez, son comparados con los costes de producción en el escenario base. El modelo de optimización está basado en un modelo de programación lineal validado para sistemas mixtos patata-pasto en Ecuador (Rueda 2002; Zarate 2002). El modelo define el plan de producción que optimiza el uso de los recursos para lograr la maximización del margen neto bajo sus propias restricciones y recursos disponibles (Anexos 3.1, 3.2 y 3.3). Los detalles y especificaciones del modelo se presentan en los capítulos específicos.

Existe una riqueza de información ingresada en el modelo de optimización. Dicha información se refiere a: rendimiento de patata, superficie de patata cultivada, cantidad utilizada para autoconsumo, cantidad de semilla de patata y pasto, fertilizantes empleados, fungicidas, insecticidas, horas de tractor contratado, superficie de pasto, número de terneros, número de vacas, cantidad de leche para autoconsumo, número de horas de mano de obra contratada y número de horas de mano de obra familiar empleada para producción de patata y pasto. El manejo de este tipo de datos fue realizado de manera sistematizada a través de las encuestas a productores de patata.

Curvas de Coste Marginal de Mitigación

La representación gráfica del análisis de coste-efectividad fue a través de las curvas de coste marginal de mitigación (MACC por sus siglas en inglés, Marginal Abatement

Cost Curves). Se realizó el análisis coste-efectividad para definir las mejores prácticas agrícolas en función de su potencial de mitigación y sus costes (Anexo 4).

El coste-efectividad de las medidas de mitigación está relacionado con la efectividad de las medidas para reducir la intensidad de las emisiones de la agricultura y a su vez mantener o aumentar la producción, lo cual reduciría los costes de la implementación de dichas prácticas agrícolas (MacLeod et al. 2015). En otras palabras, el análisis coste-efectividad contempla un beneficio económico observado en los costes marginales y un beneficio medioambiental en función de las toneladas de CO₂ reducidas por aplicar estas prácticas.

Una MACC demuestra la relación entre la rentabilidad de las opciones de mitigación seleccionadas y la cantidad total de gases de efecto invernadero reducidos. Algunas medidas tienen la capacidad de reducir emisiones y ahorrar dinero (costes negativos), siendo las opciones más eficientes y que se pagan por sí mismas; estas medidas se muestran debajo del eje “x” en las MACC. Otras medidas pueden mitigar más emisiones, pero incurren en costes positivos, ya que son opciones menos eficientes por tener un coste positivo para su implementación. Estas opciones se representan por encima del eje x en las MAAC.

4. Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata

4.1 Introducción

El cambio climático y sus efectos medioambientales adversos son una preocupación para la sostenibilidad del planeta y para la producción de alimentos en el futuro (IPCC 2013; Iglesias et al. 2011). En 2010, se estima que la agricultura representa la tercera actividad económica responsable de las emisiones de GEI con una producción anual de 4,6 Gt CO₂e, lo que equivale al 14% de las emisiones mundiales (FAOSTAT 2013). Los principales factores contribuyentes a las emisiones de GEI en la agricultura proceden de la transformación, mediante diversos procesos biológicos y físico-químicos presentes en el suelo, de los insumos de fertilizantes inorgánicos y de la materia orgánica (estiércol, compost, residuos vegetales) (Dyer et al. 2010). Estos procesos conllevan la producción de los tres principales GEI procedentes de la agricultura: N₂O, CO₂ y CH₄.

Desde 1992 se han venido evaluando las posibles soluciones al problema del calentamiento global. La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático firmada por 154 países, incluidos España y Perú, implica un compromiso, principalmente por parte de los países industrializados, para disminuir las emisiones de CO₂. El Compromiso firmado establece que cada país debe elaborar, actualizar y publicar inventarios nacionales de las emisiones antropógenas; además de formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas orientadas a la mitigación y adaptación al cambio climático (CMNUCC, 1992).

A partir de la firma de varios convenios de índole ambiental entre países, en 1997 se firmó el Protocolo de Kyoto que entró en vigencia en el 2005. A través de este instrumento los países signatarios acordaron una reducción voluntaria de las emisiones netas de GEI durante el período 2008-2012 hasta alcanzar un nivel equivalente a las emisiones de 1990. Esto dio origen al mercado de carbono, que estableció unidades de emisión para todos los países, de manera que los países que acrediten secuestro de carbono pueden vender a los países emisores parte del excedente en sus unidades de

emisión. La existencia de un mercado de carbono crea, dentro de cada país, la necesidad de cuantificar las emisiones de distintos productos y procesos productivos en empresas agropecuarias e industriales (Viglizzo 2010).

Al mismo tiempo, existe un número creciente de consumidores que están cada vez más interesados, no solamente en el precio y la calidad de los alimentos, sino también en su procedencia y en las técnicas de producción y de elaboración. Esto es especialmente relevante en los países más ricos, pero el número de consumidores con una preocupación ambiental crece en todos los países. El hecho que el consumidor se interese cada vez más por el origen de sus compras promueve que las compañías y los gobiernos también lo estén, lo cual crea oportunidades para aquellos que están tratando de vender productos más limpios o de implementar políticas ambientales.

En consecuencia, se prevé que en un futuro próximo, los productos agrícolas podrán ser valorados sobre la base de su huella de carbono, con la obligatoria eco-etiqueta de sus emisiones. Por lo tanto, los responsables políticos, el público en general, y los productores, desean urgentemente disponer del conocimiento necesario para mejorar las prácticas agrícolas con el fin de producir alimentos de alta calidad con la mínima huella de carbono (Gan et al. 2012).

La huella de carbono es el parámetro que cuantifica las emisiones de GEI, expresada en equivalentes de CO₂, derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Espíndola y Valderrama 2012). Comprende todas las actividades o eslabones de un proceso que describe el ciclo de vida de un producto, desde las materias primas utilizadas hasta el desecho final como residuo. De esta manera, el consumidor puede tener una idea del potencial de contaminación ambiental de los productos que consume (Viglizzo 2010).

La huella de carbono, siendo una expresión cuantitativa de las emisiones de GEI de una actividad, ayuda en la gestión de las emisiones y en la evaluación de las medidas de mitigación. La estimación de las emisiones y la identificación de sus principales fuentes, generan un impacto positivo en el medio ambiente, en la reducción de costes, y en la rentabilidad de las empresas. Esto puede ayudar a aumentar las ventas, mejorar su marca corporativa e identificar ahorros de costes y oportunidades de desarrollo de productos.

Las Curvas de Costes Marginales de Mitigación se han convertido recientemente en una herramienta política estándar en la evaluación de los aspectos económicos de las alternativas de mitigación del cambio climático, ya que representan la rentabilidad de la reducción de emisiones de una manera sencilla (Kesicki y Strachan 2011). Ciertas medidas pueden adoptar un costo unitario más bajo que otras, y en algunos casos, los agricultores podrían implementar medidas que a la vez podrían ahorrar dinero y reducir emisiones (Moran et al. 2011). Las curvas MACC son útiles como una herramienta para ilustrar el potencial de reducción de emisiones (variación de emisiones reducidas, emisiones con signo negativo) y los costes asociados a la mitigación del cambio climático, en un determinado punto en el tiempo.

La literatura muestra varios intentos de estimar el coste-efectividad de las diferentes opciones de mitigación. En países como Reino Unido e Irlanda (Moran et al. 2011, Macleod et al. 2010, Schulte y Donnellan. 2012) se han realizado investigaciones utilizando la metodología MACC enfocada al sector agricultura, uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Los gobiernos de varios países, están comprometidos con metas ambiciosas de reducción de emisiones de GEI mediante el análisis de costo – efectividad (Macleod et al. 2010).

Estas investigaciones utilizan un enfoque bottom-up para estimar la rentabilidad y la reducción potencial de una amplia gama de medidas posibles y eficaces, proyectando escenarios de mitigación para años futuros (Moran et al. 2011). Según Wreford et al. (2010) es posible identificar áreas de investigación y búsqueda de políticas relevantes para la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) en relación con la promoción de la economía del cambio climático en la agricultura; una de esas áreas es el modelado de costos marginales de mitigación.

Wreford et al. (2010) menciona que el enfoque bottom-up es el más ilustrativo de todos los métodos para determinar potenciales de mitigación dentro del presupuesto agrícola. Existen muy pocos estudios utilizando la metodología bottom-up, por lo cual se resalta la necesidad de este tipo de estudios.

Inevitablemente, mientras las emisiones agrícolas se encuentren bajo creciente escrutinio regulatorio, este potencial global tiene que orientarse a cada país o como

información para cada productor sobre cómo las reducciones pueden caber dentro de un presupuesto económicamente eficiente. (Wreford et al. 2010)

En este contexto, se planteó estimar la huella de carbono de dos sistemas de producción de patata, uno de los principales cultivos a nivel mundial, en dos países: España y Perú, utilizando el programa Cool Farm Tool (Haverkort y Hillier 2011). Se eligieron estos dos países por presentar sistemas agrarios muy contrastados con los siguientes fines: observar los posibles efectos de estos sistemas en las emisiones de GEI y evaluar la adecuación del programa CFT para el cálculo de las emisiones de sistemas agrarios tradicionales que no han integrado tecnologías modernas de producción.

Además, en el caso del cultivo en España, se evaluaron las posibles medidas de mitigación mediante un análisis económico en el que se valoró el potencial de mitigación de dichas medidas y sus costes económicos. No tenemos conocimiento de una evaluación similar de la gama de tecnologías existentes en cuestión de curvas MAC. La metodología utilizada en nuestro trabajo radica en la búsqueda de medidas de mitigación dirigida a una explotación y cultivo en particular, en este caso la patata. Consideramos que las conclusiones de esta investigación servirán a los productores de patata como una herramienta valiosa para la implementación de los cambios en la producción con el fin de reducir las emisiones de GEI.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Ámbito geográfico

Se recopiló y analizó la información procedente de sistemas de producción de patata (*Solanum tuberosum* L.), en dos países: España y Perú.

Siendo históricamente el centro de origen de la patata, Perú representa tan solo el 1.23% de la producción mundial y España aporta con el 0.59%. El área cosechada de patata en España corresponde al 0,38% y Perú representa el 1,63% del área cosechada mundial de patata (FAOSTAT 2013).

El cultivo de patata constituye una de las principales fuentes de trabajo e ingresos en la región rural andina y no sólo constituye un alimento básico para países andinos,

también forma parte del sistema productivo tradicional del pequeño y mediano productor (Devaux et al. 2010).

En cuanto al rendimiento de ambos países para el año 2012, Perú presentó un rendimiento equivalente a $14,3 \text{ t ha}^{-1}$ y España a $24,3 \text{ t ha}^{-1}$. El rendimiento medio de las explotaciones peruanas estudiadas se situó netamente por debajo del promedio mundial equivalente a $18,9 \text{ t ha}^{-1}$ en el año 2012 (FAOSTAT 2013). Existen muchas razones agronómicas, climáticas, socio-económicas e institucionales que explican dicha situación. La producción primaria de este país andino se caracteriza por una gran dispersión de áreas cultivadas y una gran variabilidad de tecnologías usadas y de productividad (Devaux et al. 2010).

Los agricultores que poseen pequeñas explotaciones, destinan una parte de su producción al autoconsumo y para semilla, y otra parte la venden a los mayoristas o en mercados regionales. Los productores con superficies medianas y grandes, destinan casi toda su producción a la comercialización. En estas explotaciones el riego es tecnificado y se realiza mediante goteo o gravedad, mientras que en las pequeñas explotaciones se cultiva bajo secano. (Devaux et al. 2010).

El cultivo de patata en España es intensivo y por lo tanto mecanizado, presenta una gran variedad de tipologías de explotaciones en las cuales los agricultores se encargan de sembrar, cultivar, recoger el producto y ponerlo a disposición de la comercialización en origen, la mayor parte de la producción se destina a la comercialización (MARM. 2010).

4.2.2 Recolección de datos

La información a nivel de España fue recopilada mediante 13 encuestas (Anexo 1) presenciales a productores alaveses realizadas en colaboración con la Cooperativa UDAPA. Estos productores participaron voluntariamente en las encuestas, ya que la mencionada cooperativa estaba interesada en integrar la huella de C en las iniciativas voluntarias de reducción y compensación de emisiones de GEI en dicha organización. La superficie media cultivada por los encuestados fue de $3,9 \pm 1,4 \text{ ha}$. La totalidad de la superficie implicada en las encuestas fue de $50,9 \text{ ha}$ lo que representa aproximadamente

el 4% de toda la superficie dedicada al cultivo de la patata en Álava, cual sea su destino: consumo, industria o semilla (Eustat 2012).

En el caso de Perú, se contó con el apoyo del Centro Internacional de la Patata de Perú, quién se encargó de realizar las encuestas a 8 productores de patata de la sierra peruana, correspondientes a las provincias de Puno y Cajamarca. La superficie media cultivada por los encuestados fue de $2,9 \pm 1,2$ ha. La totalidad de la superficie implicada en las encuestas fue de 100 ha lo que representa aproximadamente el 0,13% de toda la superficie dedicada al cultivo de la patata en Puno y Cajamarca, según información obtenida del Ministerio Agricultura y Riego de Perú (2011). Se utilizó la misma plantilla de encuestas utilizada en Álava (España), con ciertas adecuaciones en las preguntas, debido a que la mayoría de las actividades agrícolas en Perú no están mecanizadas. Los encuestados fueron seleccionados al azar de un grupo de productores pertenecientes a un consorcio de productores de patata. En Perú, se cultiva patata en las regiones de la costa y de la sierra, pero el 95% se siembra en la sierra; razón por la cual se consideró únicamente los datos de esta zona.

Para los dos países se realizaron las estimaciones de las emisiones de GEI para cada explotación y se presentan los datos medios con sus desviaciones.

Caracterización de los sistemas de cultivo

Se caracterizaron los sistemas de cultivo de patata en España y Perú en base a las encuestas presenciales y datos bibliográficos. La tabla 4.1 recopila los valores medios de cada parámetro de entrada que el programa CFT tiene en cuenta para el cálculo de la huella de C.

Las diferencias más notables entre ellos se refieren al rendimiento, los sistemas de laboreo y fertilización, los sistemas de riego y el transporte. El rendimiento de patata en España es relativamente superior al de Perú, lo cual posiblemente se deba por diferencia de variedades o manejo del cultivo. Las actividades de laboreo del suelo de las explotaciones peruanas que han participado en este estudio se realizaron de manera manual y mediante tracción animal.

El riego en Perú fue realizado por gravedad, no se utilizaron sistemas de riego como en España, y muchos productores emplean únicamente lluvia estacional. La utilización de

fitosanitarios para el control de las plagas es superior en España. Finalmente, la distancia entre los almacenes y las parcelas en Perú es menor a 200 metros, mientras que en España la distancia media equivale a 2,9 km, lo cual genera mayores emisiones por transporte interno.

Tabla 4.1. Caracterización de sistemas de producción de patata en España y Perú
N: número de réplicas, X: media, D.E.: desviación estándar.

Parámetro	España			Perú		
	N	X	D.E.	N	X	D.E.
Rendimiento ($t \cdot ha^{-1}$)						
Producto cosechado	13	39,06	4,84	8	33,67	3,62
Producto comercializado	13	38,34	4,74	8	32,86	3,81
Tipo de suelos						
Textura de suelo	13	Media	0	8	Media	0
Materia orgánica del suelo (%)	13	1,56	0,54	8	1,5	0,36
pH	13	> 8,5	0,15	8	5,5 a 7,4	0,26
Abonado mineral ($kg \cdot ha^{-1}$) y riego (mm)						
N	13	183,34	49,07	8	100,75	8,53
P ₂ O ₅	13	144	34,46	8	110	8,64
K ₂ O	13	227	35,3	8	90,5	9,94
Riego	13	275,65	36,81	8	No calculado	0
Fitosanitarios						
Número de tratamientos	13	8	0,66	8	2	0,63
Combustible ($l \cdot ha^{-1}$ gasoil) y transporte						
Arado vertedera	13	30,7	10,61	8	10	0
Arado chisel	11	17,8	7,48	7	10	0
Acaballador	12	96,9	30,54	6	Animal	0
Sembradora	13	20,1	10,38	8	Manual	0
Pulverización herbicida	13	4,8	8,24	8	Manual	0
Pulverización fertilizante	13	4,6	5,14	8	Manual	0
Pulverización fungicida	13	4,8	9,62	8	Manual	0
Cosechadora	13	89,3	34,31	8	Manual	0
Quema de matas	13	4,8	2,85	8	No	0
Distancia de transporte agrícola (km)	12	2,9	2,99	8	< 0,2	66,45

4.2.3 Determinación de las emisiones de GEI

Para cuantificar las emisiones de CO₂e, se introdujeron los datos procedentes de cada encuesta en el programa de cálculo de la huella de carbono Cool Farm Tool (CFT). El programa presenta siete secciones de entrada en relación con: la información general (lugar, año, producto, zona de producción, clima), manejo del cultivo (operaciones agrícolas, protección de cultivos, uso de fertilizantes, gestión de residuos), secuestro de carbono (uso y gestión del suelo, biomasa vegetal), ganadería (opciones de alimentación, fermentación entérica, excreción de N, gestión del estiércol), uso de energía (riego, maquinaria agrícola), procesamiento primario (fábrica, almacenes), transporte (carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo). Los datos de salida que genera el programa corresponden a las emisiones de CO₂e desde la plantación hasta la

cosecha en función de tres criterios: por área cultivada (hectárea), por unidad de producto (tonelada) y según las prácticas agrarias tales como producción de semilla, producción de fertilizante, antecedentes de óxido nitroso en suelo, emisiones inducidas por uso de fertilizante en campo, emisiones por uso de pesticidas, uso de energía, transporte interno en finca, manejo de residuos de cosecha (Haverkort y Hillier 2011).

Se han considerado las emisiones dentro del Ciclo de Vida del cultivo, contemplándose únicamente la fase de producción, excluyéndose la fase de procesamiento del producto, almacenamiento, cadena de distribución y comercialización fuera de finca (Moran et al. 2011).

El programa CFT calcula las emisiones de GEI procedentes de diferentes fuentes utilizando los índices de conversión de modelos previamente publicados. En el caso de la producción y distribución de fertilizantes utiliza la base de datos Ecoinvent (Ecoinvent 2007). Para las emisiones de óxido nitroso (N₂O) relacionados con la aplicación de fertilizantes, utiliza el modelo empírico multivariante de Bouwman et al. (2002) que considera el tipo de fertilizante, frecuencia de aplicación, clima y características físico-químicas del suelo. Las emisiones de NO y de NH₃ son calculadas según el modelo de la FAO/IFA (2001) y convertidas a N₂O a través de factores de conversión que figuran en el IPCC (2006). También se utilizan factores de conversión para el cálculo de la lixiviación y de las emisiones de CO₂ como consecuencia de la aplicación de urea o encalado. Las emisiones procedentes del suelo se calculan introduciendo datos climáticos, características del suelo, prácticas de labranza y manejo de residuos de cosecha. Los efectos de la adición de materia orgánica sobre las existencias del C del suelo se derivan de los datos de Smith et al. (1997). Las emisiones debido al uso directo de energía (gasolina, diesel, electricidad) para las operaciones de campo y el procesamiento primario, se han calculado a partir de las normas técnicas de ASABE (ASABE 2006). Las emisiones debido al uso de la electricidad de cada país se basan en el protocolo de GEI por sector y se emplean factores de conversión del GHG Protocol (2003).

El programa CFT modeliza las emisiones de GEI en base, entre otros, a parámetros climáticos (temperatura media) y a las propiedades físico-químicas del suelo introducidas por el usuario. Por lo tanto el modelo permite personalizar los cálculos para cada explotación. En caso de que se desconozca los datos climáticos, el programa

ofrece la opción de elegir valores estándares en función de la localización geográfica, a nivel del país. Este aspecto afecta las emisiones de los fertilizantes y la gestión de carbono del suelo (enmiendas orgánicas, labranza, cultivos de cobertura). Además, el programa considera aspectos propios de cada zona: textura del suelo, contenido de materia orgánica, humedad del suelo, buen o mal drenaje, pH del suelo. En el caso de las emisiones producidas por las fábricas de fertilizantes, se considera que las plantas de producción que datan de la década de los años 2000 utilizan tecnologías antiguas y en el caso de aquellas que son posteriores al 2006, se estima que emplean tecnologías modernas de reducción de las emisiones de N₂O.

El programa CFT ha sido probado mediante una evaluación comparativa de cuatro sistemas de producción de patata en Países Bajos (Haverkort y Hillier 2011). Los resultados obtenidos han sido comparados satisfactoriamente, utilizando otras metodologías de cálculo de las emisiones de GEI (Hillier et al. 2011 a, b). También se han realizado referencias cruzadas con otros cultivos como el trigo o la colza, observándose mínimas variaciones (J.G Hillier, datos no publicados). Recientemente se ha publicado un estudio comparativo entre 11 programas de cálculo de la emisión de GEI aplicados a la agricultura en donde la evaluación multi-criterio ha permitido clasificar el programa Cool Farm Tool en primera posición (Whittaker et al. 2013).

4.2.4 Análisis de sensibilidad del programa Cool Farm Tool

Se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de seleccionar los parámetros de entrada claves en el modelo, y poder determinar los aspectos que mayor influencia tienen en las emisiones de CO₂. El análisis de sensibilidad, la evaluación y propuesta de medidas se realizó únicamente para el Caso de Estudio en España.

Una de las limitaciones del programa CFT es que no es un modelo dinámico que permita calcular la respuesta del rendimiento al modificar alguno de los parámetros de cultivo como puede ser la fertilización, la dosis de riego o el laboreo del suelo. Por lo tanto, para obtener el análisis de sensibilidad referente a los abonos nitrogenados, fue necesario establecer la variación del rendimiento según la dosis de nitrógeno aplicada al cultivo. La función de rendimiento (ecuación 1) se obtuvo mediante interpolaciones realizadas a los resultados presentados por Love et al. (2005).

$$y = -0,1817x^2 + 91,354x + 25557 \quad (R^2 = 0,9998) \quad [1]$$

Donde:

Y, rendimiento del cultivo de patata ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

X, dosis de nitrógeno aplicado en el ciclo del cultivo ($\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Para obtener el análisis de sensibilidad del factor riego, se utilizó el modelo de Córcoles et al. (2012) que simula la variación del rendimiento según la dosis de agua aplicada al cultivo según la ecuación 2.

$$Y = -0,2377 X^2 + 350,87 X - 57514 \quad (R^2 = 0.6107) \quad [2]$$

Donde:

Y, rendimiento del cultivo de patata ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

X, dosis de riego aplicado en el ciclo del cultivo incluyendo la precipitación efectiva (mm).

La información referente a la precipitación en Álava (País Vasco-España) correspondiente a los meses que dura el ciclo del cultivo fue tomada de la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET 2012). Los datos han sido recopilados desde el año 1971 al 2000, se utilizó la información proporcionada por la estación meteorológica Foronda-Txokiza.

Para obtener la precipitación efectiva (P_{eff}), que es el agua procedente de la lluvia que realmente puede ser aprovechada por la planta, se han seguido las fórmulas propuestas por Brouwer y Heibloem (1986), en función de la precipitación mensual (p, mm/mes).

$$P_{\text{eff}} (\text{mm/mes}) = 0,8 \times p - 25, \text{ si } p > 75 \text{ mm/mes} \quad [3]$$

$$P_{\text{eff}} (\text{mm/mes}) = 0,6 \times p - 10, \text{ si } p < 75 \text{ mm/mes} \quad [4]$$

Con la información de precipitación media y precipitación efectiva en los meses correspondientes al ciclo del cultivo, se calculó la dosis promedio de agua que recibe el cultivo y el rendimiento esperado.

Se reconoce que ambos factores, dosis de nitrógeno ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) y dosis de riego (mm) aplicados en el ciclo del cultivo, podrían estar en la misma función. Ferreira, T. y Goncalves, D. (2007) indican que una función de rendimiento conjunta puede ser muy útil para determinar una estrategia de manejo agrícola óptimo bajo las condiciones locales dadas, pero debe ser complementada con datos históricos de precipitación regional y evapotranspiración permitiendo la predicción del rendimiento año a año.

Puesto que la presente investigación se realizó en un solo punto en el tiempo, se consideraron las funciones de rendimiento para riego y fertilización nitrogenada, de forma separada.

4.2.5 Curvas de Coste Marginal de Mitigación

Se realizó un análisis MACC, con la finalidad de determinar el potencial de reducción de las emisiones de GEI y los costes de mitigación asociados a estas propuestas.

Una curva MACC indica el coste estimado (euros por tonelada de CO_2), asociado con el coste marginal de la reducción de emisiones (generalmente, en millones de toneladas de CO_2). Por lo tanto, en un gráfico se contrasta el coste marginal de reducción en el eje 'y', y el nivel de reducción de las emisiones en el eje 'x' (Kesicki y Strachan 2011).

Las dosis aplicadas de fertilizante y riego por los productores de España permitieron obtener las emisiones generadas (escenarios base). Se denominó 'dosis promedio total' a la dosis promedio de fertilizante ($183,34 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) y de riego ($275,65 \text{ mm}$) aplicada por todas las explotaciones encuestadas. Además se realizó una agrupación de datos en función de la distribución estadística por cuartiles: los datos del primer cuartil, corresponden a las explotaciones que consumen menos fertilizante (dosis menores a $147,2 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) y menos dosis de riego (dosis menores a 232 mm). Los valores del tercer cuartil, corresponden a las explotaciones que consumen más fertilizante (dosis mayores a $246,08 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) y aplican mayor cantidad de agua (dosis mayores a $309,33 \text{ mm}$).

Se propusieron escenarios alternativos de mitigación, considerando reducción en las dosis de fertilizante nitrogenado y de riego en un 10%, 20% y 34%. De la misma manera, se calcularon las emisiones de CO_2e que se generarían y se estimaron los ingresos netos en caso de que se aplicasen las medidas (escenarios propuestos).

La variación de las emisiones y de los ingresos fue calculada por diferencia, entre las emisiones e ingresos generados en el escenario base menos las emisiones e ingresos obtenidos en los escenarios propuestos (ecuaciones 5 y 6).

$$\text{Variación de emisiones} = \text{Emisiones generadas}_{(\text{Escenario base})} - \text{Emisiones generadas}_{(\text{Escenario propuesto})} \quad [5]$$

$$\text{Variación de Ingresos} = \text{Ingresos generados}_{(\text{Escenario base})} - \text{Ingresos generados}_{(\text{Escenario propuesto})} \quad [6]$$

El coste marginal de reducir las emisiones fue el resultado de la división entre la variación de ingresos y la variación de emisiones (ecuación 7).

$$\text{Coste marginal de reducción de emisiones} = \frac{\text{Variación de ingresos}}{\text{Potencial de mitigación}} \quad [7]$$

Los ingresos de los productores se calcularon en función del precio medio que recibe el productor por tonelada de producto, que según información proporcionada por la cooperativa de productores de patata UDAPA es equivalente a 160 €. (Robles K., comunicación personal, Mayo 24, 2013).

El precio promedio del fertilizante nitrogenado (urea) según datos del Banco Mundial para el año 2012 fue equivalente a 315,4 €·t⁻¹ (The World Bank 2013).

Según las encuestas realizadas a los productores de patata, el precio del agua empleada en regadío, fue de 0,13 €·m⁻³, incluyendo el coste de energía eléctrica para el bombeo.

No se realizó el análisis MACC para combustible, debido a que no se encontraron datos exactos referentes a la variación de rendimiento del cultivo en función de las actividades agrícolas mecanizadas.

4.2.6 Propuesta de medidas para reducir emisiones de GEI

Se realizó la propuesta de medidas de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en función del potencial de mitigación y de sus costes económicos, para lo cual se consideró la información obtenida a través de las curvas MACC para fertilizante nitrogenado y para el caso de la energía empleada en irrigación.

Se compararon las dos propuestas y se analizó cuál de ellas tuvo mayor coste-eficacia, es decir cuál de las medidas presentó mayor potencial de reducción de emisiones de GEI y a su vez, implicó menores costes de implementación.

Esto se realizó con la finalidad de ayudar a los productores a tomar decisiones estratégicas y tácticas, para mejorar su sostenibilidad ambiental y económica.

4.3 Resultados y Discusión

4.3.1 Emisiones de CO₂e

El sistema de producción en España presentó unos valores de emisiones de CO₂e ha⁻¹·año⁻¹ que prácticamente duplican los de Perú (Tabla 4.2).

Se observa la misma tendencia al analizar la huella de carbono por unidad de producto comercial, los sistemas de producción en Perú presentaron emisiones menores, equivalentes al 57% comparado con el sistema español (Tabla 4.2).

En nuestro estudio, la huella de carbono por tonelada de patata en España representa el doble de las emisiones de Reino Unido, la principal razón que explica la diferencia en las emisiones, es el rendimiento del cultivo; puesto que en Reino Unido el rendimiento promedio es de 52 t ha⁻¹ (Wale 2008); mientras que en España, según las encuestas realizadas, el rendimiento promedio llega a 39 t ha⁻¹; lo cual concuerda con los valores reportados por MARM (2010), que muestran que el rendimiento promedio en áreas de regadío es de 29 t ha⁻¹ y el rendimiento máximo de 50 t ha⁻¹. Mientras que en Perú los rendimientos obtenidos como resultado de las encuestas fueron de 34 t ha⁻¹, lo cual concuerda con los valores reportados por Devaux, et al. (2010), quienes mencionan que los rendimientos de variedades mejoradas se encuentran entre 22 t ha⁻¹ y 41 t ha⁻¹.

Tabla 4.2. Emisiones de CO₂ en los sistemas de producción de patata en España y Perú. Año 2013. Para cada país se presenta la media y la desviación estándar (D.E.)

Actividad	Emisiones por unidad de área (kg CO ₂ e·ha ⁻¹)				Emisiones unidad de producto comercial (kg CO ₂ e·t ⁻¹)				Valores relativos (%)	
	España	D.E.	Perú	D.E.	España	D.E.	Perú	D.E.	España	Perú
Producción										
abonos	1167,6	262,7	442,8	23,1	30,9	6,0	13,6	1,5	32	32,4
Uso abonos	598,5	223,6	267,2	32,6	16,0	7,7	8,2	1,3	16,6	19,6
Emisión										
N ₂ O del										
suelo	102,8	19,8	311,5	17,2	2,8	0,8	9,6	1,5	2,9	22,9
Uso										
pesticida	212,7	128,1	61,5	0,7	5,8	3,6	1,9	0,2	6,0	4,5
Uso										
combustible										
(Labores										
agrícolas)	850,2	185,8	96,4	28,5	21,7	5,4	2,9	0,8	22,4	6,9
Uso energía										
en irrigación	403,7	77,9	0	0	10,8	2,0	0	0	11,2	0
Cultivos										
cobertera y										
manejo										
residuos	123	6,9	189,1	8,4	3,3	0,2	5,8	0,4	3,4	13,8
Otros										
(Transporte										
interno)	179	88,7	0	0	5,4	2,4	0	0	5,6	0
Total	3637,6	598,3	1368,5	61,8	96,6	18,0	42	4,5	100	100

Los datos reflejan que la diferencia entre los sistemas de producción radica en el mayor uso de insumos como: abonos, combustible para las labores de campo, energía requerida para el riego y el transporte.

Los GEI emitidos por las fábricas dedicadas a la producción de abonos representa uno de los factores que mayor proporción de CO₂e emite en los sistemas estudiados, siendo responsable del 32% de las emisiones totales en el manejo del cultivo (Tabla 4.2). Estos valores coinciden con los de estudios previos realizados en cultivos de patata (Haverkort y Hillier 2011).

En la región alavesa el cultivo de la patata requiere altas dosis de abonos químicos ya que según las encuestas realizadas son suelos con bajo contenido de materia orgánica lo cual concuerda con la caracterización de suelos de las comarcas agrarias de España realizada por Fernández (2011), quien menciona que los suelos de la zona de Álava pertenecen a suelos del tipo Xerochrept y Ustochrept según la clasificación USDA-NRCS, caracterizados por tener bajo contenido de materia orgánica, lo cual hace

necesario la aplicación de altas dosis de abonos químicos para compensar la falta de materia orgánica. La suma de las emisiones de CO₂e debido a la fabricación y uso de abonos fue de 47 kg CO₂e·t⁻¹ para el sistema productivo español, y de 22 kg CO₂e·t⁻¹ en Perú, sin embargo las aportaciones relativas al valor total de las emisiones de CO₂e fueron muy parecidas en España y Perú alcanzando respectivamente el 48% y 52%, lo que pone de manifiesto la importancia del uso de abonos químicos independientemente del sistema de cultivo

Cabe recalcar que las emisiones de CO₂e por la fabricación de fertilizantes representa un parámetro imposible de controlar por los productores de patata, puesto que depende de las empresas fabricantes y de la metodología que ellas empleen.

La liberación de N₂O del suelo representa el segundo factor responsable de las emisiones de CO₂e en Perú; mientras que en España, las emisiones debidas al uso de combustible para la maquinaria agrícola son las que influyen mayoritariamente.

Estos resultados se deben a que los suelos de Perú contienen mayores cantidades de materia orgánica que sometida a la mineralización microbiana contribuyen a la emisión de N₂O (Granli y Bockman, 1994; Grageda et al. 2000). Además, Wale (2008) menciona que el cultivo de patata implica levantar y mover grandes cantidades de tierra, por lo que es probable que aumenten las tasas de respiración del suelo y por lo tanto las emisiones de GEI.

Los valores relativos de emisiones de CO₂e debido al conjunto del ciclo del nitrógeno incluyendo su fabricación, su uso y la liberación de N₂O del suelo fueron de 43% (España) y 75% (Perú). Estos valores, coinciden con estudios previos que han demostrado que las emisiones de GEI debido al ciclo completo del nitrógeno puede alcanzar los 75% de las emisiones totales de CO₂e en diferentes cultivos e independientemente del sistema de producción, convencional u orgánico (Hillier et al. 2009).

España presenta mayores emisiones que Perú por consumo de energía en el uso de maquinaria agrícola, debido a que en Perú se emplea reducida mecanización agrícola, siendo reemplazada por tracción animal o labranza manual (Devaux et al. 2010). Considerando que en la tracción animal se utiliza bovinos o equinos y generalmente se usan animales machos ya que las hembras no pueden ser usadas durante su preñez o

cuando están amamantando a sus terneros (Castellanos, M. 2012), se ha tomado datos de estudios realizados en Costa Rica (Hassán, J. 2013), a fin de estimar valores de emisiones por ganado bovino en países en vías de desarrollo, cuyas emisiones son mayores en comparación a las emisiones por ganado bovino en países desarrollados. A su vez se ha tomado datos de emisiones en fincas con manejo tradicional; puesto que en fincas con manejo mejorado, los valores son menores debido a la calidad de la dieta que se maneja.

Según Hassán (2013), las emisiones de un semental y una vaca seca oscilan entre 2,66 y 2,86 kg CO₂e animal⁻¹ día⁻¹, respectivamente. Por otro lado, según comunicación personal con los productores de patata, en el ciclo del cultivo se requieren unas 54 horas de trabajo animal por ha de cultivo que corresponden a las labores de labranza del suelo antes de la siembra, mientras que la cosecha se realiza manualmente. Este trabajo animal equivale a una emisión de 6 a 6,4 kg CO₂e por ha, o de 0,18 a 0,20 kg CO₂e por tonelada de patata comercial lo que representa entre un 0,43 y 0,47% de la totalidad de las emisiones.

Por lo tanto aunque el programa CFT no ofrece la opción de incorporar en los cálculos, las emisiones debido al uso de tracción animal en las tareas de campo, el error debido a esta omisión resulta realmente mínimo y se puede despreciar, por lo menos en el marco de este estudio.

Por otra parte, las explotaciones peruanas no presentaron valores de emisiones de CO₂ debido al consumo de energía en irrigación; según la información obtenida de las encuestas y según Devaux et al. (2010), el riego se realiza mediante gravedad por su relativo bajo costo. Tampoco presentaron valores de emisiones debido al transporte interno del producto ya que el 87,5% de los productores poseen extensiones de cultivo menores a 10 ha, lo que implica que la distancia promedio entre los almacenes y las parcelas de producción están a menos de 200 metros (Tabla 4.1). Esto conlleva que los agricultores no empleen transporte mecánico, y utilicen personal de carga o hagan uso de acémilas (bueyes, burros y caballos) para el traslado de la producción a las zonas de almacenamiento (Devaux et al. 2010).

En el presente estudio no se ha considerado la fase de procesamiento de la patata (lavado, empaquetado), costes de almacenamiento ni del transporte fuera de las parcelas

de producción, por lo que la cifra sería relativamente mayor. La patata es un cultivo voluminoso que es almacenado en frío para consumirlo a futuro, lo cual implicaría cifras de emisiones mucho mayores que las presentadas hasta el momento (Wale 2008).

4.3.2 Análisis de sensibilidad del programa Cool Farm Tool – Potato

El análisis de sensibilidad realizado para los tres primeros parámetros que más influyen las emisiones de CO₂e (nitrógeno, riego y gasoil), muestra que la aplicación de nitrógeno incorporado al suelo presenta el mayor valor de la pendiente en la ecuación (Figura 4.1), convirtiéndose en el principal candidato para lograr una reducción de emisiones de CO₂. En segundo y tercer lugar se encuentran el combustible y el riego, respectivamente.

Figura4.1. Análisis de sensibilidad del programa CFT-patata para las emisiones de CO₂ por: a) Aplicación de nitrógeno. b) Uso de energía eléctrica en riego. c) Combustible utilizado en actividades agrícolas.

4.3.3 Evaluación de la reducción potencial de fertilizante nitrogenado mediante el análisis MACC

El análisis MACC se realizó únicamente en el caso de los sistemas productivos de España ya que en el caso de las explotaciones peruanas la emisión procedente del uso de combustible y del riego es nula.

Los resultados mostraron que en el conjunto de las explotaciones el coste para reducir una cantidad de GEI comprendida entre 0,10 y 0,32 t CO₂e ha⁻¹ (aplicando reducciones del 10% y 30% en la dosis de N, respectivamente) sería de 790 a 1060 € t⁻¹ CO₂e (Figura 4.2). Estos resultados muestran que el coste para reducir las emisiones no es proporcional a la cantidad, por lo tanto cuanto más toneladas de CO₂ se reduzcan, más barato resulta el esfuerzo para reducir una unidad de CO₂. En los sistemas de cultivo de alto consumo de N (> 246 kg N·ha⁻¹) el coste para reducir una cantidad máxima de 0,45 t CO₂e ha⁻¹ sería de 450 €·t⁻¹ CO₂e mientras que en el caso de las parcelas que presentan un bajo consumo de N (< 147 kg N·ha⁻¹) el esfuerzo para reducir 0,25 t CO₂e ha⁻¹ sería de 1460 €·t⁻¹ CO₂e. Por lo tanto, las explotaciones que aplican altas dosis de nitrógeno (> 246 kg N·ha⁻¹), podrán reducir en mayor medida sus emisiones a un coste menor; mientras que la aplicación de medidas de mitigación de GEI resultará más costoso para las explotaciones que ya se encuentren aplicando bajas cantidades de nitrógeno (< 147 kg N·ha⁻¹).

Figura 4.2. Análisis MACC para el uso de fertilizante nitrogenado. Medida 1: reducción del aporte de N en un 10%, medida 2: del 20%, medida 3 del 34%.

4.3.4 Evaluación de la reducción potencial de la dosis de riego mediante el análisis MACC

El análisis MACC mostró que el potencial de reducción de emisiones de CO₂ en las explotaciones de mayor consumo agua, no difiere en mayor medida con las explotaciones de menor consumo. Esto ocurre debido a que, según el análisis de sensibilidad realizado, la dosis de riego es el aspecto de menor influencia en las emisiones. Sin embargo, la tendencia es la misma: el potencial de reducción de emisiones de GEI en las explotaciones de mayor consumo de riego es superior al

potencial de reducción de emisiones de las explotaciones de bajo consumo y al conjunto de todas las explotaciones (Figura 4.3).

Figura 4.3. Análisis MACC para consumo de energía en riego. Medida 1: reducción de riego en 10%, medida 2: en 20%, medida 3: en 34%.

En el conjunto de las explotaciones el coste para reducir una cantidad de GEI comprendida entre 0,04 y 0,15 t CO₂e ha⁻¹ (aplicando reducciones del 10% y 30% en la dosis de riego, respectivamente) sería de 14230 a 15640 € t⁻¹ CO₂e (Figura 4.3). En los sistemas de cultivo de alto consumo de riego (> 309 mm) el coste para reducir una cantidad máxima de 0,16 t CO₂e ha⁻¹ sería de 14450 € t⁻¹ CO₂e; mientras que en el caso de las parcelas que presentan un bajo consumo de agua (< 232 mm) el esfuerzo para reducir 0,13 t CO₂e ha⁻¹ sería de 17140 € t⁻¹ CO₂e. Por lo tanto, las explotaciones que

aplican altas dosis de riego (> 309 mm), podrán reducir en mayor medida sus emisiones a un coste menor; a diferencia de las explotaciones que ya se encuentren aplicando bajas cantidades de agua (< 232 mm), a quienes reducir sus emisiones de CO₂ resultará muy costoso.

4.3.5 Propuesta de medidas de mitigación

De acuerdo a los resultados obtenidos por el análisis MACC para fertilizante nitrogenado, en el caso del conjunto de las explotaciones, la acción enfocada a realizar reducciones (10, 20, 34%) de la cantidad de nutriente aplicado implicaría un coste promedio entre 790 y 1060 € por cada tonelada de CO₂e reducida.

En el caso de energía empleada en irrigación, la acción dirigida a realizar reducciones (10, 20, 34%) de la cantidad de riego aplicado implicaría un coste promedio entre 1423 y 1564 € por cada tonelada de CO₂e reducida.

En el conjunto de explotaciones en estudio, el coste total de reducir 0,10 a 0,32 toneladas CO₂ en una hectárea, aplicando reducciones en la fertilización, oscila entre 79 y 339 €·ha⁻¹. Mientras que el coste total de reducir 0,04 a 0,15 toneladas CO₂ en una hectárea, considerando reducciones de la dosis de riego, varía entre 569 y 2346 €.

Comparando estas dos propuestas, sería mucho más factible realizar reducciones de la dosis de fertilizante nitrogenado. Puesto que la disminución de la dosis de nitrógeno aplicada al cultivo, no solo presenta menores costes, sino que la cantidad de emisiones reducidas es mucho mayor, en comparación a las emisiones reducidas por disminución de la dosis de riego.

Los resultados de nuestro estudio se contraponen a los presentados por Moran et al. (2011), en donde la disminución de fertilizante nitrogenado como medida de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en las actividades agrícolas de Reino Unido, presenta un alto coste económico en comparación a otras medidas. Moran et al. (2011) tampoco han contemplado las medidas relacionadas con la irrigación del cultivo, debido a su bajo potencial de mitigación.

Por el contrario, Moran et al. (2008) demostró que las prácticas agrícolas como drenaje mejorado y control de la frecuencia de aplicación de fertilizante nitrogenado, fueron las prácticas más rentables asociadas con la mitigación de GEI en suelos agrícolas.

Estos resultados demuestran que el proceso de desarrollo de curvas MAC es particularmente difícil para las emisiones agrícolas, debido a que la agricultura es una industria compleja, caracterizada por la heterogeneidad espacial y temporal (Macleod et al. 2010). Al igual que Wreford et al. (2010) mencionan que es necesario realizar análisis MACC específicos para regiones o tipos de explotaciones, en función de las condiciones locales biofísicas, sociales y económicas que se manejen.

La metodología utilizada en nuestro trabajo radica en la utilización combinada de un software para calcular las emisiones de CO₂ y la búsqueda de medidas de mitigación dirigida a dos regiones (España y Perú) y a cultivo en particular, en este caso la patata. Consideramos que las conclusiones de esta investigación servirán a los productores de patata como una herramienta valiosa para la implementación de cambios en el sistema de producción con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo el coste de mitigación de cada medida en la toma de decisiones.

Kesicki y Strachan (2011) indican que el uso simplista de las curvas MACC puede ser engañoso y encuentra que los límites del concepto de curva MACC pueden conducir a la toma de decisiones sesgadas. Sin embargo, las curvas MACC son una herramienta política útil, siempre y cuando no se las utilice de manera exclusiva sino como una guía ilustrativa para su posterior análisis, especialmente para la elaboración de políticas incluyendo información sobre los costes y eficacia de las políticas que se descubre.

Por lo que se recomienda en futuras investigaciones, considerar un abanico más amplio de opciones de mitigación de GEI. Además, se recomienda incluir estos resultados de contabilidad de gases dentro de otros sistemas de apoyo a la toma de decisiones, a fin de permitir a los productores, no solo explorar los aspectos de manejo del cultivo que mayores emisiones generen sino también analizar las consecuencias financieras producto de la aplicación de medidas de mitigación.

5. Coste de la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de la Región Andina.

5.1 Introducción

Los agricultores están profundamente integrados en el sistema climático y sus acciones determinan fuertemente las emisiones de gases de efecto invernadero (Smith et al. 2008). Esto es muy importante en la Región Andina, donde el sector agrícola representa casi la mitad de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (UNFCC 2016). Los sistemas mixtos patata-pasto en la región mantienen una población de 120 millones de personas que tienen pocas alternativas de sustento. El alimento básico y la dieta típica incluyen al menos 400 g de patatas al día. El cultivo de patata se estableció hace 8000 años en América Latina (Devaux et al. 2010) y el área de producción se ha expandido enormemente a lo largo de los años. Como resultado de la expansión del cultivo, los agricultores andinos siguen un proceso de adaptación continua. La principal adaptación ha sido producir más leche cuando el mercado lo permite sustituyendo la patata, ya que los ingresos son mayores y los beneficios para la salud también son mejorados.

Por otro lado, los cambios rápidos en el clima están desafiando los sistemas actuales y futuros de producción (IPCC 2014). Los acuerdos internacionales sobre las emisiones de gases de efecto invernadero exigen cambios en las zonas rurales. Durante los próximos años, los sistemas agrícolas en América Latina tendrán que evolucionar para producir menos emisiones, ya que son una fuente principal de emisiones de nitrógeno a la atmósfera y al mismo tiempo ofrece el potencial para secuestrar dióxido de carbono. Por lo tanto, la comunidad de políticas debe realizar esfuerzos excepcionales para definir opciones alternativas de agricultura inteligente para el clima en la región, vinculando las medidas de mitigación y adaptación a las opciones sociales. Pero algunas cuestiones siguen sin resolverse. En primer lugar, se sabe poco sobre los datos de referencia de los sistemas agrícolas actuales. Esto es necesario para definir escenarios alternativos de políticas rentables. Aquí utilizamos métodos participativos para definir una línea base realista, definir medidas potenciales y explorar los incentivos y barreras para implementarlos a nivel local. Un segundo problema no resuelto es la rentabilidad de las estrategias propuestas. Aquí utilizamos una serie de modelos para evaluar el coste

para los agricultores y la eficacia en términos de reducción de gases de efecto invernadero, e ilustramos los resultados con ejemplos locales.

Las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura mundial están aumentando en torno al 1% anual, sin embargo, se necesitan reducciones sustanciales de emisiones en todos los sectores (IPCC 2014). El desafío de reducir las emisiones agrícolas es particularmente agudo, ya que las reducciones alcanzables por las prácticas agrícolas cambiantes son limitadas (Franks et al. 2012) y se ven obstaculizadas por el rápido aumento de la demanda de alimentos (Alexandratos y Bruinsma 2012; Tilman et al. 2011).

En diciembre de 2015, en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC 2015), 194 países firmaron el acuerdo climático de París, que lo hizo más universal. El acuerdo de París tiene como objetivo mantener el calentamiento global muy por debajo de 2 grados Celsius y proseguir los esfuerzos para limitarlo a 1,5 grados Celsius. Para lograr esto, los países han presentado contribuciones nacionales específicas que definen su acción climática post-2020. El acuerdo de París obliga a los países a desarrollar, actualizar y publicar inventarios de las emisiones de cada país. Estos inventarios pueden utilizarse para elaborar estrategias nacionales y formular políticas que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Rogelj et al. 2016).

El Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático reconoció el papel de la gestión agrícola para proporcionar el secuestro de carbono orgánico del suelo (CMNUCC 2008). El secuestro de carbono orgánico del suelo tiene un gran potencial para mitigar el coste competitivo y reducir a corto y mediano plazo la concentración de CO₂ en la atmósfera (IPCC 2014; Smith 2012). El manejo inteligente de la tierra conduce a mejorar la salud del suelo, reducir la degradación y el agotamiento del carbono del suelo, y reduce las emisiones (Lal 2013). Las prácticas agroforestales producen un carbono orgánico del suelo (SOC, soil organic carbon) promedio de 35 toneladas de carbono por hectárea (Vergara et al. 2016), en México se ha reportado un SOC de 50 tCO₂·ha⁻¹ (Soto-Pinto et al. 2009). Por lo tanto, los cambios en las reservas de carbono para el manejo del suelo beneficiarán al suelo y, a su vez, optimizarán la productividad de los cultivos (Ingram et al. 2007,

Sánchez et al. 2016). Cabe recalcar que las estimaciones globales optimistas son cuestionadas en algunas condiciones locales (Derpsch et al. 2014, Powlson et al. 2014).

Se ha reconocido un conjunto de medidas con beneficios probados para el medio ambiente y los agricultores (Lal 2013; Moran et al. 2011). Estas medidas incluyen, entre otras: uso más eficiente de los recursos, manejo integrados de nutrientes con estiércol orgánico y compost, labranza reducida, rotación de cultivos, uso de leguminosas, uso de variedades mejoradas, cultivos de cobertura, manejo de residuos del cultivo, cambio de uso de la tierra (conversión de pastos/árboles). Sin embargo, el conocimiento sobre la aplicación y el coste de las medidas, así como las tecnologías específicas de mitigación a nivel de finca, es limitado y fragmentado (MacLeod et al. 2010; Smith et al. 2007).

Las Curvas de Coste Marginal de Mitigación (MACC, por sus siglas en inglés) son una herramienta analítica comúnmente usada para ayudar a los diseñadores de políticas a entender las oportunidades de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los costes para lograr estas reducciones. Las MACC ilustran los costes de medidas de mitigación específicas para los cultivos, suelos y ganado frente a un escenario actual. Los costes por unidad pueden diferir entre las medidas adoptadas y en algunos casos los agricultores podrían implementar medidas que podrían ayudar a ahorrar dinero y reducir las emisiones (Moran et al. 2011).

América Latina puede ser la región más avanzada en la reducción de las emisiones de carbono ya que en 2012 contribuyó con alrededor del 10% de las emisiones mundiales (4.6 GtCO₂e), lo que se traduce en una emisión per cápita de 7.7 tCO₂e (WRI 2014). Sin embargo, las emisiones per cápita en América Latina son inferiores a las de la Unión Europea, Estados Unidos, China o Japón (Vergara et al. 2016).

América Latina también se ha centrado en las emisiones de carbono y la relación de degradación del suelo para desarrollar estrategias que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la deforestación evitada, la reforestación y la adopción de medidas sostenibles en la agricultura son prácticas altamente promovidas entre el sector agrícola en América Latina (Hansen et al. 2013). Todas estas medidas de mitigación agregarán valor en términos de seguridad energética (mediante el control de recursos renovables nacionales e inagotables), seguridad alimentaria y calidad de vida (mediante la restauración de la tierra), mejoras en los términos de

intercambio (energía, alimentos) y acceso a los recursos financieros internacionales, dado a las inversiones bajas en carbono (Vergara et al. 2016).

La región andina es una región agrícola intensiva con muchos desafíos, uno de ellos, el cambio climático (Seo y Mendelsohn 2008). Esta región abarca principalmente cuatro países (Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia) con características similares en población, cultura y recursos naturales.

El principal sistema mixto de la región andina es la asociación patata-pasto, que representa entre el 25 y el 40% del total de sistemas en áreas de gran altitud de América del Sur (Benzing 2001; Cárdenas et al. 2000; FEDEPATATA 2004; Kendall y Rodríguez 2009; Tapia y Fries 2007).

En 2013, la región andina produjo alrededor del 50% (es decir, 8.1 millones de toneladas) de la producción de patata de toda América del Sur (es decir, 15.6 millones de toneladas) (FAOSTAT 2016). La leche y la patata son una de las principales fuentes de empleo e ingresos de los agricultores y son alimentos básicos en la dieta (Devaux et al. 2010). El consumo per cápita de patata en 2011 fue de 27.4, 18.9, 82.4 y 66 kg·año⁻¹ en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia, respectivamente, superando el promedio mundial (FAOSTAT 2016).

Durante 12 años, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias y el Centro Internacional de la Patata (CIP) han realizado investigaciones en Ecuador para caracterizar este sistema mixto, aumentar la productividad y mejorar la rentabilidad de los agricultores (Barrera et al. 2004, 2010, Priess et al. 2001). Sin embargo, no se habían analizado las cuestiones ambientales. Nuestra investigación pretende completar el análisis económico, social y ambiental.

El objetivo de este estudio es identificar los efectos potenciales de estos sistemas sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y determinar posibles medidas de mitigación a través de un análisis económico. Pocos estudios se han realizado utilizando una evaluación similar en países latinoamericanos usando curvas de coste marginal de mitigación. La metodología utilizada en este estudio busca medidas de mitigación dirigidas al sistema de patata-pasto. Los resultados de esta investigación proporcionarán a los productores una herramienta valiosa para la implementación de cambios en la producción con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

5.2 Métodos y datos

5.2.1 Métodos

Nuestro enfoque para explorar la rentabilidad de las medidas de mitigación combina modelos y métodos participativos y se resume en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Marco metodológico para definir el coste-efectividad de las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero

La metodología incluye cinco pasos secuenciales:

En primer lugar, la caracterización del escenario de línea de base mediante una encuesta a 120 agricultores, esto caracteriza a los sistemas agropecuarios. En segundo lugar, la definición de las posibles opciones de medidas de adaptación/mitigación adaptadas a la realidad de los sistemas agropecuarios; esto es llevado a cabo por grupos focales que incluyen expertos en todos los sectores. Estos dos pasos representan el enfoque participativo de la metodología. En tercer lugar, la definición del potencial de

mitigación de las medidas seleccionadas utilizando el modelo del programa Cool Farm Tool (Haverkort y Hillier 2011). En cuarto lugar, la estimación de los cambios en el margen neto de los agricultores para explorar el coste de implementar las medidas a través de un modelo de optimización. En quinto lugar, el cálculo de la rentabilidad de las medidas de mitigación para definir las curvas de coste marginal de mitigación y así guiar las decisiones políticas.

5.2.2 Definición del escenario base: Sistemas de cultivo del estudio de caso y datos

El estudio se realizó en un transecto de sitios en Ecuador, que ejemplifican los sistemas agropecuarios de subsistencia en la región andina. Los sistemas agropecuarios andinos se localizan entre 2200 y 3800 metros sobre el nivel del mar, la temperatura oscila entre 4 y 21°C y la precipitación oscila entre 500 y 2000 milímetros por año. Estas características crean ambientes agroecológicos particulares. La patata-pasto es el sistema agropecuario clave en esta región, siendo el 96% ocupado por patata y el 4% por pasto (INIAP 2003). Este sistema consiste en el cultivo de patata durante dos o tres ciclos en suelos previamente ocupados por pastos durante aproximadamente dos años, completando un ciclo de tres a cuatro años (Paladines y Jácome, 1999, Proaño y Paladines, 1998). El pasto se utiliza para la alimentación del ganado y por lo tanto la producción de leche. Después de la patata, se puede plantar otro cultivo durante un solo ciclo para aprovechar el fertilizante residual. Alrededor del 75% de la superficie cultivada no está irrigada (INEC 2016). Los suelos de esta región son andisoles que se caracterizan principalmente por tener un alto contenido de materia orgánica (Buytaert et al. 2006; IUSS Working Group WRB 2014).

La región andina es topográficamente variable y tiene una alta heterogeneidad agroecológica dependiendo de las diferentes zonas de producción que ejemplifican la gama de producción en zonas de gran altitud. La selección del lugar se realizó de acuerdo con una caracterización bio-socioeconómica, que distingue tres zonas diferentes (Tabla 5.1). Uno de los problemas en la región andina es la pendiente del suelo. Las pendientes pronunciadas (mayores al 20% de pendiente) impiden el uso de maquinaria agrícola, en su lugar se emplea labranza manual y tracción animal (Devaux et al. et al. 2010; Pumisacho y Sherwood 2002), lo cual aumenta los costes de producción. Sin embargo, se convierte en un beneficio para el medio ambiente al reducir las emisiones

de gases de efecto invernadero del combustible quemado en labores agrícolas (Cayambe et al. 2015).

Tabla 5.1. Zonas seleccionadas en la región andina y ubicaciones representativas incluidas en el estudio. Fuentes de datos: INAMHI 2015; INEC 2016

Características	Región Andina		
	Zona norte	Zona central	Zona sur
Superficie total (ha)	12.398	30.191	6.622
Promedio de producción de patata en la zona (t /ha)	9,10	6.15	1,95
Ubicación representativa del modelo	Carchi	Chimborazo	Cañar
Temperatura máxima (°C) (1990-2010)	21	18	18
Temperatura mínima (°C) (1990-2010)	4	6	6
Temperatura media (°C) (1990-2010)	11,8	13,5	11,9
Precipitación anual total (mm) (1990-2010)	1013	1100	467

Se seleccionaron tres zonas y ubicaciones representativas en base a los siguientes criterios: (1) la producción de patata y leche en la zona es importante para el ingreso familiar y la nutrición, (2) la tecnología es importante para la sostenibilidad de la producción y (3) los lugares seleccionados son representativos para la región.

La encuesta fue realizada a 40 pequeños y medianos productores que tienen una superficie promedio de 500 m² de producción, en cada provincia seleccionada (Anexo 2). La encuesta se centra en aspectos relacionados con el manejo del cultivo (rendimiento, área, cantidad de fertilizante, combustible para maquinaria agrícola) y precios de los insumos. Se obtuvo información adicional de entrevistas cara a cara con el grupo de expertos del INIAP y CIP-Ecuador.

Los datos secundarios se obtuvieron del Ministerio de Agricultura, Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP), del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y del Instituto Geográfico Militar (IGM) y contienen información sobre las características poblacionales, físicas, biológicas, socioeconómicas y agrometeorológicas (suelo-agua-planta-animal) de los lugares seleccionados.

5.2.3 Selección de las posibles medidas de mitigación

Hicimos una lista inicial de medidas de adaptación/mitigación de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas basados en la revisión bibliográfica publicada e información disponible en INIAP. La lista potencial de medidas y su viabilidad fueron discutidas y evaluadas por científicos expertos en pastizales, patata y ciencias del

suelo. Las normas para la selección de expertos regionales fueron: (1) el experto debe ser investigador; (2) el experto debe haber trabajado en cuestiones relacionadas con la adaptación/mitigación del cambio climático en la agricultura durante al menos cinco años; (3) el experto debe mantener contacto regular con los agricultores; y (4) el experto debe tener un amplio conocimiento en pasturas y patata para determinar si las medidas propuestas son aplicables.

Se seleccionaron aquellas medidas que mostraron menos barreras de implementación. El resultado fue una lista de medidas con mayor tasa de potencial de mitigación elegida para esta región y sistema de cultivo, específicos.

5.2.4 Definición del potencial de mitigación de las medidas seleccionadas

Las emisiones de gases de efecto invernadero en el escenario de referencia y los escenarios de mitigación se calcularon introduciendo los datos promedio (obtenidos de las encuestas) en una calculadora para las emisiones del sistema patata-pasto. Este software libre llamado Cool Farm Tool (Haverkort y Hillier 2011) estima las emisiones de patata y ganado, por separado. Reconociendo que el potencial de mitigación varía mucho en diferentes regiones agroclimáticas y prácticas agrícolas. El software Cool Farm Tool define el potencial de mitigación para cada país del mundo. Para calcular el potencial de mitigación de las medidas, se requerían datos de emisiones en escenarios de referencia. Este software se ha probado en sistemas de cultivo de patata en varios países: Holanda (Haverkort y Hillier 2011), Reino Unido (Hillier et al. 2013), España y Perú (Cayambe et al. 2015).

La información de entrada requerida por el software consistía de: información general (localización geográfica, año de producción, producto en estudio, superficie de producción y clima), manejo del cultivo (operaciones agrícolas, protección del cultivo, uso de fertilizantes y manejo de residuos de cosechas), secuestro de carbono (uso y manejo del suelo, biomasa vegetal), ganadería (opciones de alimentación, fermentación entérica, excreción de nitrógeno y manejo de estiércol), uso de energía (riego, maquinaria agrícola). La información generada por el programa es la emisión de CO₂e desde el momento de la siembra hasta la cosecha según tres estándares: por área cultivada (ha), por unidad de producto (tonelada) y por prácticas agrícolas tales como producción de semillas, producción de fertilizantes, antecedentes de óxido nitroso en el

suelo, emisiones generadas en el campo por fertilizantes, emisiones generadas por el uso de pesticidas, uso de energía, manejo de residuos de cultivos (Haverkort y Hillier 2011).

El programa Cool Farm Tool calcula las emisiones de gases de efecto invernadero utilizando las tasas de conversión de las siguientes fuentes:

(a) Los datos de base de Ecoinvent (Ecoinvent Center 2007) se utilizan para la producción y distribución de fertilizantes.

(b) Para las emisiones de óxido nitroso (N_2O) se requieren emisiones relacionadas con la aplicación de fertilizantes, el tipo de fertilizante, la frecuencia de aplicación, el clima y las características fisicoquímicas del suelo (Bouwman et al. 2002).

(c) Las emisiones de óxido nítrico (NO) y amoníaco (NH_3) se calculan de acuerdo con el modelo de (FAO / IFIA 2001) y se convierten a N_2O a través de factores de conversión presentados en IPCC (2006).

(d) Se utilizan también factores de conversión para calcular la lixiviación y las emisiones de CO_2 como resultado de la aplicación de urea o de cal. Las emisiones del suelo se calculan mediante la introducción de datos climáticos, características del suelo, prácticas agrícolas y manejo de residuos de cultivos.

(e) Los efectos de la adición de materia orgánica a las reservas de carbono del suelo se derivan de los datos de Smith et al. (1997). Las emisiones debidas al uso directo de energía (gasolina, diesel, electricidad) para operaciones de campo y procesamiento primario, se han calculado a partir de las normas técnicas ASABE (ASABE 2007).

(f) El protocolo de gases de efecto invernadero por sector y los factores de conversión son requeridos por las emisiones del uso de la electricidad (Greenhalgh et al. 2006).

5.2.5 Coste de implementación de medidas alternativas. Cambios en el margen neto de los agricultores

Los costes de producción en el escenario base se derivan de los datos publicados en el Sistema Nacional de Información del Ministerio de Agricultura del Ecuador (MAGAP 2016a, 2016b), en los que se registran los precios actualizados de insumos y productos. Los costes de implementación de medidas alternativas se estimaron a través

de un modelo de optimización (maximización del margen neto). Este método consiste en maximizar el margen neto de los productores cuando se implementa una práctica de mitigación de gases de efecto invernadero en el sistema. Para este cálculo nos basamos en un modelo de programación lineal validado para el sistema patata-pasto en Ecuador (Rueda 2002; Zarate 2002); que tiene alternativas de producción bajo sus propias limitaciones y recursos disponibles (Anexos 3.1, 3.2 y 3.3). El modelo define el plan de producción que optimiza el uso de recursos para lograr la maximización del margen neto. El margen neto se obtuvo a partir de la diferencia entre los ingresos y el coste de los insumos (fertilizantes, semillas, protección de cultivos, costes de mano de obra y autoconsumo familiar).

Los escenarios base y de mitigación fueron optimizados bajo el supuesto de maximizar el margen neto usando el software de programación lineal LINDO (LINDO Systems 2003).

5.2.6 Curvas de Coste Marginal de Mitigación para guiar las decisiones políticas

El coste-efectividad de las medidas de mitigación está relacionado con la efectividad de las medidas para reducir la intensidad de las emisiones de la agricultura y a su vez mantener o aumentar la producción, lo cual reduciría los costes de la implementación de dichas prácticas agrícolas (MacLeod et al. 2015).

La relación coste-efectividad (ecuación 1) de una medida de mitigación es la división entre el cambio en el margen neto relacionado con la práctica (ΔNM_p) y el cambio en las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la práctica p (ΔGHG_p) (Cayambe et al. 2015; Dequiedt y Moran 2015). ‘ ΔGHG_p ’ fue calculada como la diferencia entre las emisiones generadas en el escenario base menos las emisiones de los escenarios de mitigación.

‘ ΔGM_p ’ fue calculada como la diferencia entre el margen neto generado en el escenario base menos el margen neto en los escenarios de mitigación (ecuación 2).

$$CE_p = \Delta NM_p / (\Delta GHG_p) \quad [1]$$

$$\Delta NM_p = (\text{USD} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1})_{BAU} - (\text{USD} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1})_M \quad [2]$$

Dónde:

CE_p es el coste marginal de reducción para cada práctica “ p ”, y representa el coste-efectividad de cada medida.

$(US\$ \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1})_{BAU}$; $(US\$ \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1})_M$ es el margen neto en dólares por hectárea y año en el escenario base y en la opción de mitigación, respectivamente. El resultado es el coste de la medida de mitigación.

Por último, representamos una curva marginal de costes de mitigación que muestra la relación entre la rentabilidad de las opciones de mitigación seleccionadas y la cantidad total de gases de efecto invernadero reducidos. El eje “ y ” representa la cantidad de potencial de reducción de la medida (en tCO₂e). El eje “ x ” representa el coste por tonelada de CO₂e ahorrado.

Algunas medidas pueden ser capaces de reducir las emisiones y ahorrar dinero (costes negativos) que son las opciones más eficientes que se pagan por sí mismas; estas medidas se muestran debajo del eje “ x ” en las MACC.

Otras medidas pueden reducir más emisiones, pero incurren en costes positivos, ya que son opciones menos eficientes por tener un coste positivo para su implementación. Estas opciones se representan por encima del eje x en las MAAC.

El paso final es definir las mejores opciones de política para cada Caso de Estudio sobre la base del análisis coste-efectividad.

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Definición de la línea base en el sistema patata-pasto

La caracterización de los sistemas patata-pasto actuales, se define por el escenario base. Estos han sido caracterizados mediante la información obtenida de las encuestas y son presentados en la Tabla 5.2. Los resultados muestran que la productividad y los costes de producción varían mucho en los tres Casos de Estudio. La heterogeneidad del rendimiento de la patata se debe a diferencias agronómicas, climáticas, socioeconómicas e institucionales (es decir, apoyo público). La cosecha de patata se cultiva ampliamente en todo el Ecuador y los agricultores utilizan una amplia gama de tecnologías. La labranza del suelo es mayormente manual o con tracción animal. Según la encuesta, los agricultores emplean mano de obra familiar pero a veces contratan mano de obra. Los

altos índices de fertilización y el uso frecuente de pesticidas, son comunes en el sistema patata-pasto. En general, la producción de patata en Carchi es más tecnificada, utiliza más insumos, y también alcanza una mayor productividad. La producción en Chimborazo y Cañar es muy similar. En todos los casos la variabilidad año a año es muy alta (del 80% al 110% de la producción media). La producción de leche varía en los tres lugares y también es más tecnificada en Carchi, especialmente con altos insumos de mano de obra. Esto da lugar a una mayor productividad de la leche. Cañar es el lugar que favorece la producción de leche sobre la producción de patata en términos de área de pastoreo ocupada.

Tabla 5.2. Caracterización de los sistemas de cultivo en los sitios seleccionados basados en datos de 40 fincas representativas en cada provincia para definir la línea de base

Sistemas de agropecuarios representativos en cada área	Carchi		Chimborazo		Cañar	
	Media	STD Dev	Media	STD Dev	Media	STD Dev
Superficie total (ha)	11,33	8,32	4,69	5,29	7,03	6,31
Área de patata (ha)	2,41	1,83	0,61	0,44	0,66	0,46
Área de pastura (ha)	7,66	5,99	2,45	2,81	4,67	5,54
Superficie de cultivo de subsistencia (ha)	1,26	0,75	1,63	0,68	1,7	0,84
Producción de patata (kg · ha ⁻¹)	14.439	12.761	13.590	11.170	10.865	9.754
Semilla de patata por finca (kg)	2,214	1.989	698	627	604	410
N (kg · ha ⁻¹)	198	57	129	27	83	69
P2O5 (kg · ha ⁻¹)	417	158	222	42	122	77
K2O (kg · ha ⁻¹)	182	88	81	25	34	21
Protección de cultivos (número de controles · ha ⁻¹)	8	2,41	4	2,05	4	2,00
Ganado lechero (número de animales por explotación)	18	9	10	6	14	11
Producción de leche (l · día ⁻¹)	12	8,35	10	11	10	9
Combustible en labores (l · ha ⁻¹)	60	0	60	0	60	0
Mano de obra contratada para la producción de patata (número de personas · ha ⁻¹)	103	80	76	25	36	38
Mano de obra familiar para la producción de patata (número de personas · ha ⁻¹)	25	27	59	25	63	42
Mano de obra contratada para la producción de leche (número de personas · ha ⁻¹)	3	8	0	0	0	0
Mano de obra familiar para la producción de leche (número de personas · ha ⁻¹)	345	269	242	119	240	252

5.3.2 Medidas seleccionadas con alto potencial de mitigación

Siete posibles medidas de adaptación/mitigación fueron seleccionadas por los el grupo de expertos. La selección incluyó, además, un análisis cualitativo de las barreras (clima, limitaciones agronómicas y sociales) e incentivos para la implementación de las medidas. Algunas de las medidas identificadas ya están implementadas por algunos

agricultores de la región. La Tabla 5.3 incluye las medidas de mitigación seleccionadas y algunas referencias de su implementación en países con condiciones agrícolas y climáticas similares.

Tabla 5.3. Medidas agrícolas seleccionadas por los expertos para el sistema patata-pasto

Medidas agrícolas	Referencia de medidas similares en otros estudios presentados
M1 Gestión de suelos orgánicos Los suelos orgánicos contienen altas densidades de carbono. Las emisiones en estos suelos pueden reducirse evitando los cultivos en hilera, evitando el arado profundo y manteniendo la superficie de agua subterránea cerca de la superficie	Kasimir-Klemedtsson y col. 1997; Quintero y Comerford 2013; Smith et al. 2008
M2 Árboles forrajeros de usos múltiples Las especies de árboles contribuyen al carbono orgánico del suelo a través de la biomasa y crean sombra para el ganado. Las especies de leguminosas pueden aumentar el contenido de nitrógeno en los suelos.	Messa 2009; Montagnini et al. 2013; Naranjo et al. 2012; Smith et al. 2008
M3 Manejo del estiércol Se reducirán las emisiones de N ₂ O si el estiércol se aplica en el momento exacto en que el cultivo lo va a usar. La evidencia preliminar sugiere cubrir las pilas de compost para reducir emisiones de N ₂ O.	Chadwick et al. 2011; Follett 2001; Smith et al. 2008
M4 Manejo del pastoreo, mejoramiento de pastos y fertilización La intensidad del pastoreo afecta al almacenamiento de carbono en los suelos. La productividad de los pastizales aumentará mediante la fertilización adecuada. Uso de fijación biológica para proporcionar insumos de nitrógeno (por ejemplo: trébol).	Conant et al. 2001; MacLeod et al. 2010; Oenema et al. 2005; Schuman et al. 2002; Smith et al. 2008
M5 Labranza reducida + Uso de residuos de cultivos La labranza reducida permite el manejo de residuos de cultivos que promueve el secuestro de carbono en el suelo por menor descomposición y erosión. En Ecuador se practica un tipo de labranza reducida llamada "Huacho rozado".	Bayer et al. 2000; Corazza et al. 1999; Follett 2001; Jahan et al. 2016; Smith et al. 2008; Oeste 2002
M6 Manejo agronómico del cultivo Las variedades tempranas pueden reducir el uso de insumos (por ejemplo en Ecuador, las variedades de patata Victoria y Libertad)	Smith et al. 2008; Comunicación personal con Jorge Rivadeneira- INIAP. 2015
M7 Manejo de nutrientes Prácticas que mejoran la eficiencia del uso del nitrógeno (es decir, fertilizantes de liberación lenta o inhibidores de la nitrificación), evitan las aplicaciones excesivas de nitrógeno y/o eliminan las aplicaciones cuando es posible.	Abbasi y Adams 2000; Follett 2001; Moran et al. 2011; Xia et al. 2016

5.3.3 Potencial de mitigación de las medidas seleccionadas

Utilizando el modelo Cool Farm Tool, estimamos las emisiones en el escenario base. La producción de patata y leche genera un promedio de 10 tCO₂e·ha⁻¹·año⁻¹. Este valor incluye las emisiones de patata y leche en los tres lugares (Figura 5.2). Las emisiones de producción de leche se calculan como la suma de las emisiones de ganado lechero y las emisiones de pasto. La razón es porque queríamos incluir explícitamente.

En términos relativos, la gestión de residuos agrícolas genera la mayor contribución al total, el 48% de las emisiones; seguida de las emisiones directas e indirectas de N₂O, con el 21%. El manejo de residuos y la fertilización podría ser capaz de definir las estrategias de mitigación.

Los resultados también muestran que las emisiones de fermentación entérica del ganado son considerables, lo que representa un promedio de 2 tCO₂e·ha⁻¹·año⁻¹, el equivalente al 18% de las emisiones (Figura 5.2). Emisiones atribuidas al uso de fertilizantes en pastos (emisiones directas e indirectas de N₂O) no fueron significativas, lo que representa un promedio de 0,4 tCO₂e·ha⁻¹·año⁻¹. Se esperaba esta baja contribución, ya que los pastos son menos fertilizados en la Región Andina, puesto que la entrada principal de la fertilización es el fertilizante residual del cultivo de patata (Barrera et al. 2004).

Figura 5.2. Emisiones de gases de efecto invernadero en los lugares representativos de los sistemas agrícolas mixtos en la región Andina; panel de la izquierda en unidades y panel de la derecha en porcentaje

5.3.4 Coste de aplicación de medidas alternativas. Cambios en el margen neto de los agricultores

Los costes y los ingresos a nivel de explotación (efectos en el rendimiento, costes de insumos, costes de mano de obra y maquinaria) se utilizan para calcular el impacto de cada medida en los márgenes netos de los agricultores cuando se aplican las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero.

Tabla 5.4. Costes e ingresos de las prácticas seleccionadas a nivel de explotación

Medidas	Costes (%)	Ingresos (%)	Fuente de datos
M1. Gestión de suelos orgánicos	n / A	Coste de labores y maquinaria reducido en 20%. Aumento del rendimiento 13%	Koga et al. 2003
M2. Árboles forrajeros de usos múltiples	Aumento del 5% en los costes de siembra Reducción del rendimiento del cultivo 7%	Reducción de uso de nitrógeno 10%	MacLeod et al. 2010
M3. Manejo del estiércol	n / A	Reducción de uso de nitrógeno 15%	MacLeod et al. 2010
M4. Manejo del pastoreo. Mejoramiento de pastos y fertilización	n / A	Reducción de uso de nitrógeno 60%, Coste de labores y maquinaria reducido 5% Pequeño aumento del rendimiento (5%)	MacLeod et al. 2010
M5. Labranza reducida + Uso de residuos de cultivos	Rendimiento afectado pero tubérculos más grandes y 15% más alto precio 8% de aumento del uso de fertilizantes nitrogenados y 25% de fertilizante potásico 33% menos de incidencia de <i>Phytophthora infestans</i> Control de insectos no es necesario.	Coste de maquinaria reducido en 20%. Reducido coste en labores 48%	Alva et al. 2002; Carter y Sanderson 2001; Chulde 2005; INIAP 2003; Zangeneh et al. 2010
M6. Manejo agronómico del cultivo	Menor rendimiento que las variedades convencionales (Var. Fripapa, Var. Superchola) (30% menos)	Uso reducido de fertilizantes 30% (menos días de fertilización) Reducción del número de controles de plagas 30% (variedades resistentes)	INIAP 2003; Torres 2011; Comunicación personal con Jorge Rivadeneira-INIAP 2015
M7. Manejo de nutrientes	Incremento del coste del fertilizante 50%	Aumento del rendimiento 2% Reducida mano de obra en fertilización (50%)	Ball et al. 2004; MacLeod et al. 2010

La estimación de costes e ingresos de los agricultores se hizo a partir de los supuestos de costes e ingresos detallados en la literatura publicada (Tabla 5.4). Aunque no hay

datos empíricos locales para ponerlos a prueba, estos supuestos fueron probados y validados en las discusiones del grupo.

Los costes e ingresos fueron utilizados como datos de entrada para calcular el margen neto por explotación y por hectárea en cada Caso de Estudio utilizando el modelo de optimización (maximización del margen neto). El cambio en el margen neto se define como el coste o los ingresos de la aplicación de una medida de adaptación/mitigación en particular. Los cambios negativos en el margen neto son ahorro de costes y los cambios positivos significan medidas más costosas (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Cambios en el margen neto de los productores en la Región Andina

Medidas	Caso de Estudio	Tamaño representativo de la explotación (ha)	Cambios en las explotaciones representativas		
			Margen neto por explotación (USD·año ⁻¹)(*)	Margen neto por unidad de tierra (USD·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Variación en el margen neto de los productores (USD·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
Escenario de referencia	Carchi	11,03	6109,85	539,263	
	Chimborazo	4,69	1104,00	235,406	
	Cañar	7,03	1904,32	270,884	
M1. Gestión de suelos orgánicos	Carchi	11,03	8187,58	722,646	⁻¹ 83,383
	Chimborazo	4,69	1676,00	357,403	⁻¹ 21,997
	Cañar	7,03	2683,30	381,692	⁻¹ 10,808
M2. Árboles forrajeros de usos múltiples	Carchi	11,03	6166,87	544,296	-5,033
	Chimborazo	4,69	1113,00	237,246	⁻¹ 840
	Cañar	7,03	1907,00	271,296	-0,411
M3. Manejo del estiércol	Carchi	11,03	6196,95	546,951	-7,688
	Chimborazo	4,69	1062,00	226,459	8,947
	Cañar	7,03	1874,00	266,593	4,291
M4. Manejo del pastoreo. Mejoramiento de pastos y fertilización	Carchi	11,03	5900,35	520,772	18,491
	Chimborazo	4,69	1038,00	221,301	14,104
	Cañar	7,03	1778,00	252,948	17,936
M5. Labranza reducida. + Uso de residuos de cultivos	Carchi	11,03	8796,91	776,426	-237,163
	Chimborazo	4,69	1863,00	397,201	⁻¹ 61,795
	Cañar	7,03	3198,00	454,837	⁻¹ 83,952
M6. Manejo agronómico del cultivo	Carchi	11,03	7046,38	621,922	-82,659
	Chimborazo	4,69	1228,00	261,883	-26,477
	Cañar	7,03	1990,00	283,021	⁻¹ 2,137
M7. Manejo de nutrientes	Carchi	11,03	4353,81	384,273	154,990
	Chimborazo	4,69	726,00	154,823	80,583
	Cañar	7,03	1285,00	182,837	88,048

5.3.5 Curvas de Coste Marginal de Mitigación. Coste-efectividad de las medidas de mitigación para orientar las decisiones de política

La Figura 5.5 muestra la tasa de cambio en los costes totales en función de los cambios en la reducción de gases de efecto invernadero y la tasa relativa de incremento del coste marginal. En todos los escenarios de nuestro estudio, las curvas de coste marginal de reducción tienen pendientes positivas decrecientes. El potencial de mitigación de una medida disminuye o aumenta los costes cuando el nivel de la actividad de reducción de esta medida se incrementa (Balana et al. 2012). La implicación es que el coste de reducir cada input adicional en explotaciones cuando el nivel actual de ese input ya es bajo, el coste marginal se incrementa sustancialmente (Cayambe et al. 2015).

Figura 5.3. Curvas de Coste Marginal de Mitigación para el sistema de patata-pasto en la Región Andina.

En la figura 5.3, cada punto representa una medida de mitigación, diferenciados por el coste de implementación por tonelada de CO₂e reducida (eje y) y la cantidad de emisiones de CO₂e reducidas (eje x). Las medidas por debajo del eje x son coste-efectivas, es decir, ahorran emisiones y generan cambios positivos en el margen neto.

La MACC de Cañar (la línea azul en la figura 5.5) se muestra más pronunciada, debido al bajo consumo de insumos. El análisis MACC mostró que el potencial de reducción de las emisiones en explotaciones con alto consumo de insumos excede el potencial de mitigación de explotaciones con bajo consumo. Por lo tanto, en el escenario con alto consumo de insumos (Carchi, principalmente) el coste para reducir $2 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$ sería $300 \text{ USD}\cdot\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$, mientras que en el caso de explotaciones con bajo consumo de insumos (Cañar) el esfuerzo para reducir $0,7 \text{ tCO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$ sería de alrededor de $300 \text{ USD}\cdot\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$. Por lo tanto, las explotaciones que aplican grandes cantidades de insumos pueden reducir más sus emisiones a un coste más bajo, mientras que las explotaciones que ya están utilizando pequeñas cantidades de insumos, para reducir sus emisiones de CO_2 va a ser más costoso. Los resultados muestran que mayor potencial de mitigación se consigue con las medidas aplicadas en explotaciones con áreas cultivadas grandes (es decir, Carchi y Chimborazo), porque utilizan más insumos que reflejan más altas emisiones de CO_2 y por ende mayor potencial de mitigación. Cañar, al aplicar una pequeña cantidad de insumos, la mitigación se vuelve más cara. Estudios previos (Cayambe et al. 2015) sugieren que los sistemas de cultivo de patata con un bajo consumo de insumos tienen altos costes por tonelada de reducción de CO_2 en comparación con la agricultura intensiva para quienes resulta más coste-efectiva la mitigación.

El potencial de mitigación entre las diferentes áreas geográficas puede ser representado por la misma curva de costes marginales. Una representación alternativa de la heterogeneidad de costes se presenta en la Figura 5.6 que contiene los resultados de las tres localidades en una MACC regional. Los resultados muestran una considerable variabilidad geográfica. La gestión de suelos orgánicos, la labranza reducida y el manejo de residuos del cultivo en Cañar es más rentable que en Carchi y Chimborazo. El manejo del estiércol es rentable sólo en Carchi ($-7,7 \text{ USD}\cdot\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$). En Chimborazo y Cañar incluso para niveles bajos de mitigación, el coste marginal de reducción es positivo (respectivamente $8,9 \text{ USD}\cdot\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$ y $4,2 \text{ USD}\cdot\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$). Esta heterogeneidad en los costes demuestra el desafío para pagar el mismo coste a nivel nacional y regional entre los países de América Latina. Como resultado, esta simulación demuestra los beneficios de los instrumentos de política que demuestran la heterogeneidad de costes entre zonas de una misma región.

Figura 5.4. Reducción acumulada del sistema patata-pasto en la Región Andina.

Tabla 5.6. Potencial de mitigación de los sistemas mixtos en la Región Andina de Ecuador asumiendo 100% de aplicabilidad

	Potencial de mitigación tCO ₂ e·año ⁻¹			
	Zona norte (12398 ha)	Zona centro (30191 ha)	Zona sur (6622 ha)	Región andina (49.211 ha)
M1. Gestión de suelos orgánicos	867,86	3321,01	66,22	4255,09
M2. Árboles forrajeros de usos múltiples	2107,66	6340,11	463,54	8911,31
M3. Manejo del estiércol	2975,52	7849,66	728,42	11553,60
M4. Manejo del pastoreo. Mejoramiento de pastos y fertilización	6075,02	19322,24	860,86	26258,12
M5. Labranza reducida + Uso de residuos de cultivos	5331,14	10868,76	1191,96	17391,86
M6. Manejo agronómico del cultivo	4587,26	9359,21	860,86	14807,33
M7. Manejo de nutrientes	3843,38	8755,39	1456,84	14055,61
Mitigación total	25787,84	65816,38	5628,70	97232,92
Emissiones totales sector agricultura (Ecuador) 210.000 tCO ₂ e·año ⁻¹	12,28%	31,34%	2,68%	46,30%

Asumiendo 100% de aplicabilidad por los productores y dependiendo del área en cada zona, aproximadamente 97234 tCO₂e·año⁻¹ podrían ser reducidas a nivel nacional, equivalente a un 46% de emisiones reducidas por el sector de la agricultura que tiene un total de 210000 tCO₂e·año⁻¹ (Tabla 5.6).

El coste relativo de la mitigación de emisiones apoya el desarrollo de políticas. En nuestro estudio, cinco de las siete medidas de adaptación/mitigación simuladas: gestión de suelos orgánicos, labranza reducida + residuos de cultivos, manejo agronómico del cultivo, árboles forrajeros de usos múltiples, manejo de estiércol; tienen costes negativos (es decir, $<0 \text{ USD} \cdot \text{tCO}_2\text{e}^{-1}$), por lo tanto, podrían ser candidatos para los programas de política o de capacitación. La adopción de estas medidas implicaría un ahorro de costes y reducción de emisiones. Por lo tanto, estas medidas funcionan mejor mediante la reducción de la labranza en suelos orgánicos (M1). Debido a la extensa área de aplicación, el manejo de suelos orgánicos ofrece la mayor oportunidad para reducir las emisiones en la región. Es importante notar que los costes y beneficios monetarios son sólo un aspecto de la implementación. Este estudio no evaluó las barreras; sin embargo las barreras podrían ser similares a otros estudios de mitigación, especialmente barreras de comportamiento (Moran et al. 2011, de Oliveira Silva et al. 2015), las cuales deberían ser abordadas antes de la adopción.

6. Discusión general

En esta Tesis se ha tratado de integrar la ciencia con la política de cambio climático, específicamente con los tomadores de decisiones. La integración ciencia-política es uno de los retos más complejos que enfrentan las comunidades científicas y de formulación de políticas, ya que implica el intercambio de conocimientos y el intercambio de experiencias entre una amplia gama de disciplinas y actores (Quevauviller et al. 2005). Un componente fundamental de este enfoque es la aplicación de marcos de evaluación de la implementación de una política entre todos los actores: productores, tomadores de decisiones y científicos (Stevens et al. 2007).

El marco metodológico en el que se ha basado la Tesis combina un modelo que cuantifica las emisiones de GEI (Capítulo 4) en función del aumento o reducción de insumos en diferentes países con tecnologías de producción contrastantes (modelo CFT) y un proceso participativo de recolección de datos (entrevistas semi estructuradas) para evaluar los impactos del cambio climático y seleccionar la mejor opción de reducción de emisiones entre varias alternativas planteadas (Capítulo 4 y 5). De las metodologías aplicadas cabe destacar que el análisis coste-efectividad del Capítulo 5 comprendió la caracterización del escenario de línea base mediante encuestas a 120 agricultores,

incluyó además la revisión de literatura publicada desde 1990, obteniéndose una lista de 125 medidas de adaptación/mitigación aplicables a nivel mundial y con la participación de expertos se logró seleccionar las medidas apropiadas para la región y el sistema de cultivo seleccionado. Estos dos pasos representaron el enfoque participativo de la metodología.

Otro aspecto importante de la metodología empleada fue la estimación de los cambios en el beneficio neto de los agricultores para explorar el coste de adopción de las medidas a través de un modelo de maximización del margen neto. Puesto que la agricultura es una industria compleja, caracterizada por la heterogeneidad espacial y temporal, fue necesario realizar análisis coste-efectividad específicos para regiones o tipos de explotaciones, en función de las condiciones locales biofísicas, sociales y económicas que se manejan, así como lo mencionan Macleod et al (2010) y Wreford et al. (2010). Las curvas de coste marginal de mitigación, fue el método que ayudó a ilustrar el potencial de mitigación y el coste de las prácticas agrícolas seleccionadas, convirtiéndose en una guía para los tomadores de decisiones. Estas curvas son una herramienta política útil, siempre y cuando no se las utilice de manera exclusiva sino como una guía ilustrativa para su posterior análisis, especialmente para la elaboración de políticas incluyendo información sobre los costes y eficacia de las políticas que se descubre. Las MACC sobre las acciones propuestas, demuestran que el manejo del fertilizante nitrogenado es la mejor alternativa en las explotaciones de España para reducir las emisiones debido a su mayor potencial de mitigación y menores costes marginales mientras que en las explotaciones de la Región Andina, el manejo de suelos orgánicos a través de la labranza reducida, constituye una medida de reducción de emisiones de GEI.

La producción de patata en los Casos de Estudio de esta Tesis reflejó una diferencia marcada que radica en el mayor uso de insumos como: abonos, combustible para las labores de campo, energía requerida para el riego y transporte. El cultivo generó emisiones de CO₂e debido a tres aspectos principales: alto consumo de fertilizante nitrogenado, energía consumida en irrigación y combustible empleado en labores agrícolas. El ciclo del nitrógeno representó la principal fuente de las emisiones de GEI. Los GEI emitidos por las fábricas dedicadas a la producción de abonos representó uno de los factores que mayor proporción de CO₂e emitió en los sistemas estudiados, siendo responsable del 32% de las emisiones totales en el manejo del cultivo. Estos valores

coinciden con los de estudios previos realizados en cultivos de patata (Haverkort y Hillier 2011). La liberación de N₂O del suelo representó un factor responsable de las emisiones de CO₂e en Perú y Ecuador; mientras que en España, las emisiones debidas al uso de combustible para la maquinaria agrícola son las que influyen mayoritariamente. Los suelos de Ecuador y Perú contienen mayores cantidades de materia orgánica que sometida a la mineralización microbiana contribuyen a la emisión de N₂O (Granli y Bockman, 1994; Grageda et al. 2000), además el laboreo excesivo incrementa las tasas de respiración del suelo y por lo tanto las emisiones de GEI (Wale 2008).

Los resultados de esta investigación muestran que el coste para reducir las emisiones no es proporcional a la cantidad de insumos empleados; por lo tanto, cuantas más toneladas de CO₂ se reduzcan, más barato resulta el esfuerzo para reducir una unidad de CO₂. De tal manera que las explotaciones que empleen mayor cantidad de insumos, podrán reducir en mayor medida sus emisiones a un coste menor; mientras que la aplicación de medidas de mitigación de GEI resultará más costosa para las explotaciones que ya se encuentren aplicando bajas cantidades de insumos. Según nuestros resultados, las medidas de eficiencia de recursos pueden ser promulgadas (teóricamente dentro de las explotaciones agrícolas) para ayudar a conciliar los objetivos contrapuestos de mejoras en el rendimiento y en la reducción de costes. El análisis responde a la necesidad de demostrar las posibilidades de intensificación sostenible, permitiendo a los Casos de Estudio satisfacer las ambiciones de crecimiento económico del sector.

Enfocándonos, en las opciones políticas coste-efectivas, este trabajo contribuye a nuestra comprensión de los procesos de gestión sostenible como relevantes para la producción agrícola y pecuaria. La cantidad de emisiones de GEI en el escenario base y en los escenarios de mitigación, tanto en el cultivo de patata solo (España y Perú) como en el sistema mixto patata-pasto (Región Andina de Ecuador), demuestran el impacto del cambio climático en el cultivo. Los resultados de esta Tesis proporcionaron información para adaptarse y mitigar el cambio climático a nivel de explotación, para apoyar el desarrollo de una política climática integral y para ayudar a los agricultores.

La Tesis presenta una serie de aspectos que pueden justificar una investigación adicional, entre ellos: una representación más detallada de la heterogeneidad biofísica de la región Andina, un mejor tratamiento del manejo de suelos orgánicos y la

relajación del equilibrio de las condiciones de oferta y demanda asumidas en el modelo de optimización. Si bien, la reducción del manejo de nutrientes es una medida importante para derivar un nuevo servicio de asesoramiento en apoyo a la adaptación, las estrategias que se centran en las políticas de gestión de estiércol o agroforestales también desempeñan papeles esenciales. Las alternativas, en el futuro, se ven afectadas por los determinantes locales, las cuales requieren indirectamente apoyo nacional para las políticas de mitigación. Finalmente, un mayor número de evaluaciones de prácticas agrícolas parecen ser particularmente apropiadas.

7. Conclusiones

En esta Tesis se han estudiado las estrategias para hacer frente al cambio climático en los sistemas de producción de patata en la Región Andina y en España. Se ha demostrado que la adaptación/mitigación efectiva al cambio climático sugiere las siguientes conclusiones:

7.1 Conclusiones metodológicas

- 1) Se recopiló información a través de un metanálisis completo que incluyó literatura publicada desde 1990, obteniéndose una lista de 125 medidas de mitigación aplicables de la evidencia experimental existente a nivel mundial. Esta información fue necesaria para la variación de emisiones en los escenarios de mitigación frente al escenario base.
- 2) Se propuso un marco metodológico mediante la combinación de un modelo para calcular las emisiones de CO₂ y un proceso participativo de recopilación de datos en cinco Casos de Estudio (España, Ecuador y Perú) para integrar las decisiones de las partes interesadas y las políticas. Este marco metodológico proporcionó realismo y valiosos resultados a la adopción de una estrategia local de adaptación y puede ser reproducido en otros cultivos.
- 3) Se desarrolló un enfoque metodológico basado en herramientas de políticas de base científica (Curvas de Coste Marginal de Mitigación) para ilustrar el potencial de reducción de GEI y la rentabilidad de las prácticas agrícolas propuestas. Esta metodología sugiere un diagrama de coherente entre el beneficio económico y el beneficio medioambiental de implementar una medida que reduzca las emisiones.

7.2 Conclusiones de los resultados

- 1) Esta Tesis promueve el conocimiento de las diferentes políticas de mitigación del cambio climático existentes en España y en la Región Andina, proporcionando una mayor comprensión de las opciones con las que cuentan los productores, la comprensión del efecto ambiental de las medidas y el coste para los agricultores en diferentes áreas. En nuestro análisis el efecto ambiental de las diferentes medidas no es uniforme en los Casos de Estudio, inclusive estando todos en la Región Andina. Esto refleja, de manera empírica, que existen

- pequeñas diferencias en clima y prácticas agrícolas que generan grandes diferencias en costes y emisiones de gases de efecto invernadero.
- 2) Esta investigación ha integrado varios métodos y herramientas para evaluar opciones potenciales, tanto agrícolas como políticas; y de esta manera, responder al cambio climático. El enfoque cuantitativo y cualitativo ha integrado variables agronómicas, climáticas y socioeconómicas a escala local (España y Perú) y regional (Región Andina de Ecuador). El enfoque metodológico multidisciplinario comprendió desde la recopilación de datos de anteriores investigaciones hasta llegar a enfoques metodológicos que integraron el comportamiento de los agricultores y las opciones de políticas.
 - 3) Las acciones sobre el cambio climático requieren la participación de diversos interesados: agricultores, cooperativas, investigadores, agentes de extensión, encargados de formular políticas. El entendimiento de las percepciones del cambio climático por parte de los agricultores es importante para formular políticas y promover la mitigación y adaptación exitosas en el sector agrícola. La toma de decisiones dependerá de múltiples factores: económicos, tecnológicos, ecológicos y físicos. La percepción del riesgo, factores de tipo cultural, ético y conocimiento sobre el cambio climático pueden ser factores limitantes.
 - 4) La caracterización de los sistemas de producción de patata permitió identificar las diferencias entre los países evaluados que repercuten de manera muy significativa en las emisiones de los GEI. Estas diferencias se agrupan bajo dos aspectos: los de manejo del cultivo (sobre los que se puede actuar) y los de origen natural (imposibles de intervenir) como por ejemplo el contenido de materia orgánica característico de los suelos de Perú. Las diferencias en cuanto al manejo del cultivo nos permitieron determinar posibles medidas de mitigación de gases.
 - 5) La producción de patata en España presentó mayores emisiones de CO₂e que en Perú, debido a tres aspectos principales: mayor consumo de fertilizante nitrogenado, mayor cantidad de energía consumida en irrigación y mayor cantidad de combustible empleado en labores agrícolas. En los dos países, el ciclo del nitrógeno representó la principal fuente de las emisiones de GEI.
 - 6) Se estimaron las emisiones de GEI del cultivo de patata en Ecuador, Perú y España; siendo España, el Caso de Estudio con mayor productividad, mayor tecnología y a su vez con mayor cantidad de emisiones generadas en el cultivo de patata. Sin embargo, las explotaciones que empleen mayor cantidad de

insumos (como España), podrán reducir en mayor medida sus emisiones a un coste menor; mientras que la aplicación de medidas de mitigación de GEI resultará más costosa para las explotaciones que ya se encuentren aplicando bajas cantidades de insumos, como es el caso de los sistemas de patata-pasto de Ecuador y Perú.

- 7) El análisis económico y el cálculo de la reducción potencial de emisiones mostraron que sería más adecuado realizar reducciones de la dosis de fertilizante nitrogenado en el caso de sistemas de patata de España y manejo de suelos orgánicos en Ecuador y Perú, por presentar un mayor potencial de reducción de GEI y menores costes marginales.

7.3 Limitaciones y futuras investigaciones

Esta Tesis representa un intento de explorar las potenciales opciones agrícolas y políticas para responder al cambio climático. Se han estudiado diferentes aspectos agronómicos y socioeconómicos y se han producido resultados interesantes. Sin embargo, existen algunas limitaciones y propuestas para la investigación futura:

- 1) Nuestro análisis se limita al término de los efectos dentro del sistema agrícola y no toma en cuenta los efectos anteriores o posteriores (es decir, la producción de fertilizantes) o el beneficio de la mitigación de las emisiones relacionadas con la fermentación entérica del ganado.
- 2) En esta Tesis se han evaluado varias opciones agrícolas para la mitigación-adaptación al cambio climático relacionadas al cultivo de patata y pastos. No hemos considerado medidas de mitigación para el ganado. Por lo que se considera necesario realizar más análisis sobre las sinergias y los compromisos entre las medidas de mitigación agrícolas para los dos cultivos y a su vez, medidas para reducir las emisiones del ganado.
- 3) Sólo calculamos los costes e ingresos en el primer año de producción de patata y leche. Se recomienda hacer un estudio a través del tiempo para conocer la sostenibilidad del sistema.
- 4) Los costes e ingresos indirectos y sociales se excluyen del análisis e ignora la interacción de las medidas, ya que no hemos encontrado una evaluación detallada de los factores de interacción en la literatura disponible.

- 5) No hemos considerado la opinión de los agricultores en la selección de medidas de mitigación; sin embargo hemos dado valor al juicio de expertos en el cambio climático y en el sistema agropecuario patata-pasto según los aspectos técnicos, sociales y económicos. El análisis de expertos fue empleado para estimar los costes e ingresos, en particular para el efecto agronómico del manejo de tierras de cultivo cuando los agricultores adoptan nuevas variedades.
- 6) La evaluación presentada en esta Tesis intenta integrar el comportamiento del agricultor y las opciones de políticas (por ejemplo: tecnología, gestión agrícola y política climática). Se podrían seguir estudiando diferentes supuestos para los modelos e instrumentos propuestos, así como aumentar la participación de las partes interesadas para dar realismo al proceso de formulación de políticas.
- 7) En esta Tesis, el potencial de la agricultura y las opciones políticas para responder al cambio climático se ha evaluado a nivel local y regional. Un análisis similar podría aplicarse a diferentes áreas agrícolas.
- 8) A pesar de estas limitaciones, el análisis muestra que los costes y la reducción podrían lograrse mediante pequeños cambios en el manejo de los cultivos y el suelo que podrían ser utilizados como una herramienta complementaria en el desarrollo de políticas de mitigación y apoyo.

Referencias

- Abbasi M, Adams W (2000) Estimation of simultaneous nitrification and denitrification in grassland soil associated with urea-N using ^{15}N and nitrification inhibitor. *Biology and Fertility of Soils*, 31(1), 38–44
- Adger WN, Dessai S, Goulden M, Hulme M, Lorenzoni I, Nelson DR, Naess LO, Wolf J, Wreford A (2009) Are there social limits to adaptation to climate change? *Climatic Change* 93, 335–354
- Aguilar MY, Pacheco TR, Tobar JM, Quiñonez JC (2009) Vulnerability and adaptation to climate change of rural inhabitants in the central coastal plain of El Salvador. *Climate Research*, 40(2-3), 187-198
- Ahlawat S, Kaur D (2015). Climate change and food production in North West India. *Indian Journal of Agricultural Research*, 49(6), 544-548
- Alexandratos N, Bruinsma J (2012) World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision (No. 12-03, p. 4) Rome, FAO: ESA Working paper
- Alongi DM (2008) Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1-13
- Altieri MA, Nicholls CI (2017) The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, 140(1), 33-45
- Alva A, Hodges T, Boydston R, Collins H (2002) Effects of irrigation and tillage practices on yield of potato under high production conditions in the Pacific Northwest. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(9-10), 1451–1460
- Alves MdC, de Carvalho LG, Pozza EA, Sanches L, Maia JCdS (2011) Ecological zoning of soybean rust, coffee rust and banana black Sigatoka based on Brazilian climate changes. *Earth System Science 2010: Global Change, Climate and People*, 6, 35-49
- Anderson S, Morton J, Toulmin C (2010) Climate change for agrarian societies in drylands: implications and future pathways. *Social dimensions of climate change: equity and vulnerability in a warming world*, 199-230
- Arnell NW, Gosling SN (2016) The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401.
- ASABE (2007) Standards.ASAE EP496.3.Agricultural machinery management. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 3, 354–357
- Balana B, Lago M, Baggaley N, Castellazzi M, Sample J, Stutter M, Slee B, Vinten A (2012) Integrating economic and biophysical data in assessing cost-effectiveness of buffer strip placement. *Journal of Environmental Quality*, 41(2), 380–8
- Ball BC, McTaggart IP, Scott A (2004) Mitigation of greenhouse gas emissions from soil under silage production by use of organic manures or slow-release fertilizer. *Soil Use and Management*, 20(3), 287–295

- Barrera V, Alwang J, Collaguazo E (2010). Análisis de la viabilidad socio-económica y ambiental del sistema de producción papapatata-pasto en la microcuenca del río Illangama-Ecuador. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 18(1-2), 57–67
- Barrera V, Grijalva J, León C (2004) Mejoramiento de los sistemas de producción de leche en la ecorregión andina del Ecuador. *Archivos Latinoamericanos de Produccion Animal*, 12(2), 43–51
- Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, Trigo RM, García-Herrera R (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332(6026), 220-224
- Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Ceretta C (2000) Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 95–104
- Benegas L, Jiménez F, Locatelli B, Faustino J, Campos M (2009) A methodological proposal for the evaluation of farmer's adaptation to climate variability, mainly due to drought in watersheds in Central America. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(2), 169-183
- Benzing A (2001) *Agricultura orgánica-fundamentos para la región andina* Instituto de la Potasa y el Fósforo (No. F08-11) Quito (Ecuador)
- Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH (2002) Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 28–29
- Burkett VR, Suarez AG, Bindi M, Conde C, Mukerji R, Prather MJ, St. Clair AL, Yohe GW (2014) Point of departure. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 169-194.
- Buytaert W, Deckers J, Wyseure G (2006) Description and classification of nonallophanic Andosols in south ecuadorian alpine grasslands (paramo) *Geomorphology*, 73(3-4), 207–221
- Camargo MBP (2010) The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia*, 69(1), 239-247
- Campos JNB, de Carvalho Studart TM (2008): Drought and water policies in Northeast Brazil: backgrounds and rationale. *Water Policy*, 10(5), 425-438
- Cárdenas F, Cordero H, Devia C, Herrera J, Arenas H, Díaz D (2000) Desarrollo sostenible en los Andes de Colombia. *Provincias del Norte, Gutiérrez y Valderama* (Boyacá, Colombia) Pontificia Universidad Javeriana-Unión Europea. Bogotá, 301

- Carter MR, Sanderson JB (2001) Influence of conservation tillage and rotation length on potato productivity, tuber disease and soil quality parameters on a fine sandy loam in eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, 63(1-2), 1–13
- Cayambe J, Iglesias A, de Jalon S, Chuquillanqui C, Riga P (2015) Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, 111(2), 154–173
- Chadwick D, Sommer S, Thorman R, Fangueiro D, Cardenas L, Amon B, Misselbrook T (2011) Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 514–531
- Choquehuanca CD (2010) Hacia la reconstrucción del Vivir Bien. América Latina En Movimiento, ALAI 452, 6–13
- Chulde N (2005) Alternativas de manejo de gusano blanco *Premnotrypes vorax* H. en el cultivo de papa *Solanum tuberosum* L. bajo el sistema de labranza de huacho rozado. Carchi. Tesis Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni RB, Piao S, Thornton P (2013) Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 465–570.
- CIAT (2014) Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura en la región Andina de Ecuador. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Políticas en Síntesis No. 15. CIAT, Cali, Colombia. 6 p.
- CMNUCC (2007) Vulnerability and Adaptation To Climate Change In Small Island Developing States. UNFCC, 38 pp
- CMNUCC (2008) United Nation Framework Convention on Climate Change. Challenges and opportunities for mitigation in the agricultural sector: technical paper. Accessed July 28, 2016, Available at: <http://CMNUCC.int/resource/docs/2008/tp/08.pdf>
- CMNUCC (2015).United Nation Framework Convention on Climate Change.Adoption of the Paris Agreement.Conference of the parties.21st Session.Paris, 30 November A11 to 2015.
- CMNUCC (2016).United Nation Framework Convention on Climate Change.Greenhouse Inventory Data. Accessed September 1, 2016, Available at: http://CMNUCC.int.ghg_data
- Conant RT, Paustian K, Elliott ET (2001) Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11(2), 343–355
- Corazza EJ, Silva JE, Resck DVS, Gomes AC (1999) Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação á vegetação de Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 23(2), 425–432
- da Silva TGF, de Moura MSB, Sá IIS, Zolnier S, Turco SHN, Justino F, do Carmo JFA, de Souza LSB (2009) Impactos das mudanças climáticas na produção leiteira do estado de

- Pernambuco: análise para os cenários B2 e A2 do IPCC [Impacts of climate change on regional variation of milk production in the Pernambuco State, Brazil: analysis for the A2 and B2 IPCC scenarios]. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(4), 489-501.
- Davis, JL, Green JD, Reed A (2009) Interdependence with the environment: Commitment, interconnectedness, and environmental behavior. *Journal of Environmental Psychology* 29, 173–180
- de Oliveira Silva R, Barioni LG, Albertini TZ, Eory V, Topp CF, Fernandes FA, Moran D (2015) Developing a nationally appropriate mitigation measure from the greenhouse gas abatement potential from livestock production in the Brazilian Cerrado. *Agricultural Systems*, 140, 48–55
- de Souza Filho F, Brown CM (2009): Performance of water policy reforms under scarcity conditions: a case study in northeast Brazil. *Water Policy*, 11(5), 553-568
- Denton F, Wilbanks TJ, Abeysinghe AC, Burton I, Gao Q, Lemos MC, Masui T, O'Brien KL, Warner K (2014). Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1101-1131
- Dequiedt B, Moran D (2015) The cost of emission mitigation by legume crops in French agriculture. *Ecological Economics*, 110, 51–60
- Deressa TT, Hassan RM, Ringler C, Alemu T, Yusuf M (2009) Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global environmental change*, 19(2), 248-255.
- Derpsch R, Franzluebbbers AJ, Duiker SW, Reicosky DC, Koeller K (2014) Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil and Tillage Research*, 137, 16–22
- Devaux A, Ordinola ME, Hibon A, Flores FA (2010) El sector papa en la región andina: Diagnóstico y elementos para una visión estratégica (Bolivia, Ecuador y Perú) Centro Internacional de la Papa. Lima, Perú
- ECLAC (2010) The Economics of Climate Change in Central America: Summary 2010. LC/MEX/L.978, Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), Santiago de Chile, Chile, pp 144
- Ecoinvent Centre (2007) Ecoinvent data V2.0. Swiss Centre For Life Cycle Inventories.
- EEA (2012) Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2012, an Indicator Based Report. EEA Report No. 12/2012, European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark, 304 pp.
- Espinoza JC, Ronchail J, Frappart F, Lavado W, Santini W, Guyot JL (2013) The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 period: a focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), 1000-1008

- FAO (2008) New light on a hidden treasure. An end-of-year review. Roma, Italia. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2009) Food security and agricultural mitigation in developing countries: options for capturing synergies. FAO, Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations
- FAO, WFP, IFAD (2012) The State of Food Insecurity in the World 2012. Economic Growth is necessary but not Sufficient to Accelerate Reduction of Hunger and Malnutrition. Report by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), World Food Programme (WFP), and the International Fund for Agricultural Development (IFAD), FAO, Rome, Italy, 62 pp.
- FAO/IFIA (2001) Global estimates of gaseous emissions of NH₃ , NO and N₂O from agricultural land report. Food and Agriculture Organization/International Fertilizer Industry Association. Rome
- FAOSTAT (2016) Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. Food and Agricultural Commodities Production. Accessed July 27, 2016, Available at: <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>
- FAOSTAT (2017) Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. Food and Agricultural Commodities Production. Accessed July 27, 2016, Available at: <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>
- FEDEPAPA, M (2004) Guía ambiental para el cultivo de la papa. Federación colombiana de productores de papa y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia
- Follett RF (2001) Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. Soil and Tillage Research, 61(1-2), 77–92
- FONTAGRO (2017) Mejoramiento de los sistemas de producción animal con énfasis en la ganadería de leche en la Región Andina dentro del contexto de cambio climático. Proyecto consensuado FTG/RF-14653-RG. Washington, DC.
- Frame B (2005) Bhutan: a review of its approach to sustainable development. Development in Practice 15, 216–221.
- Franks J, Hadingham B (2012) Reducing greenhouse gas emissions from agriculture: Avoiding trivial solutions to a global problem. Land Use Policy, 29(4), 727–736
- García de Jalón S, Iglesias A, Quiroga S, Bardají I (2013) Exploring public support for climate change adaptation policies in the Mediterranean region: A case study in Southern Spain. Environmental Science & Policy, 29, 1-11
- Garnett T, Appleby MC, Balmford A, Bateman IJ, Benton TG, Bloomer P, Burlingame B, Dawkins M, Dolan L, Fraser D, Herrero M, Hoffmann I, Smith P, Thornton PK, Toulmin C, Vermeulen SJ, Godfray HCJ (2013) Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. Science, 341(6141), 33-34.
- Ghini R, Bettiol W, Hamada E (2011) Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. Plant Pathology, 60(1), 122-132

- Giraldo D, Juarez, H, Pérez W, Trebejo I, Yzarra W, Forbes G (2010) Severidad del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) en zonas agrícolas del Perú asociado con el cambio climático. *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)*, 2, 56-67
- Giri C, Ochieng E, Tieszen LL, Zhu Z, Singh A, Loveland T, Masek J, Duke N (2011) Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154-159
- Graves C (2006). La papa, tesoro de los Andes. De la agricultura a la cultura. 2da ed. Lima, Perú. Centro Internacional de la Papa. 210 p.
- Greenhalgh S, Daviet F, Weninger E (2006) Greenhouse Gas Protocol - The land use, land-use change, and forestry guidance for greenhouse gas project accounting. World Resources Institute
- Gudynas E (2011) Buen Vivir: Today's tomorrow. *Development* 54, 441–447.
- Hansen M, Potapov P, Moore R, Hancher M, Turubanova S, Tyukavina A, Thau D, Stehman S, Goetz ST, Loveland A, Kommareddy A, Egorov L, Chini C, Justice J, Townshend GR (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(2013), 850–3
- Harvey CA, Rakotobe ZL, Rao NS, Dave R, Razafimahatratra H, Rabarijohn RH, Rajaofara H, MacKinnon JL (2014) Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar. *Phil. Trans. R. Soc. B* 369: 20130089
- Haverkort AJ, Hillier JG (2011) Cool Farm Tool: Model description and performance of four production systems. *Potato Research*, 54(4), 355–369.
- Hecht SB, Saatchi SS (2007) Globalization and forest resurgence: changes in forest cover in El Salvador. *BioScience*, 57(8), 663-672
- Hertel TW, Burke MB, Lobell DB (2010) The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030. *Global Environmental Change*, 20(4), 577-585
- Hillier J, Walter C, Malin D, Garcia-Suarez T, Mila-i-Canals L, Smith P (2011) A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. *Environmental Modelling and Software*, 26(9), 1070–1078
- Howden SM, Soussana JF, Tubiello FN, Chhetri N, Dunlop M, Meinke H (2007) Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(50), 19691-19696
- Iglesias A, Garrote L (2015) Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management*, 155, 113-124
- Iglesias A, Garrote L, Quiroga S, Moneo M (2012) A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. *Climatic Change*, 112(1), 29-46
- Iglesias A, Medina F (2009) Consecuencias del cambio climático para la agricultura: ¿un problema de hoy o del futuro? *Revista española de estudios agrosociales y pesqueros*, 221, 45-70.
- Iglesias A, Quiroga S, Diz A (2011) Looking into the future of agriculture in a changing climate. *European Review of Agricultural Economics*, 38(3), 427-447

- Iglesias A, Quiroga S, Diz A (2011) Looking into the future of agriculture in a changing climate. *European Review of Agricultural Economics*, 38(3), 427-447
- INAMHI (2015) Anuario meteorológico año 2015. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Quito, Ecuador
- INEC (2016) Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua – ESPAC. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Quito, Ecuador. Accessed June 10, 2015, Available at: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-produccion-agropecuaria-continua/>
- Ingram J, Morris C (2007) The knowledge challenge within the transition towards sustainable soil management: An analysis of agricultural advisors in England. *Land Use Policy*, 24(1), 100–117
- INIAP (2003) Informe proyecto INIAP-PROMSA. Evaluacion socio-económica del sistema de labranza reducido “Huacho Rozado” frente a dos sistemas de labranza en el cultivo de papa, en la provincia del Carchi. Informe Tecnico Anual.INIAP. Ecuador
- IPCC (2006) Revised Good Practice Guidelines for Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Institute for Global Environmental Strategies, Tokyo. Accessed July 28, 2016, Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC (2007a) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon SD, Qin MM, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 747–846
- IPCC (2007b) Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri RK, Reisinger A (Eds.). Geneva, Switzerland, pp. 104
- IPCC (2007c) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon SD, Qin MM, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 747–846
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535
- IPCC (2014) Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32

- IUSS Working Group WRB (2014) World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome
- Jahan M, Hossain A, Sarkar M, Teixeira da Silva A, Ferdousi M (2016) Productivity impacts and nutrient balances of an intensive potato-mungbean-rice crop rotation in multiple environments of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 231, 79–97
- Jarvis A, Touval JL, Schmitz MC, Sotomayor L, Hyman GG (2010) Assessment of threats to ecosystems in South America. *Journal for Nature Conservation*, 18(3), 180–188
- Jones L, Boyd E (2011) Exploring social barriers to adaptation: Insights from Western Nepal. *Global Environmental Change* 21, 1262–1274
- Kasimir-Klemedtsson A, Klemedtsson L, Berglund K, Martikainen P, Silvola J, Oenema O (1997) Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management*, (13), 245–250
- Kendall A, Rodriguez A (2009) Desarrollo y perspectivas de los sistemas de andenería en los Andes Centrales del Perú. Institut français des études andines, Centro de estudios regionales andinos. Perú. pp 312
- Kjellström E, Nikulin G, Hansson U, Strandberg G, Ullerstig A (2011) 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus A, Series A*, 63A (1), 24–40, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00475.x
- Klein RJT, Huq S, Denton F, Downing TE, Richels RG, Robinson JB, Toth FL (2007) Interrelationships between adaptation and mitigation. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 745–777 Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Koga N, Tsuruta H, Tsuji H, N. H (2003) Fuel consumption-derived CO₂ emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 99(1–3), 213–219
- Kronik J, Verner D (2010) The Role of Indigenous Knowledge in Crafting Adaptation and Mitigation Strategies for Climate Change in Latin America. In: *The Social Dimensions of Climate Change: Equity and Vulnerability in a Warming World*. World Bank Publications, pp. 145–169
- Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623–1627
- Lal R (2013) Soil carbon management and climate change. *Carbon Management*, 4(4), 439–462
- Lavado CWS, Ronchail J, Labat D, Espinoza JC, Guyot JL (2012) Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 57(4), 625–642.
- Lentes P, Peters M, Holmann F (2010) Regionalization of climatic factors and income indicators for milk production in Honduras. *Ecological Economics*, 69(3), 539–552

- LINDO Systems (2003) LINDO 6.1. [Computer program] Chicago, Illinois. LINDO Systems Inc
- Lobell DB, Field CB (2007) Global scale climate - crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 14–21
- Lorenzoni I, Nicholson-Cole S, Whitmarsh L (2007). Barriers perceived to engaging with climate change among the UK public and their policy implications. *Global environmental change*, 17(3), 445-459.
- MacLeod M, Eory V, Gruère G, Lankoski J (2015) Cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation measures for agriculture: A Literature Review. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 89, OECD Publishing, Paris.
- MacLeod M, Moran D, Eory V, Rees RM, Barnes A, Topp CFE, Ball B, Hoad S, Wall E, McVittie A, Pajot G, Matthews R, Smith P, Moxey A (2010) Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK. *Agricultural Systems*, 103(4), 198–209
- MAGAP (2016a) Database. Información referencial de precios de agroquímicos que incluye ingredientes activos, nombres comerciales y presentaciones. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Quito, Ecuador. Accessed July 22, 2016, Available at: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/productos/precios-agroquimicos>
- MAGAP (2016b) Database. Precios de productos. Precios aplicados por los distintos niveles de la cadena de comercialización: productor, mercados mayoristas, almacenes agropecuarios. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Quito, Ecuador. Accessed July 22, 2016. Available at: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/index.php/mercados-bodega-camales-y-ferias>
- Magrin G, Gay García C, Cruz Choque D, Giménez JC, Moreno AR, Nagy GJ, Nobre C, Villamizar A (2007) Latin America. Climate Change 2007 Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Magrin GO, Marengo JA, Boulanger JP, Buckeridge MS, Castellanos E, Poveda G, Scarano FR, Vicuña S (2014) Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.
- Magrin GO, Travasso MI, Rodríguez GR, Solman S, Núñez M (2009) Climate change and wheat production in Argentina. *International Journal of Global Warming*, 1(1), 214-226.
- MAPAMA (2010). Estudio de la cadena de valor y formación de precios del sector de la patata fresca de consumo. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. España. Disponible en:

- http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/servicios/observatorio-de-precios-de-los-alimentos/ESTUDIO_PATATA_14112010_tcm7-182793.pdf
- MAPAMA (2014) Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos. [Land use and Crop Yields Survey] Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.
- MAPAMA (2016) Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos. [Land use and Crop Yields Survey] Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.
- Marengo JA, Alves LM, Soares WR, Rodriguez DA, Camargo H, Paredes Riveros M, Diaz Pablo M (2013) Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. *Journal of Climate*, 26(22), 9137-9154
- Marengo JA, Jones R, Alves LM, Valverde MC (2009) Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15), 2241-2255.
- Marengo JA, Tomasella J, Soares WR, Alves LM, Nobre CA (2012) Extreme climatic events in the Amazon basin: climatological and hydrological context of recent floods. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1-2), 73-85.
- McCarthy N, Lipper L, Branca G (2011). Climate-smart agriculture: smallholder adoption and implications for climate change adaptation and mitigation. *Mitigation of Climate Change in Agriculture Working Paper*, 3, 1-37
- Meehl GA, Covey C, McAvaney B, Latif M, Stouffer RJ (2005) Overview of the coupled model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(1), 89-93.
- Mendelsohn R, Dinar A, Williams L (2006) The distributional impact of climate change on rich and poor countries. *Environment and Development Economics*, 11(02), 159-178
- Messa H (2009) Balance de gases de efecto invernadero en un modelo de producción de ganadería doble propósito con alternativas silvopastoriles en Yaracuy. Thesis CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) Turrialba, Costa Rica
- Meza FJ, Silva D (2009) Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climatic Change*, 94(1-2), 143-156
- Meza FJ, Silva D, Vigil H (2008) Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*, 98(1), 21-30
- Michel-Guillou E, Moser G (2006) Commitment of farmers to environmental protection: From social pressure to environmental conscience. *Journal of Environmental Psychology* 26, 227-235.
- Milfont TL, Duckitt J (2004) The structure of environmental attitudes: A first and second order confirmatory factor analysis. *Journal of Environmental Psychology* 24, 289-303
- Montagnini F, Ibrahim M, Murgueitio E (2013) Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. *Bois et Forêts Des Tropiques*, 67(316), 3-16

- Monzon JP, Sadras VO, Abbate PA, Caviglia OP (2007) Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research*, 101(1), 44-52
- Moran D, MacLeod M, Wall E, Eory V, McVittie A, Barnes A, Rees RM, Topp CFE, Pajot G, Matthews R, Smith P, Moxey A (2011) Developing carbon budgets for UK agriculture, land-use, land-use change and forestry out to 2022. *Climatic Change*, 105(3-4), 529–553
- Moss RH, Edmonds J, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756
- Naranjo J, Cuartas C, Murgueitio E, Chará J, Rosales R, Barahona R (2012) Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia [Greenhouse gases in intensive silvopastoral systems with *Leucaena leucocephala* in Colombia]. *Livestock Research for Rural Development*, 24(8), 12
- NC-Ecuador (2011) 2nd National Communication about Climate Change to the CMNUCC. pp.241. Available at <http://CMNUCC.int/resource/docs/natc/ecunc2.pdf> Accessed April 2017
- Ngigi SN (2009) Climate Change Adaptation Strategies: Water Resources Management Options for Smallholder Farming Systems in Sub- Saharan Africa. The MDG Centre for East and Southern Africa, The Earth Institute at Columbia University, New York. 189
- Oenema O, Wrage N, Velthof GL, van Groenigen JW, Dolfing J, Kuikman PJ (2005) Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72(1), 51–65
- Olesen JE, Bindi M (2002) Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European journal of agronomy*, 16(4), 239-262
- Paladines O, Jacome C (1999) Informe Proyecto Red de Pastizales Andinos: Factores que determinan la producción primaria de los pastizales en el ecosistema húmedo altoandino de la Sierra en especial de la provincia del Carchi-Ecuador. Centro Internacional de la Papa. Ecuador
- Parry ML, Rosenzweig C, Iglesias A, Livermore M, Fischer G (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 53-67
- Patt A, Tadross M, Nussbaumer P, Asante K, Metzger M, Rafael J, Goujon A, Brundrit G (2010) Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 1333–1337
- Peters GP, Andrew RM, Boden T, Canadell JG, Ciais P, Le Quéré C, Marland G, Raupach MR, Wilson C (2013). The challenge to keep global warming below 2 C. *Nature Climate Change*, 3(1), 4-6
- Peterson T, Scott P, Herring S (2012) Explaining extreme events of 2011 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1041-1067

- Powlson DS, Stirling CM, Jat ML, Gerard BG, Palm CA, Sanchez PA, Cassman KG (2014) Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4(8), 678–683
- Priess JA, De Koning GHJ, Veldkamp A (2001) Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1-3), 269–279
- Proaño M, Paladines O (1998) Análisis de los sistemas agropecuarios de los pequeños y medianos productores de la cuenta del Río El Angel. Proyecto MANRECUR. FUNDAGROCIID. ISO 690. Carchi-Ecuador
- Pumisacho M, Sherwood S (2002) El cultivo de la papa en Ecuador. Quito, Ecuador. INIAP-CIP.
- Quintero M, Comerford NB (2013) Effects of conservation tillage on total and aggregated soil organic carbon in the Andes. *Open Journal of Soil Science*, 2013, 361–373
- Rayner S (2007) The rise of risk and the decline of politics. *Environmental Hazards* 7, 165–172.
- Reynolds T W, Bostrom A, Read D, Morgan MG (2010) Now What Do People Know About Global Climate Change? Survey Studies of Educated Laypeople. *Risk Analysis* 30, 1520–1538
- Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M (2016) Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609), 631–639
- Rueda G (2002) Optimización de los sistemas de producción mixtos: cultivos-ganadería en las comunidades campesinas de Molobog y Chuguín, provincia de Cañar. Thesis Escuela Politécnica del Ejército. Quito, Ecuador
- Rueda-Ayala V, Kunapuli S, Manguashca J (2016) Development of yield prediction models in the maize crop using spectral data for precision agriculture applications. *Ecuador es calidad - Revista Científica Ecuatoriana*, 2(1).
- Russell-Smith J, Whitehead P, Cooke P (2009) Culture, Ecology and Economy of Fire Management in North Australian Savannas: Rekindling the Wurrk Tradition. Csiro Publishing, 417 pp
- Sánchez B, Iglesias A, McVittie A, Álvaro-Fuentes J, Ingram J, Mills J, Lesschen JP, Kuikman PJ (2016) Management of agricultural soils for greenhouse gas mitigation: Learning from a case study in NE Spain. *Journal of environmental management*, 170, 37-49.
- Satyamurty P, da Costa CPW, Manzi AO, Candido LA (2013) A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1396-1401.
- Schuman GE, Janzen HH, Herrick JE (2002) Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 116(3), 391–396
- SENAMHI (2007) Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Urubamba para el Año 2100. Climate Change Scenarios in the Urubamba River Basin by 2100. Rosas, G., G. Avalos, A. Díaz, C. Oria, L. Metzger, D. Acuña, and R.M. San Martín (eds.). Parte del Proyecto Regional Andino de Adaptación (PRAA), como línea de base del proyecto

- “Adaptación al Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (Bolivia, Ecuador, Perú)”, auspiciado por el GEF a través del Banco Mundial, y coordinado por el CONAM, Ministerio de Ambiente (MINAM), Centro de Predicción Numérica (CPN), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Lima, Perú, 120 pp. (in Spanish).
- SENAMHI (2013) Impacto del cambio climático y medidas de adaptación para los cultivos de papa y maíz amiláceo en la subcuenca del río Shullcas, Junín. SENAMHI Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Lima, Perú
- Seo SN, McCarl BA, Mendelsohn R (2010) From beef cattle to sheep under global warming? An analysis of adaptation by livestock species choice in South America. *Ecological Economics*, 69(12), 2486-2494
- Seo SN, Mendelsohn R (2008) A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on South American Farms. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(1), 69–79
- Shah T, Lele U (2011) Climate Change, Food and Water Security in South Asia: Critical Issues and Cooperative Strategies in an Age of Increased Risk and Uncertainty. Synthesis of Workshop Discussions. A Global Water Partnership (GWP) and International Water Management Institute (IWMI) Workshop. Stockholm, Sweden, 1–47 pp
- Sharmila S, Joseph S, Sahai AK, Abhilash S, Chattopadhyay R (2015) Future projection of Indian summer monsoon variability under climate change scenario: An assessment from CMIP5 climate models. *Global and Planetary Change*, 124, 62-78
- Sheridan J, Longboat R (2006) The Haudenosaunee Imagination and the Ecology of the Sacred. *Space and Culture* 9, 365–381
- Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, K. P., & McCarl B, Ogle S, O’Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J (2008) Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789–813
- Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O’Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S (2007) Policy and Technology Constraints to Implementation of Greenhouse Gas Mitigation Options in Agriculture. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 118, 6–28
- Smith P, Powlson D, Glendining MJ, Smith JU (1997) Potential for carbon sequestration in European soils: Preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biology*, (1997), 67–79
- Smith, P (2012) Soils and climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 539–544
- Soto-Pinto L, Anzueto M, Mendoza J, Ferrer G, de Jong B (2009) Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 78(1), 39–51

- Stainforth DA, Aina T, Christensen C, Collins M, Faull N, Frame DJ, Kettleborough JA, Knight S, Martin A, Murphy JM, Piani C, Sexton D, Smith LA, Spicer RA, Thorpe AJ, Allen MR (2005) Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*, 433(7024), 403-406
- Steger C, Kotlarski S, Jonas T, Schär C (2013) Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics*, 41(3-4), 735- 754
- Stern N (2007) *The Economics of Climate Change: the Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge
- Stevens CJ, Fraser I, Mitchley J, Thomas MB (2007) Making ecological science policy-relevant: issues of scale and disciplinary integration. *Landscape Ecology*, 22(6), 799-809.
- Steyn JM, Franke AC, van der Waals JE, Haverkort AJ (2016) Resource use efficiencies as indicators of ecological sustainability in potato production: A South African case study. *Field Crops Research*, 199, 136-149.
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon FM, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson Delmotte B, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie SP (2013) Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker, TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Svubure O, Struik PC, Haverkort AJ, Steyn JM (2016) A quantitative framework for evaluating the sustainability of Irish potato cropping systems after the landmark agrarian reform in Zimbabwe. *Outlook on AGRICULTURE*, 45(1), 55-65.
- Swaminathan MS, Magoon ML (1961) Origin and cytogenetics of the commercial potato. *Advances in genetics*, 10, 217-256.
- Tapia A, Fries A (2007) *Guía de campo de los cultivos andinos*. Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Perú
- Taplin R, Uddin SN, Pibalsook K (2013) In: *Sustainable Development: Asia-Pacific Perspectives*. P.S. Low, (ed.), Cambridge University Press
- Tilman DA, Balzer CB, Hill JC, Befort BLA (2011) Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(50), 20260–20264
- Tomaselli I (2001) Latin America and the Caribbean. *Unasylva*, 52, 44-46
- Torres L (2011) *Identificación de oferta y demanda de innovaciones tecnológicas en un contexto de mercado con agricultores alto andino de baja escala. Caso CONPAPA, Ecuador*. Thesis Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador

- Travasso MI, Magrin GO, Rodríguez GR, Solman S, Núñez M (2009) Climate change impacts on regional maize yields and possible adaptation measures in Argentina. *International Journal of Global Warming*, 1(1-3), 201-213.
- Turrall H, Burke JJ, Faurès JM (2011) Climate change, water and food security. *FAO Water Reports* 36. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- UDAPA (2013) Evolución UDAPA. Álava, España. Disponible en: <https://www.dropbox.com/s/8gav39fn2wndiwv/EVOLUCI%C3%93N%20UDAPA.ppt> Último acceso 18 mayo de 2017.
- UNDP (2007) Human Development Report 2007/2008: Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World. United Nations Development Programme, New York, 384 pp
- UNEP (2003) Global Environment Outlook 3. United Nations Environment Programme. Earthscan, London, 446 pp
- UNEP, ECLAC (2010) Vital Climate Change Graphics for Latin America and the Caribbean. United Nations Environment Programme (UNEP)-Regional Office for Latin America and the Caribbean, Sustainable Development and Human Settlements Division of the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), and UNEP/GRID-Arendal, UNEP Regional Office for Latin America and the Caribbean, Panama City, Panama and ECLAC, Santiago, Chile, pp 42
- Urcola HA, Elverdin JH, Mosciaro MA, Albaladejo C, Manchado JC, Giussepucchi JF (2010) Climate change impacts on rural societies: stakeholders perceptions and adaptation strategies in Buenos Aires, Argentina. In: International Symposium, "Innovation and Societies: What kinds of agriculture? What kinds of innovation?" Proceedings of Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food (ISDA): 2010, June 28-July 1, 2010, Montpellier, France [Coudel, E., H. Devautour, C. Soulard, and B. Hubert (eds.)]. Organised by the Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), The French National Institute for Agricultural Research (INRA) and Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), CIRAD, Montpellier, France.
- van Vuuren DP, Isaac M, Kundzewicz ZW, Arnell N, Barker T, Criqui P, Berkhout F, Hilderink H, Hinkel J, Hof A, Kitous A, Kram T, Mechler R, Scricciu S (2011) The use of scenarios as the basis for combined assessment of climate change mitigation and adaptation. *Global Environmental Change*, 21(2), 575-591
- van Vuuren DP, Kriegler E, O'Neill BC, Ebi KL, Riahi K, Carter TR, Edmonds J, Hallegatte S, Kram T, Mathur R, Winkler H (2013) A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*, Special Issue, Nakicenovic N, Lempert R, Janetos A (eds) A Framework for the Development of New Socioeconomic Scenarios for Climate Change Research
- Vergara W, Fenhann JV, Schletz MC (2016) Carbono Cero América Latina -Una vía para la descarbonización neta de la economía regional para mediados de este siglo Documento de visión. UNEP DTU Partnership. Copenhagen, Denmark

- Villacís M (2008) Ressources en Eau Glaciaire dans les Andes d'Equateur en Relation avec les Variations du Climat: Le Cas du Volcan Antisana. Resources of Water Ice in the Andes of Ecuador in Relation to Climate Variations: The Case of Antisana Volcano. PhD Dissertation, Université Montpellier, Montpellier, France, 231 pp. (in French).
- Walther G (2010) Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365(1549), 2019-2024
- Weber EU, Stern PC (2011) Public understanding of climate change in the United States. *American Psychologist* 66, 315–328
- West TO, Marland G (2002) A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 91(1-3), 217–232
- Whittaker C, McManus MC, Smith P (2013) A comparison of carbon accounting tools for arable crops in the United Kingdom. *Environmental Modelling and Software*, 46, 228–239
- World Bank (2009) World Development Report 2010. Development and Climate Change. World Bank Washington
- Wreford A, Moran D, Adger N (2010). *Climate Change and Agriculture: Impacts, Adaptation and Mitigation*, OECD, Paris.
- WRI, C (2014) Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer. Washington, DC: World Resources Institute. Accessed July 14, 2016, Available at: <http://cait.wri.org/>
- Wright SJ, Samaniego MJ (2008) Historical, demographic, and economic correlates of land-use change in the Republic of Panama. *Ecology and Society*, 13(2), 17
- Xia L, Xia Y, Li B, Wang J, Wang S, Zhou W, Yan X (2016) Integrating agronomic practices to reduce greenhouse gas emissions while increasing the economic return in a rice-based cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 231, 24–33
- Yohe GW (2001) Mitigative capacity—the mirror image of adaptive capacity on the emissions side. *Clim Change* 49, 247–262
- Zangeneh M, Omid M, Akram A (2010) A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. *Energy*, 35(7), 2927–2933
- Zarate J (2002) Optimización económica de los sistemas de producción de medianos productores en el Alto Guanujo, provincia de Bolívar. Thesis Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador

Anexos

Anexo 1. Encuesta para productores de patata en España y Perú. 2013

CULTIVO DE PAPA

FORMATO DE INFORMACIÓN

A) INFORMACIÓN GENERAL

1. Lugar (País, Provincia, Cantón)
2. Año:
3. Clima: Temperatura media anual (°C) (si es que lo conoce)
4. Superficie de cultivo (ha)
5. Rendimiento en esta superficie en kg o toneladas (otra opción es mencionar el rendimiento por ha en kg/ha)
6. Cantidad de desecho (kg) si es que lo hay.
7. Producto terminado (Producto terminado = Rendimiento – Desecho)
8. Cantidad de semilla empleada (total en kg o toneladas) en toda la superficie de cultivo.

B) MANEJO DEL CULTIVO

1. Ciclo del cultivo (meses)
2. Textura del suelo
 - a. Fina
 - b. Media
 - c. Gruesa
3. Contenido de materia orgánica (%)
4. Humedad del suelo:
 - a. Suelo húmedo
 - b. Suelo seco
 Nota: Suelos de regadío, serán suelos húmedos
5. Drenaje del suelo:
 - a. Bueno
 - b. Malo
6. pH del suelo
7. Fertilizantes utilizados: llenar la siguiente tabla

Fertilizante	Nutriente producto	o	Cantidad	Unidad	Método de Aplicación

Los abonos a elegir son los siguientes:

- Bicarbonato de Amonio - 30% N
- Nitrato de amonio - 35% N
- Sulfato de amonio - 21% N
- Nitrato de amonio sulfato - 21% N
- Amoniaco anhidro - 82% N
- Nitrato de calcio y amonio -27% N
- Nitrato de calcio - 15% N
- Compuesto NK - 19,5% N, 29,5% K
- Compuesto NPK - 15% N, 15% P₂O₅, 15% K₂O
- Fosfato diamónico - 14% N, 44% P₂O₅
- Kainita / Sulfato de magnesio - 11% K₂O; 5% MgO
- Cal - 52% de CaO
- Piedra caliza - 55% CaCO₃ / 29% de CaO
- Cal, algas - 30% de CaO
- Fosfato monoamónico - 11% N, 52% P₂O₅
- Muriato de potasio / cloruro de potasio - 60% K₂O
- Fosfato / Roca Fosfatada - 25% P₂O₅
- Sulfato de potasio - 50% de K₂O, 45% SO₃
- Super fosfato - 21% P₂O₅

- Triple super fosfato - 48% P₂O₅
- Urea - 46,4% N
- Solución Urea Nitrato de amonio - 32% N
- Compost (cero emisiones) - 1% N
- Compost (producción totalmente aireado) - 1% N
- Compost (otros distintos de cero emisiones) - 1% N
- Estiércol de ganado - 0,6% N
- Estiércol de cerdo - 0,7% N
- Estiércol de Ovejas - 0,7% N
- Estiércol de Caballo - 0,7% N
- Estiércol de aves de corral - 1,9% N
- Desechos pollos y pavos - 3% N
- Estiércol líquido de Ganado - 0,26% N
- Purines - 0,36% N
- Separado purines - parte líquida - 0,36% N
- Separado purines - parte sólida - 0,5% N

Para el método de aplicación elegir entre:

- Aplicar en solución
- Al voleo
- Aplicado mediante inundación
- Incorporado al suelo
- Por goteo subsuperficial

La tabla deberá ser completada, por ejemplo así:

Fertilizante	Nutriente o producto	Cantidad	Unidad	Método de Aplicación
Nitrato de amonio - 35% N	N	300	kg/ha	Voleo, etc

8. Número de aplicaciones de pesticidas a la semilla:

Indicar el número de aplicaciones que se realice a la semilla.

Nota: En caso de utilizarse 2 o más pesticidas, la dosis de cada pesticida cuenta como una aplicación independiente.

Para aplicaciones fraccionadas, por ejemplo: dos aplicaciones a la mitad del ciclo de cultivo cuenta como una sola.

Si se realizan mezclas de pesticidas en un tanque, cuente cada plaguicida de la mezcla, como una aplicación independiente.

9. Tratamiento al suelo (Indicar las unidades)

Cantidad de Aldicarb, fostiazato o similar (Kg/ha)

10. Número de tratamientos de pesticida post-emergencia:

Nota: En caso de hacerlo manualmente, mencionarlo.

11. Qué hace con los residuos de cosecha (hojas, tallos, etc) , elegir entre las siguientes opciones:

- Son removidos y abandonados sin tratamiento en montones o pozos
- Removidos para realizar Compost con Aireación no Forzada
- Removidos para realizar Compost aireación forzada
- Abandonados en el terreno; Incorporados como mulch
- Quemados

- Exportados fuera de la finca

C) USO DE ENERGÍA

1. Qué tipo de combustible usa para las labores de arada, surcada, etc?

- Diésel
- Gasolina

2. Labor de Arada:

a) Si no conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, responder a las siguientes preguntas:

- Qué tipo de herramienta usa:
 - a) Arado de cincel
 - b) Subsolador
 - c) Arado de vertedera
- Número de operaciones (pasadas) con cada herramienta:

b) Si conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, llenar la siguiente tabla:

	Número de pasadas	Cantidad de Combustible utilizado (litros)
Arado de cincel		
Subsolador		
Arado de vertedera		
Otra herramienta (Cuál)		

3. Preparación del terreno:

a) Si no conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, responder a las siguientes preguntas:

- Qué tipo de herramienta usa:
 - a) Surcadora
 - b) Arado de discos
 - c) Arado de rodillo
 - d) Sembradora
- Número de operaciones (pasadas) con cada herramienta:

b) Si conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, llenar la siguiente tabla:

	Número de pasadas	Cantidad de Combustible utilizado (litros)
Surcadora		
Arado de discos		
Arado de rodillo		
Sembradora		
Otra herramienta (Cuál)		

4. Pulverización, esparcimiento

a) Si no conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, responder a las siguientes preguntas:

- Indicar el número de veces que realiza las siguientes labores:
- Pulverización de herbicida
 - Pulverización de fertilizante

- Esparcimiento de fertilizante
- Aplicación de estiércol

b) Si conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, llenar la siguiente tabla:

	Número de operaciones	Cantidad de Combustible utilizado (litros)
Pulverización de herbicida		
Pulverización de fertilizante		
Esparcimiento de fertilizante		
Aplicación de estiércol		
Otra actividad (cuál)		

5. Riego

a) Si no conoce la cantidad de combustible o energía utilizados durante el riego, responder las siguientes preguntas:

- Porcentaje del área irrigada (25, 50, 100%):
- Qué utiliza?:
 - a) Pivote:
 - b) Aspersor de impacto (gun rain)
 - c) Inundación
 - d) Goteo
- Profundidad de bombeo (5, 10, 20 metros, etc)
- Distancia de transporte horizontal del agua (tubería) (100, 500 metros, etc):
- Cantidad de agua aplicada a esta área (unidades: mm, cm, pulgadas):
- Tipo de energía utilizada para esta labor:
 - a) Diésel
 - b) Gasolina
 - c) Biodiesel
 - d) Bio-etanol
 - e) Red eléctrica
 - f) Hidroelectricidad
 - g) Energía solar
 - h) Energía eólica

b) Si conoce la cantidad de combustible o energía utilizados durante el riego, llenar la siguiente tabla:

	Cantidad	Unidades
Gasolina		Litros
Biodiesel		Litros
Biodiesel		Litros
Bioetanol		Litros
Red eléctrica		kwh
Hidroelectricidad		kwh
Energía solar		kwh
Energía eólica		kwh

6. Cosecha:

a) Si no conoce la cantidad de combustible que utiliza por cada labor, responder a las siguientes preguntas:

- Tipo de maquinaria que utiliza:
 - a) Cosechadora de papa
 - b) Hileradora de papa
- Número de operaciones realizadas por cada actividad:

Anexo 2. Encuesta aplicada a productores de la Región Andina

Tabla A2.1 Encuesta aplicada a productores en Carchi, Chimborazo, Cañar. Ecuador. 2014

P1. Composición familiar: Número de miembros del hogar							
P2. Tipo de cultivo							
Tipo de cultivo	Superficie	Topografía	Uso de la tierra	Rotación			
		1. Plano 2. Ondulado 3. Quebrado 4. Otro	1. Agricultura de secano 2. Agricultura con riego	Cuál ha sido el principal cultivo de cada uno de los lotes Empezar con el cultivo actual Código cultivos: 1. Papa solo 2. Pastos y papa			
P3. Papa: Producción de la última cosecha							
Cantidad de semilla (kg/ha)	Superficie sembrada (ha)	Cosecha total (kg/ha)	Venta (kg)	Consumo (kg)	Cantidad destinada para semilla (kg)	Costo total de producción (USD7ha)	
P4. Papa: Mano de Obra		Familiar		Contratada			
P5. Papa: Semillas y fertilización			Unidades	Cantidad	Costo unitario		
Semilla (variedad)							
Fertilización 1							
Fertilización 2							
Fertilización 3							
Abono orgánico							
P5. Papa: Equipos y servicios			Unidades de uso	Cantidad	Costo unitario		
Preparación del terreno							
Transporte de insumos							
Transporte de producto							
Movilización agricultor							
P5. Papa: Número de controles fitosanitarios							
P6. Pasturas: labores e insumos			Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total	
Arada			horas				
Rastra			horas				
Semillas			kg				
Siembra y tape			jornales				
Fertilizantes			kg				
Fertilización			jornales				
P7. Pasturas: mantenimiento	Superficie ha	Fertilización química tipo fertilizante Cantidad Frecuencia/año	Intervalo pastoreo	No. Días mismo potrero	No. animales	Duración potreros	
P8. Pasturas: inventario de animales							
Vacunos	Raza		No.	Peso animal kg			
Toros							
Bueyes							
Vacas secas							
Vacas leche							
Terneras menores 6 meses							
Fierros (6-12 meses)							
Vaonas 12-18 meses							
Vaonas vientres							

Terneros menores 6 meses					
Novillos de 6-12 meses					
Toretas de 12-24 meses					
Total					
P8. Pasturas: producción de leche	Producción Total (l/día)	Consumo Finca (l)	Venta (l)	Consumo animal (l)	
P8. Pasturas: alimentación de los terneros					
	Unidad de medida	Cantidad por día	Período/ frecuencia	Precio unitario	Categoría animales
Leche entera	l				
Balanceados	kg				
Sal común	g				
Sal mineral	g				
P9. Pasturas: alimentación de los bovinos adultos					
Balanceados	kg				
Sal común	g				
Sal mineral	g				
Suplemento	g

Figura A2. Encuestas a productores. Carchi, Ecuador [fotografía]. Cayambe, J. (2016)

Anexo 3. Modelado del margen neto con un modelo de optimización

Anexo 3.1 Especificación del modelo y variables

Función objetivo: maximizar beneficios (max Z) como la diferencia del margen bruto menos los costos variables con algunas restricciones, específicas para cada sistema y localidad (ver abajo).

Eq (A3.1)

$$Z = X_1 - 0.44 X_2 - 0.66 X_3 - 0.65 X_4 - 0.85 X_5 - 0.64 X_6 - 16.44 X_7 - 9.87 X_8 - 20 X_9 - 12 X_{10} - 15 X_{11} + 0 X_{12} - 0.42 X_{13} + 0.42 X_{14} + 0 X_{15} + 0 X_{16} + 84 X_{17} - 0.90 X_{18} - 0.55 X_{19} - 15 X_{20} + 0 X_{21} - 4.62 X_{22} - 0.65 X_{23} - 0.85 X_{24} - 0.64 X_{25} - 20 X_{26} - 15 X_{27} - 15 X_{28} - 15 X_{29} - 15 X_{30}$$

Tabla A3.2 Coeficientes del modelo y variables, valores y fuentes de datos

Variables del modelo	Descripción	Valor	Coefficiente del modelo	Descripción	Valor de coeficientes del modelo
	Variables para patata				
X ₁	Superficie de patata	Ha	A ₁	Ingresos por explotación promedio de 2.41 ha	6353 USD
X ₂	Autoconsumo	kg/explotación	A ₂	Precio por unidad	0.44 USD/kg
X ₃	Cantidad de semilla	Kg	A ₃	Precio por unidad	0.66 USD/kg
X ₄	Cantidad de fertilizante (N) urea	Kg	A ₄	Precio por unidad	0.65 USD/kg
X ₅	Cantidad de fertilizante (P2O5) DAP (18-46-00)	Kg	A ₅	Precio por unidad	0.85 USD/kg
X ₆	Cantidad de fertilizante (K2O) (muriato de potasio)	Kg	A ₆	Precio por unidad	0.64 USD/kg
X ₇	Cantidad de fungicida	Kg	A ₇	Precio por unidad	16.44 USD/kg
X ₈	Cantidad de insecticida	Kg	A ₈	Precio por unidad	9.87 USD/kg
X ₉	Horas de alquiler de maquinaria para labranza	Horas	A ₉	Precio por unidad	20 USD/hora
X ₁₀	Cantidad de fertilizante foliar	Kg	A ₁₀	Precio por unidad	12 USD/kg
X ₁₁	Mano de obra familiar	Día	A ₁₁	Precio por unidad	15 USD/día
	Variables producción de leche				
X ₁₂	Número de vacas	Número	A ₁₂	Supuesto: las vacas no se venden	0
X ₁₃	Leche para autoconsumo	Kg	A ₁₃	Precio por unidad	0.42 USD/kg
X ₁₄	Leche para la venta	Kg	A ₁₄	Precio por unidad	0.42 USD/kg
X ₁₅	Nacimiento de terneros	Número	A ₁₅	Supuesto: las terneras no se venden	0 USD/animal
X ₁₆	Terneros que permanecen en la explotación	Número	A ₁₆	Supuesto: las terneras no se venden	0 USD/animal

				venden	
X ₁₇	Terneros vendidos	Número	A ₁₇	Precio por terneros	84 USD/animal
X ₁₈	Cantidad de sal mineral		A ₁₈	Precio por unidad	0.90 USD/kg
X ₁₉	Cantidad de alimento suplementario	kg	A ₁₉	Precio por unidad	0.55 USD/kg
X ₂₀	Mano de obra familiar	Días	A ₂₀	Precio por unidad	15 USD/día
	Variables producción de pasto				
X ₂₁	Superficie de pastura	Ha	A ₂₁	Supuesto: el pasto no se vende	0
X ₂₂	Semilla de pasto	Kg	A ₂₂	Precio por unidad	4.62 USD/kg
X ₂₃	Cantidad de fertilizante (N) urea	Kg	A ₂₃	Precio por unidad	0.65 USD/kg
X ₂₄	Cantidad de fertilizante (P2O5) DAP (18-46-00)	Kg	A ₂₄	Precio por unidad	0.85 USD/kg
X ₂₅	Cantidad de fertilizante (K2O) (muriato de potasio)	Kg	A ₂₅	Precio por unidad	0.64 USD/kg
X ₂₆	Horas de alquiler de maquinaria para labranza	Horas	A ₂₆	Precio por unidad	20 USD/hora
X ₂₇	Mano de obra familiar	Días	A ₂₇	Precio por unidad	15 USD/kg
	Mano de obra contratada			Precio por unidad	
X ₂₈	Mano de obra contratada para papa	Días	A ₂₈	Precio por unidad	15 USD/día
X ₂₉	Mano de obra contratada para leche	Días	A ₂₉	Precio por unidad	15 USD/día
X ₃₀	Mano de obra contratada para pasto	Días	A ₃₀	Precio por unidad	15 USD/día

Fuente de datos: Barrera et al. 2010; Barrera et al. 2004; INEC 2016; INIAP 2003

Tabla A3.3 Restricciones del modelo para el sistema mixto patata-pasto

Restricciones			Definición
Patata			
X ₁	<=	2.41 ha	Superficie debe ser menor o igual que 2.41 ha
14439 X ₁	>=	1200	14439 kg / ha (rendimiento de patata) debe ser mayor o igual que 1200 kg (cantidad para autoconsumo)
X ₂	>=	1200	Autoconsumo debe ser mayor o igual 1200 kg/año
X ₃ - 1144.3 X ₁	>=	0	Semilla debe ser mayor o igual que 1144.3 kg/ha
X ₄ - 91.6 X ₁	>=	0	Fertilizante (N) debe ser mayor o igual que 91.6 kg/ha de urea
X ₅ - 906X ₁	>=	0	Fertilizante (P2O5) debe ser mayor o igual que 906 kg/ha de DAP (18-46-00)
X ₆ - 303 X ₁	>=	0	Fertilizante (K2O) debe ser mayor o igual que 303 kg/ha de muriato de potasio
X ₇ - 15 X ₁	>=	0	Fungicidas debe ser mayor o igual que 15 kg/ha
X ₈ - 3.5X ₁	>=	0	Insecticidas debe ser mayor o igual que 3.5 kg /ha
X ₉ - 8 X ₁	>=	0	Horas de tractor debe ser mayor o igual que 8 horas/ha
X ₁₀ - 16 X ₁	>=	0	Fertilizante foliar debe ser mayor o igual que 16 kg / ha (4 kg /ha /aplicación)
X ₃₀ + X ₁₁ - 128 X ₁	>=	0	Mano de obra contratada más mano de obra familiar debe ser mayor o igual que 108 días/ha/año
Producción de leche			
X ₁₂	<=	7.66	Hectáreas de pasto debe ser menor o igual que 7.66
X ₁₃	>=	730	Autoconsumo debe ser mayor o igual que 730 kg/año
X ₁₃ + X ₁₄ - 3650 X ₁₂	<=	0	Autoconsumo de leche más leche vendida debe ser menor o igual que 3650 kg/año
X ₁₅ - 0.70 X ₁₂	<=	0	Nacimiento de terneros debe ser menor o igual que 70% de animales nacidos

$X_{16} - 0.5 X_{15}$	$\geq$	0	Número de terneros que permanecen con el ganadero debe ser mayor o igual que 50% de animales nacidos
$X_{17} - 0.5 X_{15}$	$\leq$	0	Número de terneros vendidos debe ser menor o igual que el 50% de animales nacidos
$X_{18} - 62.05 X_{12} - 32.85 X_{16}$	$\geq$	0	Sal mineral utilizada debe ser mayor o igual que 62.05 kg (en vacas) más 32.85 kg (en terneros)
$X_{19} - 313.9 X_{12} - 146 X_{16}$	$\geq$	0	Alimento suplementario debe ser mayor o igual que 313.9 kg (en vacas) más 146 kg (en terneros)
$X_{31} + X_{20} - 15 X_{12}$	$\geq$	0	Mano de obra contratada más mano de obra familiar debe ser mayor o igual que 15 días/ha/año
Pasto			
$X_{22} - 44 X_{12}$	$\geq$	0	Semilla debe ser mayor o igual que 44 kg/ha
$X_{23} - 115 X_{12}$	$\geq$	0	Fertilizante (N) debe ser mayor o igual que 115 kg/ha
$X_{24} - 261 X_{12}$	$\geq$	0	Fertilizante (P_2O_5) debe ser mayor o igual que 261 kg/ha
$X_{25} - 100 X_{12}$	$\geq$	0	Fertilizante (K_2O) debe ser mayor o igual que 100 kg/ha
$X_{26} - 3.2 X_{12}$	$\geq$	0	Horas de tractor debe ser mayor o igual que 3.2 horas/ha
$X_{32} + X_{27} - 11 X_{12}$	$\geq$	0	Mano de obra contratada más mano de obra familiar debe ser mayor o igual que 11 días/ha/año
Restricciones generales			
$X_1 + X_{12}$	$\leq$	10.07	Superficie de patata más superficie de pasto debe ser menor o igual que 10.07 ha
$X_{11} + X_{20} + X_{27}$	$\leq$	1460	Mano de obra familiar para producción de patata, leche y pasto debe ser menor o igual que 1460 días/año (considering 4 people per family)

Fuente de datos: (Rueda 2002; Zarate 2002)

Anexo 4. Tasa de mitigación potencial y coste-efectividad de cada práctica

Tabla A4.1 Tasa de mitigación potencial y coste-efectividad de cada práctica

Prácticas Agrícolas	Caso de estudio	Tasa de mitigación potencial (tCO ₂ e·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Coste-efectividad (USD·tCO ₂ e ⁻¹)
Escenario base	Carchi	-	-
	Chimborazo	-	-
	Cañar	-	-
Gestión de suelos orgánicos	Carchi	0.07	-2550.61
	Chimborazo	0.11	-1068.44
	Cañar	0.01	-16301.26
Árboles forrajeros de usos múltiples	Carchi	0.17	-30.46
	Chimborazo	0.21	-8.823
	Cañar	0.07	-5.835
Manejo del estiércol	Carchi	0.24	-31.63
	Chimborazo	0.26	34.411
	Cañar	0.11	40.851
Manejo del pastoreo. Mejoramiento de pastos y fertilización	Carchi	0.49	37.63
	Chimborazo	0.64	21.91
	Cañar	0.13	133.63
Labranza reducida + Uso de residuos de cultivos	Carchi	0.43	-556.17
	Chimborazo	0.36	-448.75
	Cañar	0.18	-999.22
Manejo agronómico del cultivo	Carchi	0.37	-221.82
	Chimborazo	0.31	-84.76
	Cañar	0.13	-96.08
Manejo de nutrientes	Carchi	0.31	499.52
	Chimborazo	0.29	274.86
	Cañar	0.22	409.45

Referencias incluidas in el Anexo 4

Barrera V, Alwang J, Collaguazo E (2010). Análisis de la viabilidad socio-económica y ambiental del sistema de producción papapata-pasto en la microcuenca del río Illangama-Ecuador. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 18(1-2), 57–67

Barrera V, Grijalva J, León C (2004) Mejoramiento de los sistemas de producción de leche en la ecorregión andina del Ecuador. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 12(2), 43–51

INEC (2016) Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua – ESPAC. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Quito, Ecuador. Accessed June 10, 2015, Available at: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-produccion-agropecuaria-continua/>

- INIAP (2003) Informe proyecto INIAP-PROMSA. Evaluacion socio-económica del sistema de labranza reducido “Huacho Rozado” frente a dos sistemas de labranza en el cultivo de papa, en la provincia del Carchi. Informe Tecnico Anual.INIAP. Ecuador
- Rueda G (2002) Optimización de los sistemas de producción mixtos: cultivos-ganadería en las comunidades campesinas de Molobog y Chuguín, provincia de Cañar. Thesis Escuela Politécnica del Ejército. Quito, Ecuador
- Zarate J (2002) Optimización económica de los sistemas de producción de medianos productores en el Alto Guanujo, provincia de Bolívar. Thesis Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador