

West Indian avocado agroforestry systems in Montes de María (Colombia): a conceptual model of the production system

Sistemas agroforestales de aguacate antillano en Montes de María (Colombia): un modelo conceptual del sistema de producción

Oscar Burbano-Figueroa

University of Bonn, Center for Development Research (ZEF), Genscherallee 3,
Bonn, North Rhine Westphalia, C. P. 53113, GERMANY.

Corporación Colombiana de Investigaciones Agropecuarias (AGROSAVIA), Centro de Investigación Turipaná,
The Plant Interactions Laboratory. Via Montería - Cereté km 13, Cereté, Córdoba, C. P. 230558, COLOMBIA.
Corresponding author: burbano.figueroa1@gmail.com

Abstract

Montes de María is a subregion of the Colombian Caribbean made up of 15 municipalities in the states of Bolívar and Sucre. This subregion includes the plain zone bordering the Magdalena River, the coastal zone and the mountainous zone, the last of which is the main producer of West Indian avocado (*Persea americana* var. *americana*) in Colombia and groups more than 1,500 agricultural production units. West Indian avocado is produced in agroforestry systems in association with cocoa and yam plantations. In the last decade, a decrease in the avocado cultivated area associated with the occurrence of plant wilting symptoms has been observed. Multiple efforts have been made by different stakeholders in the region with the purpose of collecting information to understand the loss of cultivated areas and implement strategies to manage the production system. The aim of this review is to present an overview of avocado agroforestry production systems in Montes de María through conceptual models that allow identifying factors, components and relationships among components of the production system. The proposed conceptual model can be easily expanded to include new relationships or to describe existing ones in mathematical terms, allowing the development of probabilistic simulation models.

Keywords: avocado wilt, Colombian Caribbean, yam, cocoa, Montemariano avocado landraces.

Resumen

Montes de María es una subregión del Caribe colombiano que está conformada por 15 municipios de los estados Bolívar y Sucre. Esta subregión incluye las zonas de planicie a orillas del Magdalena, la zona litoral y la zona montañosa. Esta última es el principal núcleo productor de aguacate antillano (*Persea americana* var. *americana*) en Colombia y agrupa más de 1,500 unidades de producción agrícola. El aguacate antillano es producido en sistemas agroforestales en asociación con plantaciones de cacao y ñame. En la última década, se ha observado una disminución del área cultivada de aguacate asociada a la ocurrencia de síntomas de marchitamiento de la planta. Se han desarrollado múltiples esfuerzos de diferentes actores en la región, con el propósito de coleccionar información para comprender la pérdida de áreas de cultivo e implementar estrategias de manejo del sistema productivo. Esta revisión tiene como propósito presentar un panorama de los sistemas de producción agroforestales de aguacate en Montes de María mediante modelos conceptuales que permiten identificar los factores, los componentes y las relaciones entre componentes del sistema productivo. El modelo conceptual propuesto puede ser ampliado fácilmente para incluir nuevas relaciones o para describir las relaciones existentes en términos matemáticos, lo que permite el desarrollo de modelos de simulación probabilísticos.

Palabras clave: marchitamiento del aguacate, Caribe colombiano, ñame, cacao, aguacates criollos Montemarianos.



Introduction

The Montes de María (MM), also known as Serranía de San Jacinto, is an independent, low-elevation mountain range located near the Caribbean, north of the Colombian Andes (Figures 1, 2 and 3). MM is the main avocado producer in the Colombian Caribbean, and one of the major producers of West Indian avocado (*Persea americana* var. *americana*) in the country. Agricultural production in MM is concentrated in agroforestry systems where the association of avocado, cocoa and yam predominates. The production units resemble secondary forests with a prevalence of high (>15 m) and old avocado trees that are randomly distributed. Producers intervene minimally in the crop, with a predominant role as collectors and not as farmers. Agroforestry systems in MM are non-technified subsistence economies that use avocado as shade for other crops, fruit provision and as a secure source of money (DANE, 2015; Yabrudy-Vega, 2012a).

The Colombian armed conflict has led to the displacement and abandonment of farms in MM. In the long term, this process has limited the renewal and maintenance of avocado crops, resulting in a dramatic reduction in the planting area and production in the last decade (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2012; Observatorio del Programa Presidencial de Derechos Humanos y Derecho Internacional Humanitario [OPPDH-DIH], 2003). As a result, multiple studies and interventions have been carried out in the region with the aim of increasing avocado planting areas and production (OPPDH-DIH, 2003; Yabrudy-Vega, 2012a), as well as explaining the causes of the loss of these areas (Osorio-Almanza et al., 2017; Yabrudy-Vega, 2012b). However, most studies have mainly focused on avocado cultivation without attempting to fully understand the agroforestry system as a whole (Méndez-Prada, 2016; Yabrudy-Vega, 2012a, 2012b).

In these agroforestry systems, avocado is frequently associated with cocoa, coffee, citrus and other tropical fruits. The establishment and maintenance of avocado trees by farmers is influenced by socioeconomic and institutional factors, which affect not only the avocado crop, but also the entire production system. A similar scenario has been reported in the management of the system, where practices carried out in one crop affect the productivity of other crops (Biazin et al., 2016; Jagoret, Kwessey, Messie, Michel, & Malézieux, 2014; Schulz, Becker, & Gotsch, 1994; Simons & Leakey, 2004; Simons & Leakey, 2017; Smith, Fik, Alvim, Falesi, & Serrão, 1995; Tschardt et al., 2011).

A practical approach to understanding the avocado agroforestry system in the Colombian Caribbean is the use of conceptual models. This approach allows structuring the information in order to identify

Introducción

Los Montes de María (MM), o también conocidos como Serranía de San Jacinto, es un conjunto montañoso independiente de baja altura localizado cerca del Caribe, al norte de los Andes Colombianos (Figuras 1, 2 y 3). MM es el principal productor de aguacate en el Caribe colombiano, y uno de los grandes productores de aguacate antillano (*Persea americana* var. *americana*) en el país. La producción agrícola en MM está concentrada en sistemas agroforestales donde predomina la asociación de aguacate, cacao y ñame. Las unidades de producción se asemejan a bosques secundarios con prevalencia de árboles de aguacate altos (>15 m) y viejos que están distribuidos de manera aleatoria. Los productores ejercen una intervención mínima en el cultivo, con un rol preponderante como colectores y no como agricultores. Los sistemas agroforestales en MM son economías de subsistencia no tecnificadas que utilizan el aguacate como sombra para otros cultivos, provisión de frutos y como una fuente segura de dinero (DANE, 2015; Yabrudy-Vega, 2012a).

El conflicto armado colombiano ha provocado desplazamiento y abandono de las fincas en MM. En el largo plazo, este proceso ha limitado la renovación y mantenimiento de los cultivos de aguacate, lo que resulta en la dramática reducción del área de siembra y producción en la última década (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2012; Observatorio del Programa Presidencial de Derechos Humanos y Derecho Internacional Humanitario [OPPDH-DIH], 2003). Por ello, se ha desarrollado múltiples estudios e intervenciones en la región con el propósito de incrementar las áreas de siembra y la producción de aguacate (OPPDH-DIH, 2003; Yabrudy-Vega, 2012a), además de explicar las causas de la pérdida de dichas áreas (Osorio-Almanza et al., 2017; Yabrudy-Vega, 2012b). Sin embargo, la mayoría de los estudios han concentrado sus esfuerzos en el cultivo de aguacate sin comprender a fondo el sistema agroforestal en su conjunto (Méndez-Prada, 2016; Yabrudy-Vega, 2012a, 2012b).

En estos sistemas agroforestales, el aguacate está frecuentemente asociado con cacao, café, cítricos y otros frutos tropicales. El establecimiento y mantenimiento de los árboles de aguacate por parte de los agricultores está influenciado por factores socioeconómicos e institucionales, que no solo afectan al cultivo del aguacate, sino al sistema de producción global. Se ha reportado un escenario similar en el manejo del sistema, donde las prácticas efectuadas en un cultivo afectan la productividad de otro (Biazin et al., 2016; Jagoret, Kwessey, Messie, Michel, & Malézieux, 2014; Schulz, Becker, & Gotsch, 1994; Simons & Leakey, 2004; Simons & Leakey, 2017; Smith, Fik, Alvim, Falesi, & Serrão, 1995; Tschardt et al., 2011).

components, relationships and subsystems, being useful to understand the different environmental and agricultural scenarios in which agroforestry systems occur. Consequently, the aim of this paper is to present a comprehensive overview of MM's avocado agroforestry production systems, without neglecting the environmental and socioeconomic limitations of the region. The development of this objective implies compiling information on the production system, most of which corresponds to institutional reports, and synthesizing this information in a framework that facilitates its understanding and analysis. The purpose of this exercise is to offer a general conceptual framework to guide future actions, where new conceptual models of the subsystems can be developed in such detail that they allow the implementation of mathematical equations and the development of probabilistic simulations.

Materials and methods

Two procedures were carried out to obtain the information: 1) a literature review by searching for information with keywords and 2) construction of a conceptual model of the avocado agroforestry production system. The documents found were organized independently in each procedure. The automatic literature search of the first procedure was complemented with a cluster analysis of authors to identify the most recurrent research topics, usually associated with specific institutions. In the case of the conceptual model, its construction led to specific searches that allowed describing relationships among system components.

Collection and analysis of documents associated with avocado production in Montes de María

The 354 documents obtained were automatically collected with the keywords "Montes de María" and "aguacate", the latter being the Spanish word for avocado, as a search string in Google Scholar. These documents were manually reviewed to select them as part of the references to be consulted and uploaded to the F1000 Workspace reference management software package, this considering that a large majority are institutional reports without available metadata (gray literature). The attached documents were filtered again by the term "Montes de María," and the resulting database was analyzed by the VOSviewer program to identify the author clusters on which this review focused (Figure 1).

Description of the study area

The MM region was described in geographical and political terms, including a description of its geological features. This description is necessary for explaining

Una aproximación práctica para entender el sistema agroforestal de aguacate en el Caribe colombiano es el uso de modelos conceptuales. Este enfoque permite estructurar la información con el fin de identificar componentes, relaciones y subsistemas, siendo útil para entender los diversos escenarios ambientales y agrícolas en el que se encuentran los sistemas agroforestales. Consecuentemente, el objetivo de este artículo es presentar un panorama comprensible de los sistemas de producción agroforestales de aguacate de MM, sin dejar de lado las limitantes ambientales y socioeconómicas de la región. El desarrollo de este objetivo implica recopilar información sobre el sistema de producción, que en su mayoría corresponde a reportes institucionales, y sintetizar dicha información en un marco que facilite su comprensión y análisis. El propósito de este ejercicio es ofrecer un marco conceptual general para orientar futuras acciones, donde nuevos modelos conceptuales de los subsistemas puedan ser desarrollados a tal detalle que permitan la implementación de ecuaciones matemáticas y el desarrollo de simulaciones probabilísticas.

Materiales y métodos

Para obtener la información se realizaron dos procedimientos: 1) revisión de literatura mediante búsqueda de información con palabras claves y 2) construcción de un modelo conceptual del sistema de producción agroforestal de aguacate. La organización de los documentos encontrados se desarrolló de manera independiente en cada procedimiento. La búsqueda automática de literatura del primer procedimiento se complementó con análisis de clúster de autores para identificar los temas más recurrentes de investigación, asociados usualmente a instituciones específicas. En el caso del modelo conceptual, su construcción condujo a búsquedas específicas que permitieron describir relaciones entre componentes del sistema.

Colección y análisis de documentos asociados a la producción de aguacate en Montes de María

Los 354 documentos obtenidos se colectaron de manera automática con las palabras clave "Montes de María" y "aguacate" como cadena de búsqueda en Google Scholar. Estos documentos se revisaron manualmente para seleccionarlos como parte de las referencias a ser consultadas y anexadas al paquete informático de gestión de referencias F1000 Workspace, esto considerando que una gran mayoría son reportes institucionales sin metadatos disponibles (literatura gris). Los documentos anexados se filtraron nuevamente por el término "Montes de María", y la base de datos resultante se analizó mediante el programa VOSviewer para identificar los clústers de autores, sobre los cuales se centró esta revisión (Figura 1).

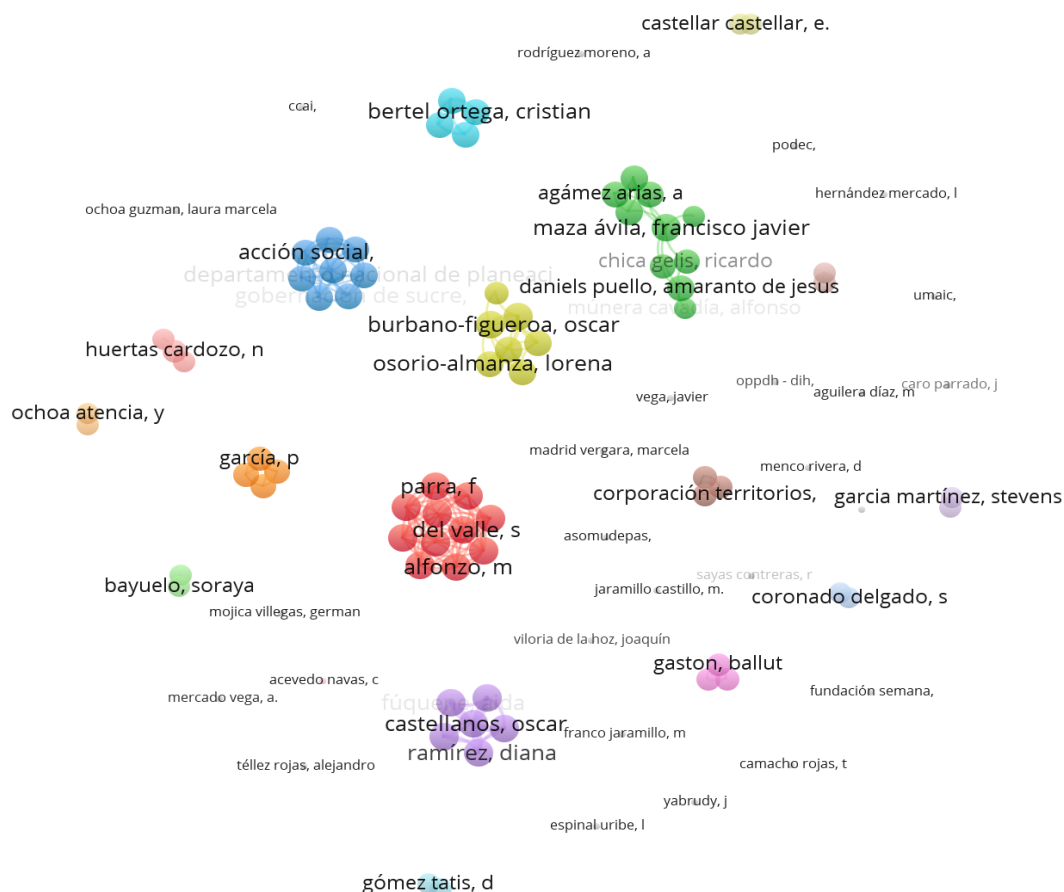


Figure 1. Clusters of authors who conducted studies on the avocado production system in the Montes de María region.
Figura 1. Clústers de autores que han desarrollado estudios del sistema de producción de aguacate en la región de Montes de María.

the lack of consensus between the geographic and geological definition of the MM region and the politic-administrative denomination that includes nearby municipalities with small or no territories in the region.

Conceptual model of avocado production systems in Montes de María

Model construction. The objective is to represent at production unit-scale the limitations and interchange that occur at the local level. The construction of the model was based on the protocol developed by Lamanda et al. (2012), of which the first two steps were executed: 1) structural analysis, definition of the limits of the model and elements, and 2) functional analysis of the processes among the identified elements. This first version of model is a general one does not contain spatial or temporal descriptions of the production units.

Model components. Components were divided into three categories: 1) environmental (climate and soil) and socioeconomic factors that affect the system,

Descripción del área de estudio

El área de MM se describió en términos geográficos y políticos, incluyendo una descripción del carácter geológico. Lo anterior es necesario debido a las diferencias en la distribución geográfica de MM, asociadas a la formación geológica y la designación política que incluye municipios cercanos con poca o ningún área en la zona.

Modelo conceptual de los sistemas de producción de aguacate en Montes de María

Construcción del modelo. El objetivo es representar a escala de la unidad productiva las limitaciones e intercambio que ocurren a nivel local. La construcción de este modelo se basó en una metodología desarrollada por Lamanda et al. (2012), de la cual se ejecutaron los primeros dos pasos: 1) análisis estructural, definición de los límites del modelo y elementos, y 2) análisis funcional de los procesos entre los elementos identificados. Esta primera aproximación es de carácter general y no contiene descripciones espaciales o temporales de las unidades de producción.

2) production unit or farm that represents the biophysical system, and 3) system performance indicator variables, represented by production and income (Lamanda et al., 2012) (Figure 2a and 2b).

Componentes del modelo. Se dividieron en tres categorías: 1) factores ambientales (clima y suelo) y socioeconómicos que afectan al sistema, 2) unidad de producción o finca que representa el sistema biofísico,

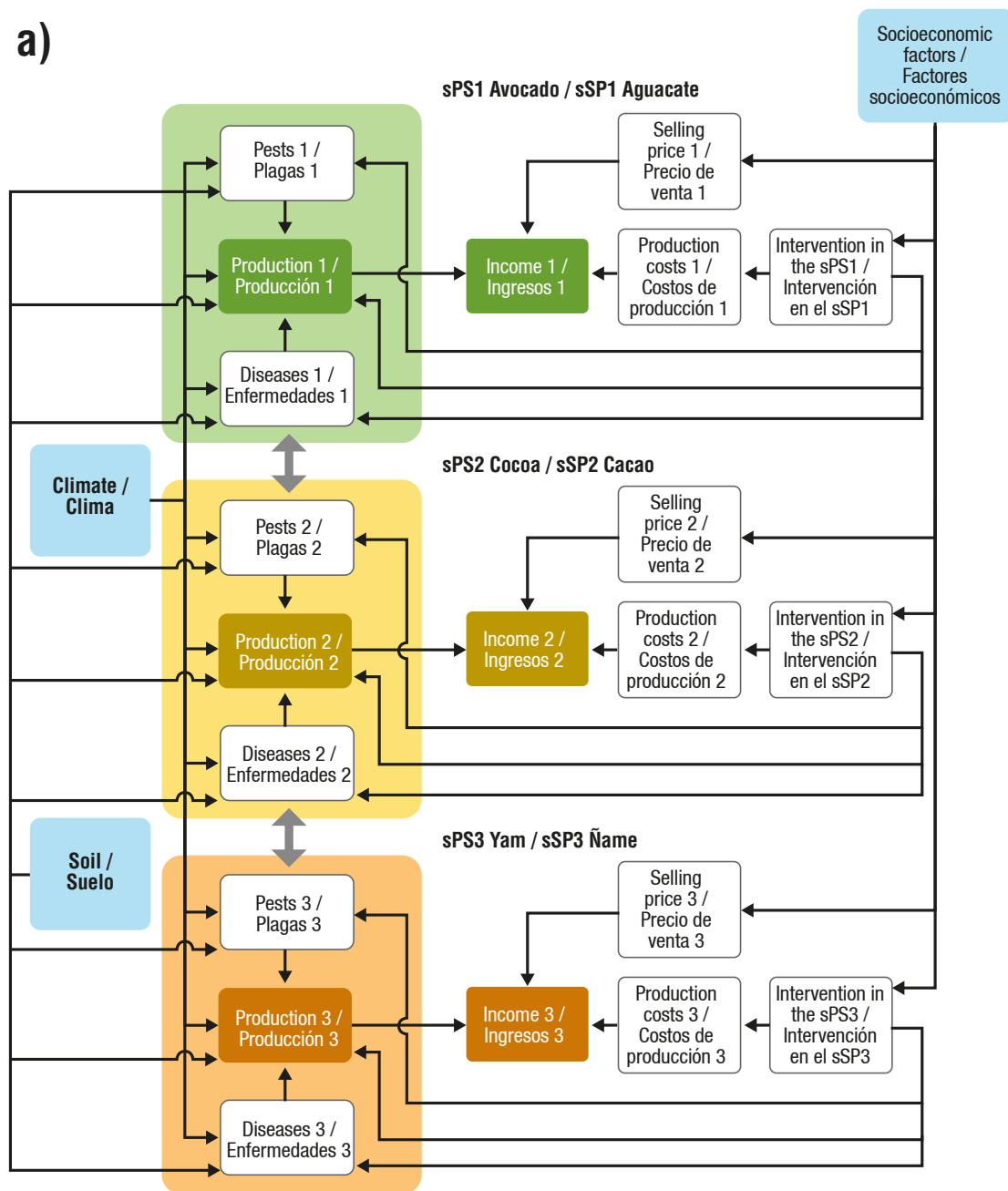


Figure 2a. Conceptual model of the avocado agroforestry production system in Montes de María: description of the three most important sub-production systems (sPS) (avocado [sPS1], cocoa [sPS2] and yam [sPS3]), environmental and socioeconomic factors, and performance indicators of the production system (production and income).

Figura 2a. Modelo conceptual del sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María: a) descripción de los tres subsistemas de producción (sSP) más importantes (aguacate [sSP1], cacao [sSP2] y ñame [sSP3]), factores ambientales y socioeconómicos, e indicadores de desempeño del sistema productivo (producción e ingresos).

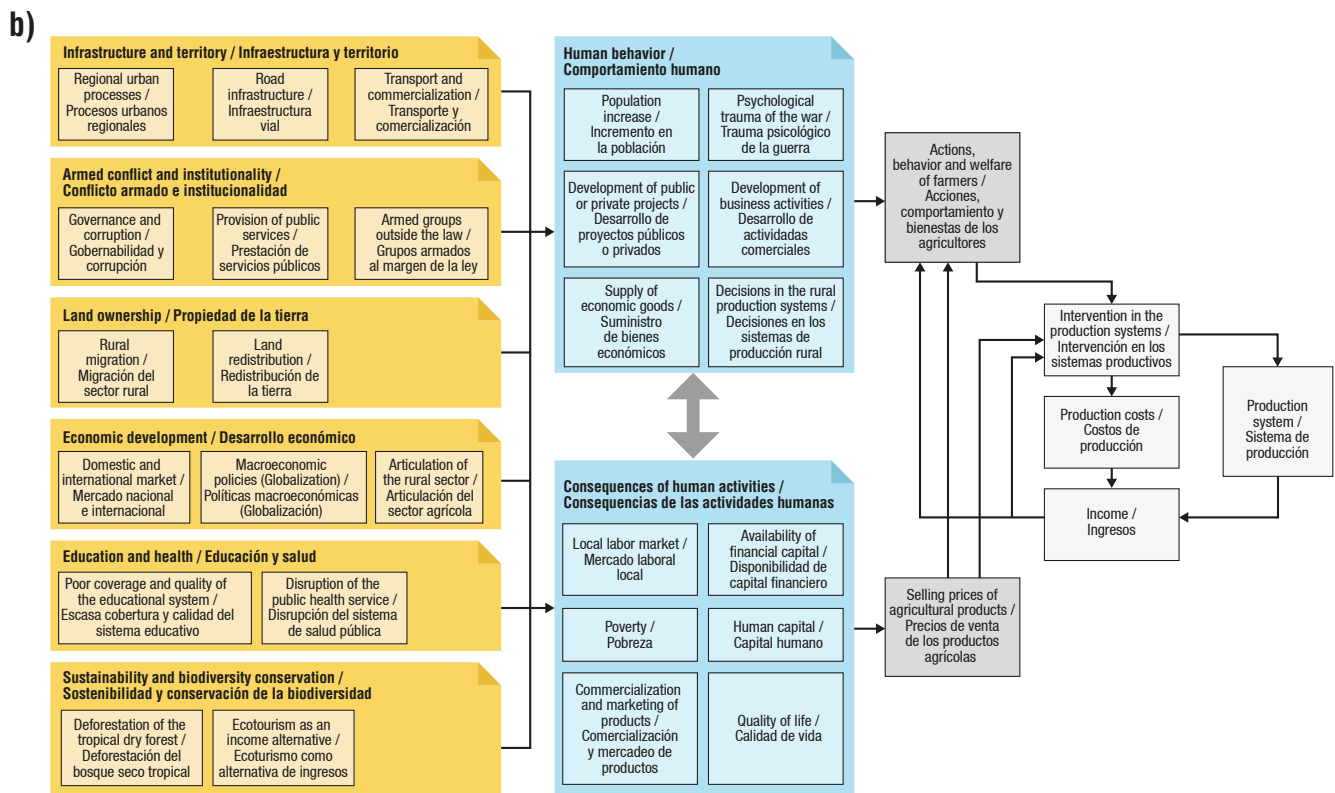


Figure 2b. Conceptual model of the avocado agroforestry production system in Montes de María: detail of the influence of socioeconomic factors on the production system through two components: I) actions, behavior and welfare of the farmers and II) selling price of agricultural products.

Figura 2b. Modelo conceptual del sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María: b) detalle de la influencia de los factores socioeconómicos en el sistema de producción a través de dos componentes: I) acciones, comportamiento y bienestar de los agricultores y II) precio de venta de los productos agrícolas.

The avocado agroforestry system's production unit is represented by the sum of its three subsystems (avocado, cocoa and yam) and three components that define each subsystem (production, pests and disease) (Figure 2a). The last of these components has played a critical role in limiting the production system and has been the focus of intervention efforts in the past decade. The number of subsystems may increase to reflect all possible variations, but has been limited to the three of greatest economic importance.

In addition, management practices and public and private actions implemented in the region have been included in the component called interventions in the production system. The description of each component is based on the literature review, but the broad definition presented can easily be expanded to include more details relevant to the subsystems or to particular interactions among components.

Finally, the system's output variables, or performance indicators, have been limited to productive aspects and farmers' income. However, this does not mean that this model proposal cannot be extended to include ecosystem performance variables.

and 3) variables of indicators of the performance of the system, represented by production and income (Lamanda et al., 2012) (Figure 2a and 2b).

The production unit of the agroforestry system of avocado cultivation in Montes de María is represented by the sum of its three subsystems (avocado, cocoa and yam) and three components that define each subsystem (production, pests and diseases) (Figure 2a). These last have played a critical role as limiters of the production system and have been the focus of intervention efforts in the last decade. The number of subsystems can be increased to reflect all possible variations, but has been limited to the three of greatest economic importance.

Additionally, management practices and public and private actions implemented in the region, in the component called interventions in the production system. The description of each component is based on the literature review, but the broad definition presented can be easily expanded to include more details relevant to the subsystems or to particular interactions between components.

Functional analysis. The components and the relationships among them were estimated from the available literature using specific search strings to find detailed information on the relationships (Table 1). The functional analysis describes the general effects of climate, soil, socioeconomic factors and the specific relationships of the remaining components for each sub-production system (sPS) (Appendices).

The relationship of socioeconomic factors to the production system was established from two classes of components representing the socioeconomic dimensions of human behavior and the consequences of human activities (Collins et al., 2011; Gardner et al., 2013).

Finalmente, las variables de salida del sistema, o indicadores de desempeño, han sido limitadas a los aspectos productivos e ingresos para los agricultores. Sin embargo, esto no limita que esta propuesta de modelo pueda ser extendida para incluir variables de desempeño ecosistémicas.

Análisis funcional. Los componentes y las relaciones entre estos se estimaron a partir de la bibliografía disponible mediante cadenas de búsquedas específicas para encontrar información detallada de las relaciones (Cuadro 1). El análisis funcional describe los efectos generales del clima, el suelo, factores socioeconómicos y las relaciones específicas de los componentes restantes para cada subsistema de producción (sSP) (Anexos).

Table 1. Description of the environmental factors affecting the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean.

Cuadro 1. Descripción de los factores ambientales que afectan el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano.

Environmental factors/ Factores ambientales	Description of the factor and interaction with the production system/ Descripción del factor e interacción con el sistema productivo	Reference/ Referencia
Climate/ Clima	<p>Tropical savannah with dry winters¹ (Aw) influenced by MM's elevational variations. Bimodal distribution of rainfall and average temperature of 27 °C.</p> <p>Rainfall distribution defines the yam planting season and the establishment of new avocado and cocoa areas. In the higher elevation areas, yams are planted between November and December, while in the lower areas, yams, avocados and cocoa are established between April and May./</p> <p>Sabana tropical con invierno¹ seco (Aw) influenciada por las variaciones altitudinales de MM. Distribución bimodal de lluvias y temperatura promedio de 27 °C.</p> <p>La distribución de lluvias define la época de siembra del ñame y el establecimiento de nuevas áreas de aguacate y cacao. En las áreas de mayor altitud, el ñame se siembra entre noviembre y diciembre, mientras que en las áreas más bajas, el ñame, el aguacate y el cacao se establecen entre abril y mayo.</p>	Aguilera-Díaz, Reina-Aranza, Orozco-Gallo, Yabrudy-Vega, & Barcos-Robles (2013); IDEAM (2018).
Soil/ Suelo	<p>Soils in MM exhibit contrasting spatial differences in terms of characteristics associated with Ca, S, Na, clay and P - organic matter contents. The main variation factor is pH and Ca content. Locations in the municipality of Ovejas exhibit pH values higher than 8, while in Carmen de Bolívar pH soil values are around 5.5.</p> <p>Some soil characteristics exhibit a relationship with avocado wilt (<i>Phytophthora cinnamomi</i>): Ca-pH are positively associated with this disease while P-organic matter are negatively associated./</p> <p>Los suelos en MM exhiben diferencias contrastantes a nivel espacial en cuanto a características asociadas a contenidos de Ca, S, Na, arcilla y P - materia orgánica. El factor principal de variación es el pH y el contenido de Ca. Las localidades del municipio de Ovejas exhiben valores de pH superiores a 8, mientras que en Carmen de Bolívar alcanzan valores de 5.5.</p> <p>La relación de los componentes del suelo que están asociados con el marchitamiento del aguacate (<i>Phytophthora cinnamomi</i>) son: Ca-pH asociados positivamente y P-materia orgánica asociados negativamente.</p>	Burbano-Figueroa, Romero-Ferrer, & Moreno-Moran (2019)

¹Season with the shortest days and lowest sun on the horizon.

¹Temporada con los días más cortos y sol más bajo en el horizonte.

Results and discussion

Description of the Montes de María subregion

MM is a low-elevation mountain range covering a 2,677 km² area, located in the states of Bolívar and Sucre, Colombia, and is part of the San Jacinto fold belt, without any geological or geographical relationship with the Andes. The highest peaks in MM are the Cerro Maco (800 masl), El Cerro de la Cansona (420 masl) and the Loma de la Pita (620 masl) (Figure 3). The San Jacinto fold belt is often called the Serranía de San Jacinto, and includes the mountain systems to the west of the Romeral Suture (whose geological substrates are mainly of volcanic origin): the Serranía de San Jerónimo, the Serranía de Coraza and the MM.

MM soils are derived from Miocene sandy, clayey, and limestone basements and rock formations of marine origin (Bacca, Hernández-Pardo, & Vásquez-Ávila, 2010; Caro & Spratt, 2003; Dueñas-Jiménez & Gómez-González, 2013; Flinch, 2003; Mora-Bohórquez et al., 2017; Parra, 2016). MM has a tropical savanna climate with dry winters (Aw) and contains abundant remnants of tropical dry forest (Galván-Guevara, Sierra, Gómez, de la Ossa, & Fajardo-Patiño, 2009; Instituto Alexander von Humboldt [IAVH], 1998). It exhibits an average annual temperature of 27 °C and a bimodal rainfall pattern with annual precipitation of 1,000 to 1,200 mm and dry periods between June-July and December-

La relación de los factores socioeconómicos con el sistema productivo se estableció a partir de dos clases de componentes que representan las dimensiones socioeconómicas del comportamiento humano y las consecuencias de las actividades humanas (Collins et al., 2011; Gardner et al., 2013).

Resultados y discusión

Descripción de la subregión Montes de María

MM es una cadena de montañas de baja altura con un área de 2,677 km², ubicada en los estados Bolívar y Sucre, Colombia, y forma parte del cinturón de plegamiento San Jacinto, sin ninguna relación geológica o geográfica con los Andes. Los picos de mayor altura en MM son el Cerro Maco (800 msnm), El Cerro de la Cansona (420 msnm) y la Loma de la Pita (620 msnm) (Figura 3). El cinturón de plegamiento San Jacinto es con frecuencia denominado Serranía de San Jacinto, e incluye los sistemas montañosos al occidente de la Sutura del Romeral (cuyos basamentos son de origen volcánico básico): la Serranía de San Jerónimo, la Serranía de Coraza y los MM.

Los suelos de MM son derivados de mantos arenosos, arcillosos y de rocas calizas del Mioceno con formaciones rocosas de origen marino (Bacca, Hernández-Pardo, & Vásquez-Ávila, 2010; Caro & Spratt, 2003; Dueñas-Jiménez & Gómez-González, 2013; Flinch, 2003; Mora-Bohórquez

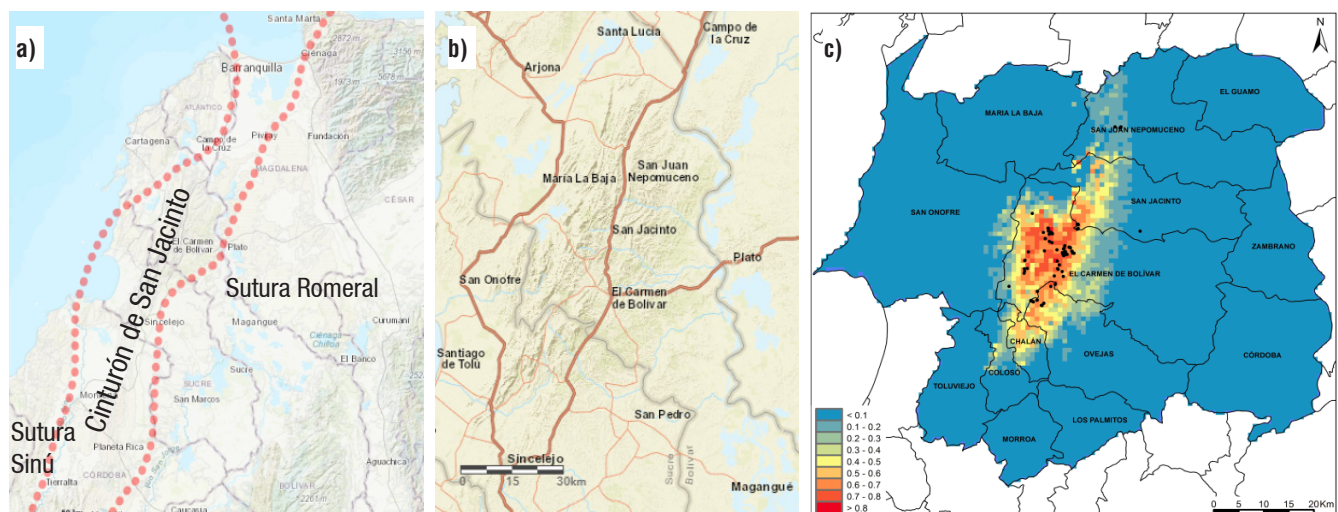


Figure 3. Geographical description of the Montes de María region and the avocado producing area: a) geological territory of the San Jacinto fold belt delimited by the Romeral Suture and the Sinú Suture (Caro & Spratt, 2003; Toto & Kellogg, 1992), b) relief and roads of the Montes de María subregion (ESRI, 2018) and c) distribution of avocado production areas in the Montes de María municipalities estimated with the maximum entropy algorithm (Osorio-Almanza et al., 2017).

Figura 3. Descripción geográfica de la región Montes de María y el área productora de aguacate: a) territorio geológico del cinturón de plegamiento San Jacinto delimitado por la Sutura del Romeral y la Sutura del Sinú (Caro & Spratt, 2003; Toto & Kellogg, 1992) y b) relieve y carreteras de la subregión Montes de María (ESRI, 2018) y c) distribución de áreas de producción de aguacate en los municipios de Montes de María estimadas con el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt) (Osorio-Almanza et al., 2017).

February (Aguilera-Díaz et al., 2013; Kottek, Grieser, Beck, Rudolph, & Rubel, 2006; IDEAM, 2018). The MM watersheds belong to the Magdalena and San Jorge river systems (FUNCICAR, 2015).

In political-administrative terms, the Montes de María subregion is made up of 15 municipalities belonging to two states: El Carmen de Bolívar, San Jacinto, San Juan Nepomuceno, El Guamo, María la Baja, Zambrano, Córdoba (Bolívar), Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Colosó, Chalán, Tolviejo, San Onofre and San Antonio de Palmito (Sucre), which together cover a 6,297 km² area (Figure 3). Additionally, the MM administrative subregion is divided into three zones: 1) a plain on the banks of the Magdalena River where the municipalities of Guamo, Zambrano and Córdoba are located. Geologically speaking, this plain does not belong to the MM system, but to the formation to the east of the Romeral Suture. 2) The mountainous zone and 3) The coastal zone. The last two are part of the San Jacinto fold belt with the avocado crops located in the mountainous area. The MM rural development area and MM consolidation zone are designations equivalent to the MM subregion previously described, with the exception of the municipality of Corozal included in 2012 in the MM consolidation zone. The administrative declaration as a subregion facilitates the joint development of actions between the governments of Bolívar and Sucre (Aguilera-Díaz et al., 2013).

Agroforestry systems for avocado production in Montes de María

Origin and establishment

Avocado agroforestry systems in MM began in the 1940s with the planting of avocado landraces that serve as shade for the coffee orchards. Back then, coffee was considered the main crop and avocado fruits were considered a worthless byproduct used as pig feed. During the collapse of the country's coffee regions, the MM landscape was dominated by avocado trees, which soon became the main source of income for farmers. In the 1960s, MM's avocado reached the markets of Medellín, Barranquilla and Cartagena, and in a short time the region was consolidated as the largest avocado producing area in the country, without the implementation of technological innovations (Yabrudy-Vega, 2012a, 2012b).

Avocado as the main crop configures the current MM West Indian avocado agroforestry system, with yam and cocoa as the main associated crops. Cocoa is grown under the shade of avocado trees, while yams are planted in the clearings within or adjacent to the avocado orchards. Many other crops are grown but their occurrence is lower than the three mentioned

et al., 2017; Parra, 2016). MM presenta un clima de sabana tropical con invierno seco (Aw) y abundantes remanentes de bosque seco tropical (Galván-Guevara, Sierra, Gómez, de la Ossa, & Fajardo-Patiño, 2009; Instituto Alexander von Humboldt [IAVH], 1998), con temperatura promedio anual de 27 °C, régimen de lluvia bimodal con precipitación anual de 1,000 a 1,200 mm y periodos secos entre junio-julio y diciembre-febrero (Aguilera-Díaz et al., 2013; Kottek, Grieser, Beck, Rudolph, & Rubel, 2006; IDEAM, 2018). Las cuencas hídricas de MM pertenecen al Magdalena y San Jorge (FUNCICAR, 2015).

En términos político-administrativos, la subregión Montes de María está integrada por 15 municipios pertenecientes a dos estados: El Carmen de Bolívar, San Jacinto, San Juan Nepomuceno, El Guamo, María la Baja, Zambrano, Córdoba (Bolívar), Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Colosó, Chalán, Tolviejo, San Onofre y San Antonio de Palmito (Sucre), que en conjunto cubren una área 6,297 km² (Figura 3). Por su parte, la subregión administrativa MM está dividida en tres zonas: 1) una planicie a orillas del Magdalena conformada por los municipios de Guamo, Zambrano y Córdoba. En términos geológicos, esta planicie no pertenece al sistema MM, sino a la formación geológica al oriente de la Sutura de Romeral. 2) La zona montañosa y 3) La zona litoral. Las dos últimas son parte del cinturón de plegamiento San Jacinto, en donde los cultivos de aguacate están concentrados en la zona montañosa. Los términos área de desarrollo rural y zonas de consolidación de MM son equivalentes a la subregión MM descrita previamente, con excepción del municipio de Corozal incluido en 2012 en la zona de consolidación MM. La declaración administrativa como subregión facilita el desarrollo conjunto de acciones entre los gobiernos de Bolívar y Sucre (Aguilera-Díaz et al., 2013).

Sistemas agroforestales de producción de aguacate en Montes de María

Origen y establecimiento

Los sistemas agroforestales de aguacate en MM iniciaron en la década de los cuarenta con la siembra de semillas de individuos de aguacate presentes en la región, para que sirvieran de sombra a los cafetales. Con el café como cultivo principal, los aguacates eran considerados un producto secundario sin valor, usados como alimento para cerdos. Durante el colapso de las regiones cafeteras del país, el paisaje de MM fue dominado por los árboles de aguacate, que pronto se convirtieron en la principal fuente de recursos para los agricultores. En la década de los sesenta, el aguacate de MM se comercializó en Medellín, Barranquilla y Cartagena, y en poco tiempo se consolidó como la mayor zona productora de aguacate

above. These additional associated crops include perennial fruit trees (mango, mamón [*Melicoccus bijugatus*], soursop, yellow mombin, noni, guama, guayaba agria [*Psidium friedrichsthalianum*], guayaba dulce and guayaba manzana [landraces and hybrids of *P. guajava*], nispero costeño [*Manilkara zapota*], orange, cereza criolla [*Malpighia glabra*], ciruela criolla [*Spondias purpurea*], zapote [*Pouteria sapota*], pera de agua [*Syzygium malaccense*], tangerines and lemons) and short-cycle crops for family consumption (banana, plantains [specially the landrace mafufo], cassava, squash [landraces of *Cucurbita maxima*], sweet potato, maize, sweet perennial peppers, sesame and beans). In recent years, an incipient beekeeping industry has been developed as a way to supplement crop income (Acevedo-Navas, 2012; Castellanos et al. 2011; Menco-Rivera, 2010; Yabrudy-Vega, 2012a).

Today, many of the trees, especially in Carmen de Bolívar, are 60 years old with heights of 100 m, making harvesting difficult. Although tree distribution is random, these aggregate near to the runoff channels in the field, where avocado seeds are more likely to germinate and grow. However, this aggregation pattern has been proposed as an explanation for recurrent cases of wilting on some farms (Osorio-Almanza et al., 2017; Yabrudy-Vega, 2012b).

Description of avocado, cocoa and yam subsystems

The largest area of avocado and cocoa production is found in Carmen de Bolívar and San Jacinto. However, the highest yields of these crops are recorded in Chalán, followed by San Jacinto, and the lowest yields in Carmen de Bolívar. This last municipality recorded the highest losses per hectare of avocado in the last decade, probably due to the advanced age of the avocado and cocoa orchards. More details of the subsystems analyzed can be found in Appendices 1, 2 and 3.

Avocado subsystem

The avocado landraces used by the farmers in MM are called “Montemarianos” and categorized into at least three main groups distinguishable by their fruit organoleptic properties: Cebo, Leche and Manteca. The pulp of the Cebo landraces is yellow and high in fiber content. The Leche (milk) landraces exhibit a creamy texture, while the Manteca (butter) landraces have a brown color and higher oil content. The colors vary from intense to dark green, and in some cases reddish colors (DANE, 2015; Yabrudy-Vega, 2012a). So far, the diversity of the MM avocado landraces is considered an obstacle for obtaining a homogeneous fruit that facilitates its commercialization. However, such diversity can be used to develop cultivars of avocado

del país, sin que ningún tipo de tecnificación hubiese sido implementada (Yabrudy-Vega, 2012a, 2012b).

El aguacate como cultivo principal configuró el actual sistema agroforestal de aguacate antillano de MM, con el ñame y el cacao como cultivos principales asociados. El cacao se siembra bajo la cobertura de los árboles de aguacate, mientras que el ñame se dispone en espacios abiertos contiguos a las zonas donde el aguacate prevalece. Muchos otros cultivos suelen estar presentes, pero su presencia es menor a los tres antes mencionados, alguno de ellos son: frutales perennes (mango, mamón, guanábana, hobo macho, noni, guama, guayaba agria, guayaba dulce, guayaba manzana, banano, mafufo, nispero, naranja, cereza, ciruela, zapote, pera, ciruela, mandarina y limones) y cultivos de ciclo corto para consumo familiar (plátano, yuca, ahuyama, batata, maíz, ají, ajonjolí y frijol). En los últimos años, complementario a los cultivos se ha desarrollado una incipiente actividad apícola (Acevedo-Navas, 2012; Castellanos et al. 2011; Menco-Rivera, 2010; Yabrudy-Vega, 2012a).

Hoy en día, muchos de los árboles, especialmente en Carmen de Bolívar, alcanzan edades de hasta 60 años y alturas de 100 m, lo que dificulta las labores de recolección. Aunque la distribución es aleatoria, los árboles suelen concentrarse en los canales de escorrentía del terreno, donde las semillas de aguacate tienen mayores probabilidades de germinar y crecer. Sin embargo, esto ha sido usado como explicación de los casos recurrentes de marchitamiento en algunas fincas (Osorio-Almanza et al., 2017; Yabrudy-Vega, 2012b).

Descripción de los subsistemas de aguacate, cacao y ñame

La mayor área de producción de aguacate y cacao se concentra en Carmen de Bolívar y San Jacinto. No obstante, los rendimientos más altos de estos cultivos se registran en Chalán, seguido de San Jacinto, y los menores rendimientos en Carmen de Bolívar, el cual ha registrado las mayores pérdidas por hectárea de aguacate en la última década, probablemente debido a la avanzada edad de las plantaciones de aguacate y cacao. Más detalles de los subsistemas analizados se pueden encontrar en los Anexos 1, 2 y 3.

Subsistema de aguacate

Las variedades locales de aguacate, provenientes de MM, son denominadas “Montemarianos” y clasificadas en al menos tres grupos distinguibles por las características organolépticas del fruto: Cebo, Leche y Manteca. La pulpa de los aguacates del grupo Cebo es de color amarillo y con alto contenido de fibras.

fruits with outstanding organoleptic properties similar to the Premium varieties of Hawaii. Cultivars with these traits can be marketed to specific niches, especially the ones related with organic products (Elevitch & Love, 2011).

The decline of avocado production areas in MM (Figure 4) is caused by a combination of factors that include: the advanced age of the orchards, avocado wilt presumably associated with *P. cinnamomi* (Osorio-Almanza et al., 2017), pest attacks and water stress (Burbano-Figueroa et al., 2017). Symptoms caused by *P. cinnamomi* are similar to those caused by water stress: wilting, pale or chlorotic leaves, necrotic margins on leaves, wilting in buds and reduced reproductive growth. These symptoms are classified as pathological or non-pathological, under the presumption of independent effects for water stress and root colonization by the pathogen. Holding the pathogen exclusively responsible has prevented the development of integrated management strategies of avocado wilt (Sterne, Kaufmann, & Zentmyer, 1978).

The hypothesis of the preponderance of root rot focuses all attention on *P. cinnamom* and the host's ability to replace roots, but ignores the plant's response to infection in a non-optimal environment where drought

Las variedades del grupo Leche exhiben una textura cremosa, mientras que las del grupo Manteca presentan un color pardo y mayor contenido de aceite. Los colores varían de verde intenso a oscuro, y en algunos casos coloraciones rojizas (DANE, 2015; Yabrudy-Vega, 2012a). Hasta el momento, la diversidad de variedades de aguacate en MM es vista como un problema en la obtención de un producto homogéneo que facilite la comercialización. Sin embargo, tal diversidad puede ser usada para desarrollar variedades únicas con atributos organolépticos sobresalientes, semejantes a las variedades Premium desarrolladas en Hawaii; esto permitiría alcanzar nichos específicos de mercado, especialmente en el rango de productos orgánicos (Elevitch & Love, 2011).

El declive de las áreas de producción de aguacate en MM (Figura 4) está relacionado con múltiples factores, como la edad avanzada de los árboles, marchitamiento del aguacate ocasionado presumiblemente por *P. cinnamomi* (Osorio-Almanza et al., 2017), ataques por plagas y estrés hídrico (Burbano-Figueroa et al., 2017). Los síntomas ocasionados por *P. cinnamomi* son similares a los causados por estrés hídrico: marchitamiento, hojas pálidas o cloróticas, márgenes necróticos en las hojas, marchitamiento en las yemas

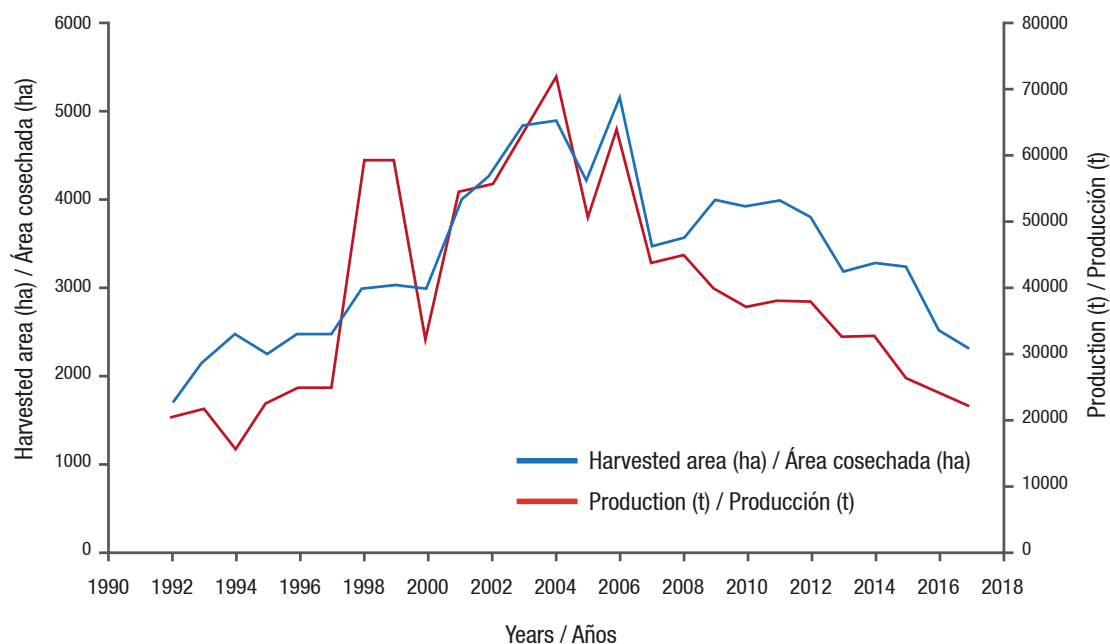


Figure 4. Avocado area and production in Montes de María since 1992. Data from 1992 to 2006 were extracted from a previous publication (Yabrudy-Vega, 2012b) using WebPlotDigitizer, and data from 2007 to 2017 come from the municipal agricultural evaluations of the Ministry of Agriculture and Rural Development (AGRNET, 2017).

Figura 4. Área y producción del cultivo de aguacate en Montes de María desde 1992. Los datos de 1992 a 2006 se extrajeron de una publicación previa (Yabrudy-Vega, 2012b) mediante WebPlotDigitizer, y los datos de 2007 a 2017 provienen de las evaluaciones agropecuarias municipales del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (AGRNET, 2017).

conditions prevail (Marks & Smith, 1980). This approach dominates most of the interventions implemented for avocado wilt management in MM.

The alternative interpretation is a water transport model that simultaneously explains the effects of water stress and pathogen colonization on avocado plants (Sterne et al., 1978). Infection with *P. cinnamomi* reduces the water absorption rate (due to root loss caused by the pathogen), but does not interfere with conduction within the tree (Marks & Smith, 1980). The water transport model is able to explain why Mediterranean climates are more prone to infections associated with *P. cinnamomi* (Marks & Smith, 1980). Avocado trees in MM are exposed to long periods of drought, typical of climates associated with dry tropical forests. These climatic conditions are probably the underlying factor explaining the reported loss of areas associated with avocado wilt in MM and branch dieback associated with Scolytidae beetles in the Serranía de Perijá mountain range (Burbano-Figueroa et al., 2017; Osorio-Almanza et al., 2017), both exacerbated by climate change in the last decade.

Cocoa subsystem

Cocoa production areas have experienced increases in the last decade, as a result of incentives for cocoa planting granted by various institutions (Castellanos et al., 2011; Fonseca-Rodríguez, Arraut-Camargo, Contreras-Pedraza, Correa-Cantillo, & Castellanos-Domínguez, 2011). However, the planted area is still emerging. In 2017, it did not exceed 1,000 ha (Figure 5). Cocoa crops in MM show symptoms of moniliasis (*Moniliophthora roreri*) and witches' broom (*Moniliophthora perniciosa*) (Fonseca-Rodríguez et al., 2011). Additionally, MM exhibits a latent risk of epidemic events associated with *Ceratocystis cacaofunesta* transmitted by ambrosia beetles. Events of this kind have been observed in avocado and cocoa plantations in Colombia and Venezuela (Burbano-Figueroa et al., 2017; Engelbrecht, Harrington, & Alfenas, 2007; Rondón & Guevara, 1984). These sanitary problems are common in other cocoa regions of the country (Fonseca-Rodríguez et al., 2011), suggesting that technology developed in other areas can be implemented in the region, especially the use of resistant cocoa varieties.

There is no available evidence to explain the coincidences in the production curves (harvested area) between avocado and yam, but they are probably associated with the farmers' return to their lands and the capital constraints imposed by the decrease in income associated with avocado. In the case of cocoa, it is a crop that in the last decade has been promoted by different institutions, so that the production dynamics observed in Figure 5 is difficult to explain without additional information.

y crecimiento reproductivo reducido. Estos síntomas se clasifican como patológicos o no patológicos, bajo la presunción de efectos independientes del estrés hídrico y la colonización de raíces por el patógeno. Responsabilizar exclusivamente al patógeno ha evitado el desarrollo de estrategias de un manejo integral del marchitamiento del aguacate (Sterne, Kaufmann, & Zentmyer, 1978).

La hipótesis de la preponderancia de la pudrición radicular centra toda la atención en *P. cinnamomi* y en la capacidad del hospedero para reemplazar las raíces, pero ignora la respuesta de la planta a la infección en un ambiente no óptimo, donde prevalecen las condiciones de sequía (Marks & Smith, 1980). Este enfoque domina la mayor parte de las intervenciones implementadas para el manejo del marchitamiento del aguacate en MM.

La interpretación alternativa es un modelo de transporte de agua que explica, simultáneamente, los efectos del estrés hídrico y la colonización por el patógeno en plantas de aguacate (Sterne et al., 1978). La infección con *P. cinnamomi* reduce la tasa de absorción de agua (debido a la pérdida de raíces provocada por el patógeno), pero no interfiere con la conducción dentro del árbol (Marks & Smith, 1980). El modelo de transporte de agua es capaz de explicar por qué los climas mediterráneos son más proclives a infecciones asociadas a *P. cinnamomi* (Marks & Smith, 1980). Los árboles de aguacate en MM están expuestos a largos periodos de sequías, típicos de los climas asociados a bosques tropicales secos. Estas condiciones climáticas son, probablemente, el factor subyacente que explica los reportes de pérdida de áreas asociadas a marchitamiento del aguacate en MM y secamiento descendente de ramas asociada con escarabajos Scolytidae en la Serranía de Perijá (Burbano-Figueroa et al., 2017; Osorio-Almanza et al., 2017), ambas exacerbada por el cambio climático en la última década.

Subsistema de cacao

Las áreas de producción de cacao han experimentado incrementos en la última década, como resultado de los procesos de fomento al cultivo liderado por diversas instituciones (Castellanos et al., 2011; Fonseca-Rodríguez, Arraut-Camargo, Contreras-Pedraza, Correa-Cantillo, & Castellanos-Domínguez, 2011). El área de cultivo aún es incipiente, para 2017 no superaba las 1,000 ha (Figura 5). Los cultivos de cacao en MM exhiben ataques por moniliasis (*Moniliophthora roreri*) y escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*) (Fonseca-Rodríguez et al., 2011), además de un riesgo latente de eventos epidémicos asociados con *Ceratocystis cacaofunesta*, transmitido por escarabajos ambrosia, similares a los reportados en aguacate y cacao en Colombia y Venezuela (Burbano-Figueroa et al., 2017; Engelbrecht, Harrington, & Alfenas, 2007; Rondón & Guevara, 1984).

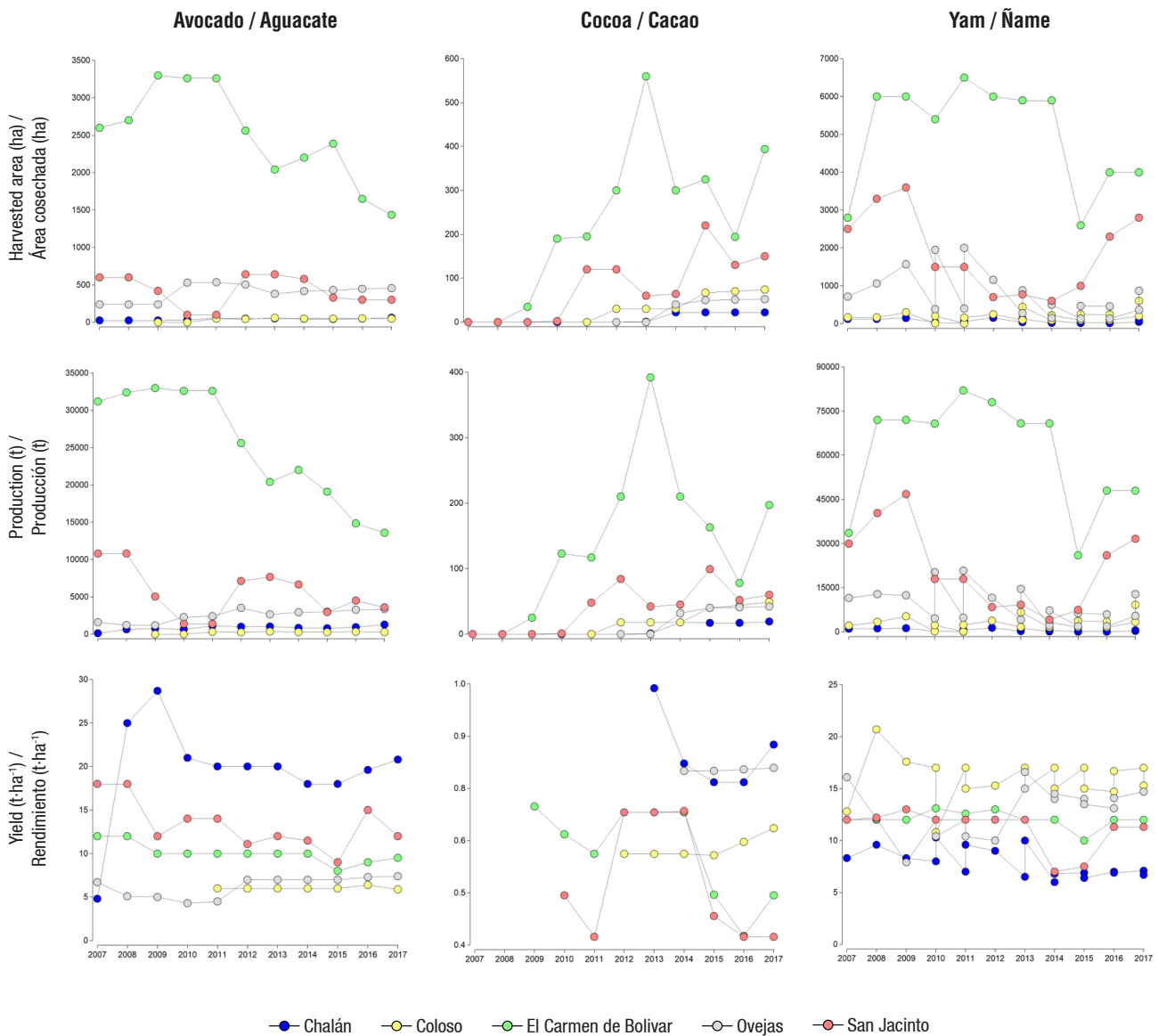


Figure 5. Harvested area, production and yield of avocado, cocoa and yam crops in municipalities of Montes de María.

Figura 5. Área cosechada, producción y rendimiento de los cultivos de aguacate, cacao y ñame en municipios de Montes de María.

Yam subsystem

Yam is an annual crop with dramatic changes in production area from year to year, ranging from 10,000 to 5,000 ha (Figure 5). This crop is planted in the months of April, May and June with the onset of rains and is harvested between November and January. The vegetative period lasts between 10 and 12 months. The dependency of the planting dates (and the crop-season) for the arrival of the rainy season limits the constant supply of yam in the market, resulting in months of excessive production and low prices, and months of scarce production (June to August). Changes in the production area are driven by the expectation of

Estos problemas sanitarios son comunes en otras regiones cacaoteras del país (Fonseca-Rodríguez et al., 2011), lo que sugiere que la tecnología desarrollada en otras zonas puede ser implementada en la región, especialmente las variedades de cacao resistentes.

No existe evidencia disponible que explique las coincidencias en las curvas de producción (área cosechada) entre aguacate y ñame, pero probablemente están asociadas al retorno de los agricultores a las fincas y a las limitaciones de capital impuestas por la disminución de ingresos asociada al aguacate. En el caso del cacao, es un cultivo que en la última década ha sido impulsado por diferentes instituciones, por lo que

future prices for the product in the local market. The main yam-producing municipalities are Carmen de Bolívar and San Jacinto, together accounting for more than 80 % of total production (Reina-Aranza, 2012).

Yam includes several monocotyledonous species of the genus *Dioscorea*. The most cultivated varieties in Colombia belong to the species *Dioscorea rotundata* and *Dioscorea alata*. The *D. rotundata* cultivars are the most cultivated in MM and in the Caribbean, and are referred to as white yam or Espino (varieties and landraces). The *D. alata* landraces are locally known as *Criollo* (native) yams (Reina-Aranza, 2012; Rivera-Jiménez, Álvarez-Soto, Palacio-Mejía, Barrios-Leal, & López-Álvarez, 2011; Rivera-Jiménez, Álvarez, Palacio-Mejía, & Ochoa, 2012; Rodríguez, 2000).

Criollo yams have higher yields and storage capacity compared to the Espino yams, which are considered inferior in organoleptic characteristics (Giraldo-Marroquin, Bustamante-Rodríguez, Pinzón-Gutiérrez, & Buitrago-Hurtado, 2016; Méndez, Palencia, Hernández, Hernández, & Beltrán, 2013; Reina-Aranza, 2012), although *D. rotundata* varieties exhibit greater resistance to anthracnose compared to *D. alata* varieties (Giraldo-Marroquin et al., 2016; Méndez et al., 2013). There are differences in texture, starch grain size and organoleptic characteristics between the *D. rotundata* and *D. alata* varieties (Brunnschweiler, Mang, Farah, Escher, & Conde-Petit, 2006; Onayemi, Babalola, & Badanga, 1987; Nindjin et al., 2007) that explain the consumption preference of the local market for the Criollo varieties of *D. alata*.

The cultivar Diamante 6322 (Diamante 22 or simply Diamante), of the species *D. alata*, is the most planted in the region for the export market. This variety of Costa Rican origin exhibits greater resistance to anthracnose compared to other varieties of *D. alata* and *D. rotundata* (Sotomayor-Ramírez, González-Vélez, & Román-Paoli, 2003; Annex 3). However, 'Diamante' tubers have the lowest price in the local market and are considered to have inferior organoleptic characteristics compared to other Espino and Criollo yams (Méndez et al., 2013).

Socioeconomic factors affecting the avocado agroforestry production system

Multiple socioeconomic factors, mainly related to the Colombian armed conflict, have affected the region in the last half century. Forced displacement, the disintegration of the social fabric and the loss of institutionality caused by armed actors have resulted in conflicts over land ownership, inequality, poverty and low access to secondary education services (Daniels-Puello & Maza-Ávila, 2017; Maza-Ávila & Pérez-González, 2015; DNP 2012; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2010). In this

es difícil explicar la dinámica observada en la Figura 5 sin información adicional.

Subsistema de ñame

El ñame es un cultivo de ciclo anual con cambios dramáticos en el área de producción de año a año, el cual varía en un rango de 10,000 a 5,000 ha (Figura 5). Este cultivo se siembra en los meses de abril, mayo y junio, con el inicio de las lluvias, y se cosecha entre noviembre y enero, con un periodo vegetativo entre 10 y 12 meses. Las estaciones de cultivo están definidas por las épocas de siembra que depende de la llegada de lluvias; este evento limita la oferta constante en el mercado, lo que provoca meses de sobreproducción y abaratamiento del producto, y meses de escasez (junio a agosto). Los cambios en el área de producción son impulsados por la expectativa de precios futuros del producto en el mercado local. Los principales municipios productores de ñame son Carmen de Bolívar y San Jacinto, con una participación combinada superior al 80 % (Reina-Aranza, 2012).

El ñame incluye varias especies monocotiledóneas del género *Dioscorea*. Las variedades más cultivadas en Colombia pertenecen a las especies *Dioscorea rotundata* y *Dioscorea alata*. Las variedades de *D. rotundata* son las más cultivadas en MM y en el Caribe, y son denominados como ñame blanco o ñame espino. Por su parte, las variedades de *D. alata* son denominados localmente como ñames criollos (Reina-Aranza, 2012; Rivera-Jiménez, Álvarez-Soto, Palacio-Mejía, Barrios-Leal, & López-Álvarez, 2011; Rivera-Jiménez, Álvarez, Palacio-Mejía, & Ochoa, 2012; Rodríguez, 2000).

Los ñames criollos exhiben mayores rendimientos y capacidad de almacenamiento comparados con las variedades de ñame espino, que es considerado inferior en características organolépticas (Giraldo-Marroquin, Bustamante-Rodríguez, Pinzón-Gutiérrez, & Buitrago-Hurtado, 2016; Méndez, Palencia, Hernández, Hernández, & Beltrán, 2013; Reina-Aranza, 2012); aunque las variedades de *D. rotundata* exhiben mayor resistencia a la antracnosis en comparación con las de *D. alata* (Giraldo-Marroquin et al., 2016; Méndez et al., 2013). Existen diferencias en textura, tamaño del grano de almidón y características organolépticas entre las variedades de *D. rotundata* y *D. alata* (Brunnschweiler, Mang, Farah, Escher, & Conde-Petit, 2006; Onayemi, Babalola, & Badanga, 1987; Nindjin et al., 2007) que explican la preferencia de consumo del mercado local por las variedades criollas de *D. alata*.

El cultivar Diamante 6322 (Diamante 22 o simplemente Diamante), de la especie *D. alata*, es el más sembrada en la región con destino al mercado de exportación. Esta variedad de origen costarricense exhibe mayor resistencia a la antracnosis, comparada con otras

sense, Table 2 presents a detailed description of the socioeconomic factors influencing farmers' behavior and welfare, and price-fixing of the agricultural products. The relationships among the components described are shown in Figure 2b.

The area's rugged terrain makes it difficult for farmers to transport products and acquire goods and services, which increases the transport costs of agricultural products (Yabrudy-Vega, 2012a). During the last decade, new road construction projects have been developed, which will undoubtedly bring benefits to avocado producers in MM. However, the commercialization of the product is not organized, which implies higher shares for intermediaries and, therefore, the reduction of real income to the farmer (PODEC, 2011).

Short ripening periods and thin-skin of the West Indian avocado fruits prevent their long distance transport or their storage for extended periods. Additionally,

variedades de *D. alata* y *D. rotundata* (Sotomayor-Ramírez, González-Vélez, & Román-Paoli, 2003; Anexo 3). Sin embargo, los tubérculos de 'Diamante' tienen el menor precio en el mercado local y son considerados de características organolépticas inferiores en comparación con otros ñames espinos y criollos (Méndez et al., 2013).

Factores socioeconómicos que afectan el sistema productivo agroforestal de aguacate

Múltiples factores socioeconómicos, relacionados principalmente con el conflicto armado colombiano, han afectado a la región en la última mitad del siglo. El desplazamiento forzado, la desintegración del tejido social y la pérdida de la institucionalidad provocada por los actores armados, han resultado en conflictos por la propiedad de la tierra, desigualdad, pobreza y bajo acceso a los servicios de educación media (Daniels-Puello & Maza-Ávila, 2017; Maza-Ávila & Pérez-González,

Table 2. Description of socioeconomic factors affecting the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean.

Cuadro 2. Descripción de los factores socioeconómicos que afectan el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano.

Socioeconomic factor/ Factor socioeconómico	Description of the factor and interaction with the production system/ Descripción del factor e interacción con el sistema productivo	Reference/ Referencia
Infrastructure and territory/ Infraestructura y territorio	<p>The products generated in MM are sold in informal marketing channels without transformation, mainly allocated to the local market. The highest profit margins are obtained during intermediation (approximately 80 %). The product is marketed every year between April and June.</p> <p>The region's rugged topography affects the transport and marketing of agricultural products, and limits the development of an adequate road infrastructure. The agricultural products must be transported from the farms to the main road in pack animals (donkeys), and from these points to Carmen de Bolívar in pickup trucks. When the price of agricultural products in the local market is high, the intermediaries buy them directly at the farm gate or at pick-up sites on the road. The main roads are the Troncal de Occidente and the Troncal del Magdalena Medio.</p> <p>Zero or negative population growth is expected for the region, as a consequence of the non-return of the displaced population and the migration of the younger population to urban areas./</p> <p>Los productos generados en MM se venden en canales de comercialización informales, sin transformación alguna, con destino principal al mercado local. Los mayores márgenes de ganancia se obtienen durante la intermediación (aproximadamente 80 %). El producto se comercializa cada año entre abril y junio.</p> <p>La topografía accidentada de la región afecta el transporte y comercialización de los productos agrícolas, lo que limita el desarrollo de una infraestructura vial adecuada. Los productos obtenidos deben ser transportados desde las fincas hasta la carretera en animales de carga (burros), y desde estos puntos hasta Carmen de Bolívar en camionetas. Cuando el precio de los productos agrícolas en el mercado local es alto, los intermediarios lo adquieren directamente en las fincas de los agricultores o en puntos de acopio sobre la carretera. Las principales vías de acceso son la Troncal de Occidente y la Troncal del Magdalena Medio.</p> <p>Se espera un crecimiento poblacional nulo o negativo para la región, como consecuencia del no retorno de la población desplazada y la migración de la población más joven hacia las zonas urbanas.</p>	<p>Méndez-Prada (2016); DNP (2012); Méndez-Prada, Humanez-Márquez, Pérez-Ricardo, & Bertel-Ortega (2015)</p>

Table 2. Description of socioeconomic factors affecting the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean. (cont.)

Cuadro 2. Descripción de los factores socioeconómicos que afectan el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano. (cont.)

Socioeconomic factor / Factor socioeconómico	Description of the factor and interaction with the production system / Descripción del factor e interacción con el sistema productivo	Reference / Referencia
Armed conflict and institutionality / Conflicto armado e institucionalidad	<p>The MM subregion has a population of approximately 600,000 inhabitants. They have witnessed extreme scenes of violence and corruption of the local government as part of the events associated with the Colombian Civil War of recent decades. This has resulted in extreme levels of poverty and inequality, forced displacement, conflict over land ownership and a deficient public service structure.</p> <p>The noble and aristocratic culture of the society and the peaceful nature of the inhabitants have led to corruption in local government, as opposed to the development of institutions based on the rule of law./</p> <p>La subregión MM tiene una población aproximada de 600,000 habitantes, y ha presenciado escenas extremas de violencia y escenarios de corrupción protagonizados por el gobierno local y desarrollados en el entorno de la Guerra Civil Colombiana de las últimas décadas, lo que ha resultado en niveles extremos de pobreza y desigualdad, desplazamiento forzado, conflicto por la propiedad de las tierras y una estructura deficiente de prestación de servicios públicos.</p> <p>La cultura señorial y aristocrática de la sociedad, y el carácter pacífico de los pobladores han promovido la corrupción del gobierno local, en contraposición al desarrollo de las instituciones propias de un estado de derecho.</p>	Acemoglu & Robinson (2012); Acevedo-Navas (2012); Center for Coordination of Integrated Action (CCAI) (2012); Chica-Gelis (2017); Daniels-Puello (2016); DNP (2012); FUNCICAR (2015); Garzón-Moreno et al. (2018); OPPDH-DIH (2003); PNUD (2010, 2012); Plataforma de Organizaciones de Desarrollo Europeas en Colombia (PODEC) (2011)
Land ownership / Propiedad de la tierra	<p>The Colombian armed conflict caused the displacement of significant segments of the population due to the loss of farmers' property rights at the hands of the government or actors outside the law. Currently, there is a process of land restitution, whose purpose is the reparation of the victims of the armed conflict. Specifically for MM, this process intends the restitution of land to its original owners.</p> <p>Land ownership and distribution is perhaps the most important element in social terms, linked to the reduction of poverty and inequality, and in the long term to the consolidation of peace in the region./</p> <p>El conflicto armado colombiano provocó el desalojo masivo de la población debido a la pérdida de los derechos de propiedad de los agricultores sobre la tierra a manos del gobierno o actores al margen de la ley. En la actualidad, existe un proceso de restitución de tierras, cuyo propósito es la reparación de las víctimas del conflicto armado y especialmente, en el caso de MM, la restitución de las tierras a sus propietarios originales.</p> <p>La propiedad y distribución de la tierra es, tal vez, el elemento de mayor importancia en términos sociales, el cual está relacionado con la disminución de la pobreza y la desigualdad, y en el largo plazo con la consolidación de la paz en la región.</p>	DNP (2012)
Economic development / Desarrollo económico	<p>The lack of financial resources and human capital restricts the region's economic development and its adequate insertion in the national and international economy.</p> <p>Associativity. Avocado, cocoa and yam producers are conglomerated in farmers' associations, which have been the object of interventions by public and private organizations working in the region.</p> <p>Technical assistance. Technical assistance to farmers in each of the subsystems is limited./</p> <p>La carencia de recursos financieros y capital humano limitan el desarrollo económico de la región y la adecuada inserción de la región en la economía nacional e internacional.</p> <p>Asociatividad. Los productores de aguacate, cacao y ñame se encuentran conglomerados en asociaciones de agricultores, las cuales han sido el objeto de intervención por parte de las organizaciones públicas y privadas con presencia en la región.</p> <p>Asistencia técnica. La asistencia técnica a los agricultores en cada uno de los subsistemas es limitada.</p>	Aguilera-Díaz et al. (2013); Castellanos et al. (2011); Fonseca-Rodríguez et al. (2011); Méndez-Prada (2016); DNP (2012); Reina-Aranza (2012)

Table 2. Description of socioeconomic factors affecting the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean. (cont.)**Cuadro 2. Descripción de los factores socioeconómicos que afectan el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano. (cont.)**

Socioeconomic factor/ Factor socioeconómico	Description of the factor and interaction with the production system/ Descripción del factor e interacción con el sistema productivo	Reference/ Referencia
Education and health/ Educación y salud	<p>Only half of the school-age population attends secondary school. Armed conflict, poverty, low coverage and poor performance of public education at the local level are the factors used to explain the region's low educational performance.</p> <p>The infrastructure of hospitals, basic sanitation services and public services is deficient in comparison with other rural areas of the country./</p> <p>Únicamente la mitad de la población en edad escolar asiste a la educación media. El conflicto armado, la pobreza, la escasa cobertura y el pobre desempeño de la educación pública a nivel local son los factores usados para explicar los desempeños bajos de la región en materia educativa.</p> <p>La infraestructura de hospitales, de servicios de saneamiento básico y de servicios públicos es deficiente en comparación con otras zonas rurales del país.</p>	Daniels-Puello & Maza-Ávila (2017); DNP (2012); Maza-Ávila & Pérez-González (2015)
Sustainability and biodiversity conservation/ Sostenibilidad y conservación de la biodiversidad	<p>In view of the preponderance of political and economic aspects associated with the armed conflict, this aspect has received the least attention. Efforts have concentrated on increasing agricultural areas in accordance with their suitability and watershed protection. However, MM represents one of the last enclaves of tropical dry forest in the country.</p> <p>Ecotourism proposals have been developed for the municipality of San Jacinto. /</p> <p>En consideración a la preponderancia de los aspectos políticos y económicos asociados al conflicto armado, este aspecto es el que menos atención ha recibido. Los esfuerzos se han concentrado en incrementar las áreas agrícolas de acuerdo con su vocación y protección de las cuencas hidrográficas. Sin embargo, MM representa uno de los últimos enclaves de bosque seco tropical del país.</p> <p>Se han desarrollado propuestas de ecoturismo para el municipio de San Jacinto.</p>	DNP (2012); Huertas-Cardozo & Santos-Gómez (2015); Segundo-Machado & Huertas-Cardozo (2018)

the extreme variability in organoleptic characteristics makes it difficult to standardize a product that can be offered in formal marketing channels. Consequently, West Indian avocado fruits are not suitable for export. The international market prefers the organoleptic and durability characteristics of the Hass avocado (Mejía-Hernández, 2011) resulting in lower prices for the criollo avocados. MM's West Indian avocado is only distributed nationally, and the main marketing centers are the wholesale markets of Cundinamarca, Bogota, Antioquia, Medellin and Cali. A low percentage of MM's avocado is distributed in chain stores in Barranquilla, Bogota and Santa Marta, and with some intermediaries that sell the avocado mainly in wholesale markets in Cartagena, Barranquilla, Cali, Bogotá and Bucaramanga (Appendix 1).

Initiatives developed in the region

In recent years, several farmers' organizations have emerged, and public institutions have concentrated their efforts on supporting them. The main organizations are: Asociación de Productores de Aguacate del Carmen de Bolívar (APACARBOL), Asociación de Productores Agrícolas de Macayepo (ASOPRAM V"), Asociación de

2015; DNP 2012; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2010). En este sentido, el Cuadro 2 presenta una descripción detallada de los factores socioeconómicos que influyen en el comportamiento y bienestar de los agricultores, y la fijación de precios de los productos. Las relaciones entre los componentes descritos se muestra en la Figura 2b.

El relieve accidentado de la zona dificulta el transporte de productos y la adquisición de bienes y servicios por parte de los agricultores, lo que aumenta los costos de transporte de los productos agrícolas (Yabrudy-Vega, 2012a). Durante la última década, se han desarrollado proyectos de construcción de nuevas vías, que indudablemente traerán beneficios a los productores de aguacate en MM. No obstante, la comercialización del producto no se encuentra organizada, lo cual ocasiona una participación alta de intermediarios y, por ende, la reducción de ingresos reales al agricultor (PODEC, 2011).

En cuanto a condiciones del fruto del aguacate antillano, su periodo corto de maduración y la cáscara fina ocasionan que no puedan ser transportados largas distancias o almacenados durante períodos

Víctimas de Chengue (ASOVICHENGUE), Asociación de Productores del Tesoro, and the Asociación de Cosechadores de Paz y Esperanza de Chengue.

Initiatives to support the production system have focused on promoting seedling production in nurseries, providing training in crop management (particularly root rot management through the control of *Phytophthora*), establishing new orchards and strengthening the socio-entrepreneurial skills of the organizations. Among the funders of these initiatives are the Ministry of Agriculture and Rural Development (MADR) and the International Organization for Migration (IOM-USAID), which have focused on supporting projects related to crop management aimed to increase crop yields while developing or identifying cultivars resistant to *P. cinnamomi*. Despite the efforts of the institutions to manage this disease, the general opinion is that these efforts have been unsuccessful, and that crop renewal is the definitive solution to the problems of loss of crop areas in MM (Restrepo-Salazar, 2011).

In addition, many other management strategies and public actions have been developed in the region related to land restitution. This will not be discussed in this document because the analysis of these actions requires an additional paper and expertise beyond the scope of this review. However, the most notable documents are: Acemoglu and Robinson (2012), CCAI (2012), and OPPDH-IHL (2003), and some more were cited in the document to incorporate regional context information.

Research perspectives and management strategies for the production system

It is necessary to concentrate efforts on understanding the environmental, biological and socioeconomic limitations of agroforestry production systems in MM, rather than individual crops (subsystems). This purpose can be reached through a combination of multivariate experimental approaches and models that must include the interactions between the perennial tree components and the annual crops, and the physical and socioeconomic constraints of the farmers.

DNP (2012) developed a model of scenario analysis with the aim of consolidating the intervention efforts of the production system in the region. However, it would be advisable to create stochastic models of the production system using the current state of knowledge. These models will facilitate the identification of the key variables in the production system. Stochastic approaches for participatory models describing agricultural production systems have previously been used for understanding and developing interdisciplinary solutions for problems of these systems (Luedeling, Kindt, Huth, & Koenig,

prolongados. Sumado a esto, la extrema variabilidad en características organolépticas dificulta la estandarización de un producto que pueda ser ofrecido en los canales de comercialización regulares, y en consecuencia no son aptos para exportación. Esto genera que el mercado internacional prefiera las características organolépticas y de durabilidad del aguacate Hass (Mejía-Hernández, 2011), lo que conlleva a que los aguacates criollos tengan un precio de venta más bajo. El aguacate antillano de MM solo se distribuye a nivel nacional, y los principales centros de comercialización son los mercados mayoristas de Cundinamarca, Bogotá, Antioquia, Medellín y Cali. Un porcentaje bajo del aguacate de MM se distribuye en tiendas de cadena en Barranquilla, Bogotá y Santa Marta, y con algunos intermediarios que venden el aguacate principalmente en mercados mayoristas de Cartagena, Barranquilla, Cali, Bogotá y Bucaramanga (Anexo 1).

Iniciativas desarrolladas en la región

En los últimos años han surgido varias organizaciones de agricultores, y las instituciones públicas han concentrado sus esfuerzos en apoyarlas. Las principales organizaciones son: Asociación de Productores de Aguacate del Carmen de Bolívar (APACARBOL), Asociación de Productores Agrícolas de Macayepo (ASOPRAM V"), Asociación de Víctimas de Chengue (ASOVICHENGUE), Asociación de Productores del Tesoro, y la Asociación de Cosechadores de Paz y Esperanza de Chengue.

Las iniciativas de apoyo al sistema productivo se han concentrado en promover la producción de plántulas en viveros, capacitar en el manejo del cultivo (particularmente el manejo de pudrición radicular a través del control de *Phytophthora*), establecer nuevas áreas de cultivo y fortalecer el carácter socio-empresarial de las organizaciones. Entre las financieras de las iniciativas se encuentran el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), y la Organización Internacional para las Migraciones (OIM-USAID), quienes se han enfocado en apoyar proyectos relacionados con el manejo del cultivo, esto con el fin de aumentar el rendimiento del cultivo, mientras se desarrollan o identifican cultivares resistentes a *P. cinnamomi*. A pesar de los esfuerzos de las instituciones para el manejo de esta enfermedad, la opinión generalizada es que dichos esfuerzos han resultado infructuosos, y que la renovación de cultivos es la solución definitiva a los problemas de pérdida de áreas de cultivo en MM (Restrepo-Salazar, 2011).

Asimismo, se han desarrollado muchas otras estrategias de manejo y acciones públicas en la región relacionadas con la restitución de tierras, las cuales no serán

2014a; Luedeling et al., 2014b; Rosenstock et al., 2017; Shepherd, Luedeling, de Leeuw, & Rosenstock, 2014; Whitney et al., 2017a, 2017b).

These models will allow identifying the variables with the greatest impact on yield and productivity. In the case of avocado and cocoa yields, as perennial species, it is necessary to establish long-term field experiments that allow a precise quantification of the effect of the proposed management strategies or as an alternative to the field experiments, to identify recently established crops and farmers willing to participate in the field-evaluations. The estimated parameters can be incorporated into the stochastic models and facilitate the quantification of the expected benefits and implementation costs.

A key aspect to solve is the management of the information collected in MM. Multiple organizations work in the region (the state governments of Sucre and Bolívar, the Bank of the Republic, the University of Sucre, the Technological University of Bolívar, the National University of Colombia, the Colombian Agricultural Institute [ICA], the Colombian Agricultural Research Corporation [CORPOICA], the United Nations Development Program and multiple non-governmental organizations [NGOs]) but access to information between institutions is limited and there is no common data repository, leading to duplication of efforts. A common repository will allow access to the information obtained by the different stakeholders, protect the privacy of the farmers involved in field research and interventions and serve as the baseline for the development of better interventions in the production system. Additionally, it is necessary to assess the information collected at different scales and to evaluate the socioeconomic impact of these interventions in the production system.

Finally, the cluster analysis of authors (Figure 1) shows that interventions are isolated efforts of institutions working on specific aspects of the production subsystems or the community (Figure 2). A common agenda of the institutions working in the region will allow the optimization of the available resources.

Limitations

This review and the conceptual model here presented have several limitations. Although the search strategy was exhaustive, multiple reports and databases of government institutions and NGOs cannot be consulted because of the privacy restrictions for accessing this information. On the other hand, the model presented is a general qualitative one that requires feedback with the stakeholders involved in the production system with the aim of validating the proposed

discutidas en este momento debido a que el análisis de estas acciones requieren un manuscrito adicional y experiencia fuera del alcance de esta revisión. Sin embargo, los documentos más notables son: Acemoglu y Robinson (2012), CCAI (2012), y OPPDH-DIH (2003), y algunos más se citaron en el documento para incorporar información de contexto regional.

Perspectivas de investigación y estrategias de manejo del sistema productivo

Es necesario concentrar los esfuerzos en comprender las limitaciones ambientales, biológicas y socioeconómicas de los sistemas agroforestales de producción en MM, y no de los cultivos (subsistemas) individuales. Lo anterior mediante una combinación de enfoques experimentales multivariados y modelos que incluyan las interacciones entre la fracción arbórea perenne y los cultivos transitorios, pero que considere las limitaciones físicas y socioeconómicas de los agricultores.

El DNP (2012) desarrolló un modelo de escenarios en un intento de integrar los esfuerzos de intervención del sistema productivo en la región. Sin embargo, sería conveniente crear modelos del sistema productivo basados en enfoques estocásticos que usen información actual y permitan identificar las variables que juegan un rol primordial en el sistema productivo. Enfoques estocásticos de modelos participativos para sistemas de producción agrícola han sido usados previamente para lograr una comprensión y una búsqueda de soluciones interdisciplinarias a los problemas de estos sistemas (Luedeling, Kindt, Huth, & Koenig, 2014a; Luedeling et al., 2014b; Rosenstock et al., 2017; Shepherd, Luedeling, de Leeuw, & Rosenstock, 2014; Whitney et al., 2017a, 2017b).

Estos modelos permiten identificar las variables con mayor impacto sobre el rendimiento y la productividad. En el caso del rendimiento del aguacate y el cacao, como especies perennes, es necesario establecer campos de experimentación a largo plazo que permitan cuantificar de manera precisa el efecto de las estrategias de manejo propuestas o, en su defecto, identificar cultivos que hayan sido establecidos recientemente y agricultores con la voluntad de participar en las evaluaciones. Estas estimaciones pueden ser incorporadas en los modelos estocásticos y facilitar la cuantificación de los beneficios esperados y el costo de la implementación.

Un punto clave a resolver es la recopilación de la información de MM; ya que, a pesar de la presencia de múltiples organizaciones (como los gobiernos de Sucre y Bolívar, el Banco de la República, la Universidad de Sucre, la Universidad Tecnológica de Bolívar, la Universidad Nacional de Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], la Corporación Colombiana de

relationships. However, the inclusion of additional information provided by the aforementioned processes is only critical for the development of a quantitative approximation of the model, and does not change the general framework of the system described here.

End of English version

References / Referencias

- Acemoglu, D., & Robinson, J. (2012). Who's afraid of development?. Retrieved June 7, 2018 from <http://whynationsfail.com/blog/2012/3/26/whos-afraid-of-development-the-colombian-version.html>
- Acevedo-Navas, C. (2012). *Los Montes de María: Región, conflicto armado y desarrollo productivo*. Colombia: Universidad del Norte.
- AGRONET. (2017). Estadísticas agrícola - Área, producción y rendimiento. Retrieved June 9, 2018 from <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>
- Aguilera-Díaz, M., Reina-Aranza, Y., Orozco-Gallo, A., Yabrudy-Vega, J., & Barcos-Robles, R. (2013). *Ensayos sobre Economía Regional: Composición de la economía de la región Caribe de Colombia* (pp. 65). Cartagena: Centro Regional de Estudios Económicos - Banco de la República.
- Bacca, J. M., Hernández-Pardo, O., & Vásquez-Ávila, L. E. (2010). Determinación de la geometría del acuífero de Morroquillo y geología detallada del acuífero de Toluviejo Sucre. *Geología Colombiana*, 35, 87-101. doi: 10.15446/gc
- Biazin, B., Haïleslassie, A., Zewdie, T., Mekasha, Y., Gebremedhin, B., Fekadu, A., & Shewage, T. (2016). Smallholders' avocado production systems and tree productivity in the southern highlands of Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 92(1), 1-11. doi: 10.1007/s10457-016-0020-2
- Brunnschweiler, J., Mang, D., Farah, Z., Escher, F., & Conde-Petit, B. (2006). Structure–texture relationships of fresh pastes prepared from different yam (*Dioscorea* spp.) varieties. *LWT - Food Science and Technology*, 39(7), 762-769. doi: 10.1016/j.lwt.2005.05.011
- Burbano-Figueroa, O., Arcila, A., Vasquez-Bettin, A. M., Carrascal-Pérez, F., Salazar-Pertuz, K., Moreno-Moran, M., Romero-Ferre, J., & Pulgarin-Díaz, J. A. (2017). First report of *Bionectria pseudochroleuca* causing dieback and wilting on avocado in the Serranía de Perijá, Colombia. *Plant Disease*, 102(1). doi: 10.1094/PDIS-01-17-0010-PDN
- Burbano-Figueroa, O., Romero-Ferrer, J., & Moreno-Moran, M. (2019). *Soil factors associated with avocado decline in the agroforestry systems of West Indian avocado (Persea americana) in Montes de María, Colombia*. Colombia: AGROSAVIA
- Caro, M., & Spratt, D. (2003). Tectonic evolution of the San Jacinto fold belt, NW Colombia. *RECORDER*, 28(2), 1-10. Retrieved from <https://csegrecorder.com/articles/>

Investigación Agropecuaria [CORPOICA], el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y múltiples Organizaciones no Gubernamentales [ONGs]), el acceso a la información entre instituciones es limitado y no existe un repositorio común, lo que conduce a la duplicación de esfuerzos. El repositorio común debe permitir el acceso a la información obtenida por los diferentes actores del sistema, proteger la privacidad de la población involucrada y ser la base para el desarrollo de mejores intervenciones en el sistema productivo. Adicionalmente, es necesario analizar la información colectada en todos los niveles y evaluar, desde el punto de vista socioeconómico, el impacto de las intervenciones desarrolladas en el sistema productivo.

Finalmente, el análisis de clústeres de autores (Figura 1) muestra que las intervenciones son esfuerzos aislados de instituciones que trabajan en aspectos específicos de los subsistemas productivos o de la comunidad (Figura 2). Una agenda común acordada entre las instituciones con presencia en la región optimizaría el uso de los recursos.

Limitaciones

Esta revisión y desarrollo de modelo conceptual tiene varias limitaciones. Aunque la estrategia de búsqueda fue exhaustiva, múltiples reportes y bases de datos de instituciones gubernamentales y ONGs no pueden ser consultados en consideración a restricciones de privacidad de la información. Por otra parte, el modelo presentado es una aproximación general cualitativa que requiere retroalimentación con los actores involucrados en el sistema productivo a fin de validar las relaciones presentadas. Sin embargo, la inclusión de información que pueda proveer los procesos antes mencionados sólo es crítica para el desarrollo de una aproximación cuantitativa del modelo conceptual, y no cambia el esquema general del sistema aquí presentado.

Fin de la versión en español

- view/tectonic-evolution-of-the-san-jacinto-fold-belt-nw-colombia
- Castellanos, O., Fúquene, A., Fonseca, S., Ramírez, D., Giraldo, E., & Valencia, M. (2011). *Estudio de la cadena productiva del cacao en Montes de María* (pp. 1-79). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Center for Coordination of Integrated Action (CCAI). (2012). *Consolidación y restitución de tierras: tensiones crecientes en Montes de María*. Retrieved June 6, 2018 from <http://ccai-colombia.org/2012/01/30/consolidation-land-restitution-and-rising-tensions-in-montes-de-mara/>
- Chica-Gelis, R. (2017). Vivir y morir en los Montes de María: La importancia del concepto de apropiación entre la comunicación y formación ciudadana. In: Daniels-Puello, A. J., Maza-Ávila, F. J. (Eds), *Montes de María:*

- políticas públicas, educación y desarrollo. Cartagena: Editorial Universitaria.
- Collins, S. L., Carpenter, S. R., Swinton, S. M., Orenstein, D. E., Childers, D. L., Gragson, T. L., ... Whitmer, A. C. (2011). An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(6), 351-357. doi: 10.1890/100068
- DANE. (2015). *El cultivo del aguacate (Persea americana Miller) fruta de extraordinarias propiedades alimenticias, curativas e industriales*. Bogotá: Author. Retrieved from http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_oct_2015.pdf
- Daniels-Puello, A. (2016). La transformación de la estructura productiva de los Montes de María: de despensa agrícola a distrito minero-energético. *Revista Digital de Historia y Arqueología desde el Caribe*, 12(29), 52-83. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/memor/n29/n29a04.pdf>
- Daniels-Puello, A., & Maza-Ávila, F. J. (2017). *Los Montes de María: Políticas públicas, educación y desarrollo*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena, Editorial Universitaria.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2012). *Visión prospectiva de los Montes de María 2032: Lineamientos estratégicos de la Subregión*. Colombia: Observatorio del Caribe Colombiano.
- Dueñas-Jiménez, H., & Gómez-González, C. (2013). Bioestratigrafía de la formación Cansona en la quebrada Peñitas, Cinturón de San Jacinto. Implicaciones paleogeográficas. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 527-539. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a08.pdf>
- Elevitch, C., & Love, K. (2011). *Farm and forestry production and marketing profiles: highlighting value-added strategies*. Hōlualoa, Hawaii, USA: Permanent Agricultural Resources (PAR).
- Engelbrecht, C. J., Harrington, T. C., & Alfenas, A. (2007). Ceratocystis wilt of cacao-a disease of increasing importance. *Phytopathology*, 97(12), 1648-1649. doi: 10.1094/PHYTO-97-12-1648
- ESRI. (2018). *GIS Mapping Software, Spatial Data Analytics & Location Platform*. Retrieved from <https://www.esri.com/en-us/home>
- Flinch, J. (2003). Structural evolution of the Sinu-Lower Magdalena area (Northern Colombia). In: Bartolini, C., Buffler, R. T., & Blickwede, J. (Eds.), *The circum-gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 776-796). Bogotá: American Association of Petroleum Geologists. doi: 10.1306/M79877
- Fonseca-Rodríguez, S. L., Arraut-Camargo, L. C., Contreras-Pedraza, C. A., Correa-Cantillo, Z., & Castellanos-Domínguez, O. (2011). *Balance tecnológico de la cadena productiva y agroindustrial del cacao en el departamento de Bolívar*. Colombia: Colciencias. Retrieved from http://bdigital.unal.edu.co/4540/1/Balance_Tecnologico_Cacao_Impreso.pdf
- FUNCICAR. (2015). *Sistematización de la experiencia de Colombia responde en la zona de consolidación territorial de los Montes de María*. Cartagena de Indias: Author. Retrieved from <http://www.funcicar.org/archivo/sites/default/files/archivos/informe-ok2editable-final.pdf>
- Galván-Guevara, S., Sierra, I., Gómez, H., de la Ossa, J., & Fajardo-Patiño, A. (2009). Biodiversidad en el área de influencia de la estación Primates de Colosó Sucre Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Animales*, 1(1), 98-121. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3269942.pdf>
- Gardner, T. A., Ferreira, J., Barlow, J., Lees, A. C., Parry, L., Vieira, I. C. G., ... Zuanon, J. (2013). A social and ecological assessment of tropical land uses at multiple scales: the Sustainable Amazon Network. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 368(1619), 20120166. doi: 10.1098/rstb.2012.0166
- Garzón-Moreno, D., Valencia-Riaño, J., Narváez-Jaimes, G., Martínez, M., Castiblanco, C., ... & Sánchez-Pulido, C. (2018). *La vida me dio otra oportunidad. Dinámicas sociales del conflicto armado en la región de Montes de María*. Bogotá: Universidad de Santo Tomás.
- Giraldo-Marroquin, N., Bustamante-Rodríguez, S. L., Pinzón-Gutiérrez, Y. A., & Buitrago-Hurtado, G. (2016). Caracterización molecular de *Colletotrichum gloeosporioides* aislado de plantas de ñame de la Costa Atlántica Colombiana utilizando la técnica "DNA Amplification Fingerprinting (DAF)". *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 95-103. doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57720
- Huertas-Cardozo, N., & Santos-Gómez, C. (2015). Turismo cultural como una salida al conflicto: Caso Montes de María-Colombia. *International Journal of Scientific Management and Tourism*, 4(1), 49-74. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5665978.pdf>
- IDEAM. (2018). *Atlas climatológico de Colombia*. Retrieved June 7, 2018 from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/>
- Instituto Alexander von Humboldt (IAVH). (1998). *El bosque seco tropical (Bs-T) en Colombia*. Bogotá: Instituto Alexander von Humboldt - Programa de Inventario de la Biodiversidad - Grupo de Exploraciones y Monitoreo Ambiental GEMA.
- Jagoret, P., Kweseseu, J., Messie, C. A., Michel, I., & Malézieux, É. (2014). Use values of woody species used in agroforestry: cocoa agroforests in central Cameroon. *Bois et Forêts des Tropiques*, 68(321), 45-54.
- Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolph, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Lamanda, N., Roux, S., Delmotte, S., Merot, A., Rapidel, B., Adam, M., & Wery, J. (2012). A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. *European Journal of Agronomy*, 38, 104-116. doi: 10.1016/j.eja.2011.07.004

- Luedeling, E., Kindt, R., Huth, N. I., & Koenig, K. (2014a). Agroforestry systems in a changing climate—challenges in projecting future performance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 1-7. doi: 10.1016/j.cosust.2013.07.013
- Luedeling, E., Shepherd, K., de Leeuw, J., Downie, K., de Leeuw, J., Luedeling, E., ... Downie, K. (2014b). *The application of decision analysis modelling for investment targeting*. Nairobi, Kenya: Technical Consortium, a project of the CGIAR.
- Marks, G. C., & Smith, I. W. (1980). A new approach to the *Phytophthora cinnamomi* problem. *Australian Forestry*, 43(4), 261-263. doi: 10.1080/00049158.1980.10674280
- Maza-Ávila, F. J., & Pérez-González, M. D. C. (2015). Pertenencia de la oferta educativa de la Zodes Montes de María desde sus capacidades productivas y económicas. *Revista Palobra*, 15, 172-189. doi: 10.32997/2346-2884-vol.15-num.0/2015/278
- Mejía-Hernández, A. E. (2011). *Cadena productiva del aguacate*. Colombia: Consejo Nacional del Aguacate.
- Menco-Rivera, D. (2011). Dinámica productiva agrícola en los Montes de María. *Revista OIDLES*, 5(11), 1-46. Retrieved from <http://www.eumed.net/rev/oidles/11/dmr.pdf>
- Méndez, Y. P., Palencia, J. L., Hernández, K. P., Hernández, E. J., & Beltrán, J. D. (2013). Reacción de genotipos de ñame (*Dioscorea* spp.) a la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*). *Temas Agrarios*, 18(1), 34. doi: 10.21897/rta.v18i1.707
- Méndez-Prada, M. C., Humanez-Márquez, U. N., Pérez-Ricardo, J. A., & Bertel-Ortega, C. A. (2015). Estrategias de distribución de la cadena productiva del Aguacate en los Montes de María. *Perspectiva Socioeconómica*, 2, 105-115. doi: 10.21892/24627593.228
- Méndez-Prada, M. (2016). Estrategias competitivas del eslabón primario en la cadena productiva de aguacate de los Montes de María. *Revista de Economía y Administración*, 13(1), 95-110. Retrieved from <http://www.uao.edu.co/sites/default/files/Revista%2013-1%20Julio%2013%20Arti%CC%81culo%206.pdf>
- Mora-Bohórquez, J. A., Ibáñez-Mejía, M., Oncken, O., de Freitas, M., Vélez, V., Mesa, A., & Serna, L. (2017). Structure and age of the lower Magdalena Valley basin basement, northern Colombia: New reflection-seismic and U-Pb-Hf insights into the termination of the central Andes against the Caribbean basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 74, 1-26. doi: 10.1016/j.jsames.2017.01.001
- Nindjin, C., Otokoré, D., Hauser, S., Tschannen, A., Farah, Z., & Girardin, O. (2007). Determination of relevant sensory properties of pounded yams (*Dioscorea* spp.) using a locally based descriptive analysis methodology. *Food Quality and Preference*, 18(2), 450-459. doi: 10.1016/j.foodqual.2006.05.005
- Observatorio del Programa Presidencial de Derechos Humanos y Derecho Internacional Humanitario (OPPDH-DIH). (2003). *Panorama actual de la región de Montes de María y su entorno*. Bogotá: Author.
- Onayemi, O., Babalola, R. O., & Badanga, A. (1987). Textural properties of cooked tropical yam (*Dioscorea* spp.). *Journal of Texture Studies*, 18, 17-29. doi: 10.1111/j.1745-4603.1987.tb00567.x
- Osorio-Almanza, L., Burbano-Figueroa, O., Arcila, A. M., Vásquez, A. M., Carrascal-Pérez, F., & Romero-Ferrer, J. (2017). Distribución espacial del riesgo potencial de marchitamiento del aguacate causado por *Phytophthora cinnamomi* en la subregión de Montes de María, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(2), 273-285. doi: 10.17584/rcch.2017v11i2.7329
- Parra, L. N. (2016). Breve historia geológica y paleobotánica de Colombia. In: Bernal, R., Gradstein, R., & Celis, M. (Eds.), *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Plataforma de Organizaciones de Desarrollo Europeas en Colombia (PODEC). (2011). *Análisis del plan de consolidación de Montes de María*. Bogotá: Author.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2010). *Los Montes de María - Análisis de conflictividad*. Colombia: Author.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2012). *Programa de Desarrollo y Paz de los Montes de María*. Bogotá: PNUD, Corporación territorios, Universidad de Cartagena.
- Reina-Aranza, Y. C. (2012). *El cultivo de ñame en el Caribe colombiano*. Cartagena: Banco de la República, Centro de Estudios Económicos.
- Restrepo-Salazar, J. C. (2011). *Cadena del aguacate - indicadores y apoyos*. Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá.
- Rivera-Jiménez, H. J., Álvarez-Soto, A., Palacio-Mejía, J. D., Barrios-Leal, D. Y., & López-Álvarez, D. (2011). Diversidad genética intra e inter-específica de ñame (*Dioscorea* spp.) de la región Caribe de Colombia mediante marcadores AFLP. *Acta Agronómica*, 60(4), 328-338. doi: 10.15446/acag
- Rivera-Jiménez, H., Álvarez, A., Palacio-Mejía, J., & Ochoa, A. (2012). Molecular characterization of yam (*Dioscorea alata* L.) accessions from the Colombian Caribbean region. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(2), 323-330. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262012000200009
- Rodríguez, W. (2000). Botánica, domesticación y fisiología del cultivo de ñame (*Dioscorea alata*). *Agronomía Mesoamericana*, 11(2), 133-152.
- Rondón, A., & Guevara, Y. (1984). Algunos aspectos relacionados con la muerte regresiva del aguacate (*Persea americana* Mill). *Agronomía Tropical*, 34(1-3), 119-129.
- Rosenstock, T. S., Lamanna, C., Chesterman, S., Hammond, J., Kadiyala, S., Luedeling, E., ... van Wijk, M. T. (2017). When less is more: innovations for tracking progress toward global targets. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26, 54-61. doi: 10.1016/j.cosust.2017.02.010

- Schulz, B., Becker, B., & Gotsch, E. (1994). Indigenous knowledge in a modern sustainable agroforestry system? a case study from eastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 25(1), 59-69. doi: 10.1007/BF00705706
- Segundo-Machado, E., & Huertas-Cardozo, N. (2018). Ecoturismo en San Jacinto Bolívar, propuestas sostenibles a partir de los imaginarios de la comunidad de los montes de María. *Ensayos: Revista de Estudiantes de Administración de Empresas*, 10(1), 146-157. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ensayos/article/view/72502/66252>
- Shepherd, K., Luedeling, E., de Leeuw, J., & Rosenstock, T. (2014). *A novel decision analysis and risk assessment framework for improving agro-ecosystem interventions*. Nairobi, Kenya: Technical Consortium, a project of the CGIAR.
- Simons, A. J., & Leakey, R. R. B. (2004). Tree domestication in tropical agroforestry. In: Nair, P. K. R., Rao, M. R., & Buck, L. E. (Eds.), *New vistas in agroforestry*. Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-017-2424-1_12
- Simons, A. J., & Leakey, R. R. B. (2017). Tree domestication in tropical agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61(1-3), 167-181. doi: 10.1016/B978-0-12-805356-0.00012-X
- Smith, N. J. H., Fik, T. J., Alvim, P. T., Falesi, I. C., & Serrão, E. A. S. (1995). Agroforestry developments and potential in the Brazilian Amazon. *Land Degradation & Development*, 6(4), 251-263. doi: 10.1002/ldr.3400060406
- Sotomayor-Ramirez, D., González-Vélez, A., & Román-Paoli, E. (2003). Yam (*Dioscorea* spp.) response to fertilization in soils of the semiarid southern coast of Puerto Rico. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 87(3-4).
- Sterne, R. E., Kaufmann, M. R., & Zentmyer, G. A. (1978). Effect of *Phytophthora* root rot on water relations of avocado: Interpretation with a water transport model. *Phytopathology*, 68(4), 595. doi: 10.1094/Phyto-68-595
- Toto, E. A., & Kellogg, J. N. (1992). Structure of the Sinu-San Jacinto fold belt - an active accretionary prism in northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(2), 211-222. doi: 10.1016/0895-9811(92)90039-2
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., ... Wanger, T. C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619-629. doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x
- Whitney, C. W., Luedeling, E., Tabuti, J. R. S., Nyamukuru, A., Hensel, O., Gebauer, J., & Kehlenbeck, K. (2017a). Crop diversity in homegardens of southwest Uganda and its importance for rural livelihoods. *Agriculture and Human Values*, 35(2), 1-26. doi: 10.1007/s10460-017-9835-3
- Whitney, C. W., Tabuti, J. R. S., Hensel, O., Yeh, C. H., Gebauer, J., & Luedeling, E. (2017b). Homegardens and the future of food and nutrition security in southwest Uganda. *Agricultural Systems*, 154, 133-144. doi: 10.1016/j.agsy.2017.03.009
- Yabrudy-Vega, J. (2012a). *El aguacate en Colombia: Estudio de caso de los Montes de María, en el Caribe colombiano*. Colombia: Banco de República - Economía Regional.
- Yabrudy-Vega, J. (2012b). El aguacate en los Montes de María: la decadencia de un cultivo exitoso. *RegionES*, 7(2), 99-124.

Appendices / Anexos

Appendix 1. Description of the avocado sub-production system (sSP1) and its relationship with factors and indicators in the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean.

Anexo 1. Descripción del subsistema de producción de aguacate (sSP1) y su relación con factores e indicadores en el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano.

Component / Componente	Description / Descripción	References / Referencias
Production system / Sistema de producción	<p>The production system does not exhibit any level of technological development. Most of the trees are of great height, over 30 years old and are randomly distributed without any type of cultural management./</p> <p>El sistema de producción no exhibe algún nivel de tecnificación. La mayoría de los árboles son de gran altura, mayores a 30 años y están distribuidos de manera aleatoria sin ningún tipo de manejo cultural.</p>	DANE (2015); Yabrudy-Vega (2012); Burbano-Figueroa, Romero-Ferrer, & Moreno-Moran (2018b)
Plant material / Material vegetal	<p>Avocado production in MM is dominated by landraces of West Indian avocados: Cebo, Manteca and Leche./</p> <p>La producción de aguacate en MM está dominada por variedades de aguacates antillanos: Cebo, Manteca y Leche.</p>	DANE (2015); Yabrudy-Vega (2012)
Pests / Plagas	<p>Various pests have been reported in MM, such as termites, mites (<i>Oligonychus</i> spp), and stem and branch borers (family Scolytinae). Termites are the most important pest and include individuals of the genera <i>Coptotermes</i>, <i>Heterotermes</i>, <i>Amitermes</i>, <i>Microcerotermes</i>, <i>Nasutitermes</i>, <i>Rhynchotermes</i> and <i>Syntermes</i>. However, there are no reports of the effect of these pests on yield or control strategies.</p> <p>Tree death associated with ambrosia beetles and their symbionts has been reported in the avocado producing regions of Sierra Nevada de Santa Marta and Serranía de Perijá. These deaths are probably associated with water stress. This phenomenon is not limited to avocado, as it can also occur in cocoa. MM is a region with high risk for the development of this disease./</p> <p>En MM se han reportado plagas como termitas, ácaros (<i>Oligonychus</i> spp), y barrenadores de tallos y ramas (familia Scolytinae), dentro de las cuales las termitas son las de mayor importancia e incluyen individuos de los géneros <i>Coptotermes</i>, <i>Heterotermes</i>, <i>Amitermes</i>, <i>Microcerotermes</i>, <i>Nasutitermes</i>, <i>Rhynchotermes</i> y <i>Syntermes</i>. Sin embargo, no existen reportes del impacto de las plagas sobre el rendimiento o estrategias de control.</p> <p>En los núcleos productores de Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía de Perijá, se ha reportado la muerte de árboles asociada con escarabajos ambrosia y sus simbiosis, probablemente relacionada con el estrés hídrico. El fenómeno no está limitado al aguacate, ya que también puede ocurrir en cacao. MM es una región susceptible a esta nueva enfermedad.</p>	Burbano-Figueroa, Osorio-Almanza, & Arcila-Cardona (2018a); CORPOICA (2014)
Diseases / Enfermedades	<p>Since 2004, avocado production areas have decreased, which is related to multiple factors, especially the presence of <i>Phytophthora infestans</i> and an increase in drought periods. Carmen de Bolívar is the municipality with the largest production area and the one that has the greatest losses. In 2017, there were 3,000 ha planted with avocado (Figure 4)./</p> <p>A partir de 2004, las áreas de producción de aguacate han decrecido, lo cual está relacionado con múltiples factores, especialmente con la presencia de <i>Phytophthora infestans</i> y con el aumento en los periodos de sequía. Carmen de Bolívar es el municipio con la mayor área de producción y el que registra las mayores pérdidas. En 2017, había 3,000 ha sembradas con aguacate (Figura 4).</p>	Burbano-Figueroa et al. (2018a); Osorio-Almanza et al. (2017)
Selling price / Precio de venta	<p>In 2015, the price paid to the farmer per avocado sack did not exceed \$50,000.00 COP./</p> <p>En 2015, el precio pagado al agricultor por bulto de aguacate no superaba los \$50,000.00 COP.</p>	Méndez-Prada (2016)
Production costs / Costos de producción	<p>Crop maintenance costs are minimal; however, the height and architecture of the trees increase harvesting costs and decrease the quality and quantity of the harvested product./</p> <p>Los costos de mantenimiento del cultivo son mínimos; sin embargo, la altura y arquitectura de los árboles incrementa los costos de cosecha y disminuye la calidad y cantidad del producto cosechado.</p>	Méndez-Prada (2016)

Appendix 1. Description of the avocado sub-production system (sSP1) and its relationship with factors and indicators in the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean. (cont.)

Anexo 1. Descripción del subsistema de producción de aguacate (sSP1) y su relación con factores e indicadores en el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano. (cont.)

Component / Componente	Description / Descripción	References / Referencias
Intervention in the sPS / Intervención en el SSP	<p>The crop is managed with minimal intervention.</p> <p>In recent years, the Colombian Agricultural Institute (ICA) has concentrated its efforts on controlling wilting associated with <i>P. infestans</i>, while public and private organizations have allocated their resources to establishing nurseries and new production areas./</p> <p>El cultivo se maneja con mínima intervención.</p> <p>En los últimos años, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) ha concentrado sus esfuerzos en el control del marchitamiento asociado con <i>P. infestans</i>, mientras que organizaciones públicas y privadas han dedicado sus recursos al establecimiento de viveros y nuevas áreas de producción.</p>	Burbano-Figueroa et al. (2018b); Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) (2013, 2014a, 2014b)
System performance indicators / Indicadores de desempeño del sistema		
Production area / Área de producción	<p>The largest registered avocado production area corresponds to 5,000 ha (Figure 4)./</p> <p>La mayor área de producción de aguacate registrada corresponde a 5,000 ha (Figura 4).</p>	DANE (2015); Yabrudy-Vega (2012)
Crop yield / Rendimiento del cultivo	<p>Yield ranges from 5 to 30 t·ha⁻¹, with the highest values reported in Chalán (Figure 5)./</p> <p>El rendimiento varía de 5 a 30 t·ha⁻¹, con los valores más altos reportados en Chalán (Figura 5).</p>	DANE (2015); Yabrudy-Vega (2012)
Farmers' income / Ingresos del agricultor	<p>There are no reports on farmers' income, but it can be estimated from existing information on the number of avocado trees per farm and the yield reported by the farmer. The best available database for this estimate is not publicly available./</p> <p>No existen reportes de ingresos de los agricultores, pero se pueden estimar a partir de la información existente del número de árboles de aguacate por cada finca y el rendimiento reportado por el agricultor. La mejor base de datos disponible para esta estimación no es de acceso público.</p>	Burbano-Figueroa et al. (2018b)

Appendix 2. Description of the cocoa sub-production system (sPS2) and its relationship with factors and indicators in the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean.

Anexo 2. Descripción del subsistema de producción de cacao (sSP2) y su relación con factores e indicadores en el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano.

Component / Componente	Description / Descripción	References / Referencias
Production / Producción	<p>In the municipalities of Carmen de Bolívar and San Jacinto, cocoa orchards are established under the avocado trees for the shade that these provide. Cocoa production areas in MM do not exceed 1,000 ha (Figure 5).</p> <p>Climate and disease are responsible for losses of up to 30 % of world production./</p> <p>En los municipios de Carmen de Bolívar y San Jacinto, los cultivos de cacao se establecen en conjunto con los cultivos de aguacate, debido a que le brindan sombra. Las áreas de producción de cacao en MM no superan las 1,000 ha (Figura 5).</p> <p>El clima y las enfermedades son responsables de la pérdidas de hasta 30 % de la producción mundial.</p>	Castellanos et al. (2011); Fonseca-Rodríguez, Arraut-Camargo, Contreras-Pedraza, Correa-Cantillo, & Castellanos-Domínguez (2011)
Pests / Plagas	<p>Machete disease is caused by <i>Ceratocystis cacaofunesta</i>. Ambrosia beetles (specifically <i>Xyleborus</i>) act as vectors of this fungus. Epidemic events associated with <i>Xyleborus</i>, and other ambrosia beetles, have been reported in avocado and cocoa in other locations in the Caribbean region of Colombia and Venezuela./</p> <p>El mal de machete es una enfermedad ocasionada por <i>Ceratocystis cacaofunesta</i>. Los escarabajos ambrosia (<i>Xyleborus</i> específicamente) actúan como vectores de este hongo. Eventos epidémicos asociados con <i>Xyleborus</i>, y otros ambrosia, han sido reportados en aguacate y cacao en otras localidades de la región del Caribe en Colombia y Venezuela.</p>	Engelbrecht, Harrington, & Alfenas (2007); Rondón & Guevara (1984); Burbano-Figueroa et al. (2018a)

Appendix 2. Description of the cocoa sub-production system (sPS2) and its relationship with factors and indicators in the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean. (cont.)

Anexo 2. Descripción del subsistema de producción de cacao (sSP2) y su relación con factores e indicadores en el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano. (cont.)

Component / Componente	Description / Descripción	References / Referencias
Diseases / Enfermedades	<p>The main cocoa diseases in MM are moniliasis (<i>Moniliophthora roeri</i>) and witches' broom (<i>Moniliophthora perniciosa</i>). Crops in Colombia are highly susceptible to these diseases, especially during the rainy season./</p> <p>Las principales enfermedades del cacao en MM son moniliasis (<i>Moniliophthora roeri</i>) y escoba de bruja (<i>Moniliophthora perniciosa</i>). Los cultivos en Colombia son altamente susceptibles a estas enfermedades, especialmente durante la temporada de lluvias.</p>	Alarcón-Restrepo, Arévalo-Peñaranda, Díaz-Jiménez, Galindo-Álvarez, & Rosero (2012); Fonseca-Rodríguez et al. (2011)
Income / Ingresos	<p>It can be estimated from yield and production area information available in previous reports./</p> <p>Se pueden estimar a partir de la información de rendimiento y áreas de producción disponible en reportes previos.</p>	Fonseca-Rodríguez et al. (2011)
Selling price / Precio de venta	<p>In the last decade, the average price of cocoa exports has remained stable, while the domestic price is extremely volatile. Farmers sell the beans to farmer's associations and these to national retailer companies./</p> <p>En la última década, el precio promedio de las exportaciones de cacao ha mantenido un comportamiento estable, mientras que el precio interno es extremadamente volátil. Los agricultores venden el grano a las asociaciones y estas a las compañías nacionales.</p>	Castellanos et al. (2011); Fonseca-Rodríguez et al. (2011)
Production costs / Costos de producción	<p>Establishment costs are approximately 9 million COP, and costs for the second and third years are more than 3 million COP./</p> <p>Los costos de establecimiento son de aproximadamente 9 millones de COP, y los costos para el segundo y tercer año son superiores a 3 millones de COP.</p>	Castellanos et al. (2011)
Intervention in the sPS / Intervención en el sSP	<p>Cocoa cultivation has been promoted by the country's cocoa industry and NGOs. Additional public and private efforts have focused on the consolidation of the production value chain. /</p> <p>El cultivo del cacao ha sido promovido por la industria cacaotera del país y las ONGs. Esfuerzos adicionales públicos y privados se han concentrado en la consolidación de la cadena productiva.</p>	Castellanos et al. (2011); Fonseca-Rodríguez et al. (2011)

Appendix 3. Description of the yam sub-production system (sPS3) and its relationship to factors and indicators in the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean,

Anexo 3. Descripción del subsistema de producción de ñame (sSP3) y su relación con factores e indicadores en el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano.

Component / Componente	Description / Descripción	References / Referencias
Production / Producción	<p>Plant material: The main yam cultivars used in the region are: Espino, Diamante and Criollo.</p> <p>Production system: Scarcely technified. Yields in the Caribbean region range from 7 to 16 ton·ha⁻¹. The largest registered production area reaches 10,000 ha, arranged in different associations with other crops (Figure 5)./</p> <p>Material vegetal: Las principales variedades de ñame usadas en la región son: Espino, Diamante y Criollo.</p> <p>Sistema de producción: Escasamente tecnificado. El rendimiento en la región Caribe oscila entre 7 a 16 ton·ha⁻¹. La mayor área de producción registrada alcanza las 10,000 ha, dispuestas en diferentes asociaciones con otros cultivos (Figura 5).</p>	Reina-Aranza (2012)

Appendix 3. Description of the yam sub-production system (sPS3) and its relationship to factors and indicators in the avocado agroforestry production system in Montes de María in the Colombian Caribbean. (cont.)

Anexo 3. Descripción del subsistema de producción de ñame (sSP3) y su relación con factores e indicadores en el sistema de producción agroforestal de aguacate en Montes de María en el Caribe colombiano. (cont.)

Component / Componente	Description / Descripción	References / Referencias
Pests / Plagas	There are no significant losses associated with pest damage; however, there are reports of the presence of viruses and associated vectors. No existen de pérdidas considerables asociados con daños por plagas; sin embargo, hay reportes de presencia de virus y vectores asociados.	Agua et al. (2000); Álvarez, Pérez, Díaz, Maestre, & Beltrán (2011); Ministerio de Agricultura y Ganadería (1991)
Diseases / Enfermedades	Yam is susceptible to anthracnose caused by <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> and wilt caused by <i>Fusarium oxysporum</i> . Production losses related to anthracnose may reach 100 %. Epidemic events linked to infected seeds have been recorded. El ñame es susceptible a antracnosis ocasionada por <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> y marchitez causada por <i>Fusarium oxysporum</i> . Las pérdidas en producción relacionadas con antracnosis pueden alcanzar el 100 %. Se han registrado eventos epidémicos vinculados con semillas infectadas.	Pérez-Martínez & Clavijo-Ponce (2012); Pinzón-Gutiérrez, Bustamante, & Buitrago-Hurtado (2013)
Production costs / Costos de producción	They can be estimated from previous reports. Se pueden estimar a partir de reportes previos.	Aguilera-Díaz (2013, 2014)
Selling price / Precio de venta	Between 2016 and 2017, prices per sack ranged from \$10,000.00 to \$140,000.00 COP. The high price in 2016 caused an excessive increase in production areas that resulted in oversupply. Entre 2016 y 2017, los precios por bulto variaron de \$10,000.00 a \$140,000.00 COP. El precio alto de 2016 provocó un incremento excesivo en las áreas de producción que causó sobreoferta.	Madrid-Vergara (2017)
Income / Ingresos	They can be estimated from yield and production area information available in previous reports. Se pueden estimar a partir de la información de rendimiento y áreas de producción disponible en reportes previos.	
Intervention in the sPS / Intervención en el sSP	Research and intervention efforts in the production system have focused on the development of protocols for the production of vegetative seed and farm-scale seed production systems. Los esfuerzos de investigación e intervención en el sistema productivo se han concentrado en el desarrollo de esquemas de producción de semilla vegetativa libre de contaminación biológica y su posterior escalamiento.	Agua et al. (2000); ASOMUDEPAS (2011); Pérez-Martínez & Clavijo-Ponce (2012)

Appendices references / Referencias de anexos

- Agua, A., Álvarez, A., Beltrán, J. D., Buitrago, G., Campo, R., Espitia, A., ... & Romero, J. (2000). *Ñame: producción de semillas por biotecnología*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Aguilera-Díaz, M. (2013). *Montes de María: una subregión de economía campesina y empresarial*. Cartagena: Banco de la república.
- Aguilera-Díaz, M. (2014). La economía de los Montes de María. *Revista Economía & Región*, 8(1), 91-141.
- Alarcón-Restrepo, J. J., Arévalo-Peñaranda, E., Díaz-Jiménez, A. L., Galindo-Álvarez, J. R., & Rosero, A. (2012). *Manejo fitosanitario del cultivo de cacao (Theobroma cacao L.)*. Bogotá: ICA.
- Álvarez, D., Pérez, A., Díaz, J., Maestre, M., & Beltrán, J. (2011). Transmisión del virus del mosaico suave del ñame a *Dioscorea rotundata* (Dioscoreaceae) por *Oncometopia* sp. (Cicadellidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 37(1), 77-79. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rcen/v37n1/v37n1a13.pdf>
- ASOMUDEPAS. (2011). *Producción de semillas de yuca y ñame. Buenas prácticas ambientales "producción de semillas de yuca y ñame" región Montes de María*. Colombia: Author.
- Burbano-Figueroa, O., Osorio-Almanza, L., & Arcila-Cardona, A. M. (2018a). *Spatial distribution of avocado branch*

- dieback and wilting (ABDW) vectored by ambrosia beetles in the Colombian Caribbean. Colombia: AGROSAVIA
- Burbano-Figueroa, O., Romero-Ferrer, J., & Moreno-Moran, M. (2018b). *Soil factors associated with root rot caused by Phytophthora cinnamomi in the agroforestry systems of West Indian avocado (Persea americana) in Montes de María, Colombia*. Colombia: AGROSAVIA
- Castellanos, O., Fúquene, A., Fonseca, S., Ramírez, D., Giraldo, E., & Valencia, M. (2011). *Estudio de la cadena productiva del cacao en Montes de María* (pp. 1-79). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). (2014). *Informe anual 2013*. Bogotá: Author.
- DANE. (2015). *El cultivo del aguacate (Persea americana Miller) fruta de extraordinarias propiedades alimenticias, curativas e industriales*. Bogotá: Author. Retrieved from http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_oct_2015.pdf
- Engelbrecht, C. J., Harrington, T. C., & Alfenas, A. (2007). Ceratocystis wilt of cacao-a disease of increasing importance. *Phytopathology*, 97(12), 1648-1649. doi: 10.1094/PHYTO-97-12-1648
- Fonseca-Rodríguez, S. L., Arraut-Camargo, L. C., Contreras-Pedraza, C. A., Correa-Cantillo, Z., & Castellanos-Domínguez, O. (2011). *Balance tecnológico de la cadena productiva y agroindustrial del cacao en el departamento de Bolívar*. Colombia: Colciencias. Retrieved from http://bdigital.unal.edu.co/4540/1/Balance_Tecnologico_Cacao_Impreso.pdf
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2013). Resolución 4541: Por medio de la cual se declara en emergencia sanitaria el departamento del Cesar y once (11) municipios del departamento de Norte de Santander, por la presencia de un brote de Peste Porcina Clásica en la zona a declarar como libre de la enfermedad. Retrieved from <https://www.ica.gov.co/getattachment/d6c283ce-c1b8-4273-94b7-8aa59af43725/2013R4541.aspx>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2014a) Resolución 3497: Por medio de la cual se establece el procedimiento para la revaluación de los plaguicidas químicos de uso agrícola registrados con anterioridad a la entrada en vigencia de la Decisión CAN 436 y se establecen otras disposiciones. Retrieved from <https://www.ica.gov.co/getattachment/680f5a43-4d44-46dd-b9fa-988b8335a081/2014R3497.aspx>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2014b). *Informe de Gestión*. Retrieved from <https://www.ica.gov.co/modelo-de-p-y-g/transparencia-participacion-y-servicio-al-ciudadano/rendicion-de-cuentas/rendicion-de-cuentas-historico/rendicion-de-cuentas-2014/informe-de-gestion-ica-2014-22052015.aspx>
- Madrid-Vergara, M. (7 de agosto de 2017). Montes de María, con el ñame hasta el cuello. El espectador. Retrieved from <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/montes-de-maria-con-el-name-hasta-el-cuello-articulo-706898>
- Méndez-Prada, M. (2016). Estrategias competitivas del eslabón primario en la cadena productiva de aguacate de los Montes de María. *Revista de Economía y Administración*, 13(1), 95-110. Retrieved from <http://www.uao.edu.co/sites/default/files/Revista%2013-1%20Julio%2013%20Arti%CC%81culo%206.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). *Ñame. Aspectos técnicos sobre cuarenta y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica*. Costa Rica: Author.
- Osorio-Almanza, L., Burbano-Figueroa, O., Arcila, A. M., Vásquez, A. M., Carrascal-Pérez, F., & Romero-Ferrer, J. (2017). Distribución espacial del riesgo potencial de marchitamiento del aguacate causado por *Phytophthora cinnamomi* en la subregión de Montes de María, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(2), 273-285. doi: 10.17584/rcch.2017v11i2.7329
- Pérez-Martínez, M. E., & Clavijo-Ponce, N. (2012). *Innovación con pequeños agricultores: El caso de la Corporación PBA en Colombia*. Bogotá: FAO.
- Pinzón-Gutiérrez, Y. A., Bustamante, S. L., & Buitrago-Hurtado, G. (2013). Differential molecular diagnosis *Colletotrichum gloeosporioides* and *Fusarium oxysporum* in yam (*Dioscorea* sp.). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 52-60. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v15n1/v15n1a6.pdf>
- Reina-Aranza, Y. C. (2012). *El cultivo de ñame en el Caribe colombiano*. Cartagena: Banco de la República, Centro de Estudios Económicos.
- Rondón, A., & Guevara, Y. (1984). Algunos aspectos relacionados con la muerte regresiva del aguacate (*Persea americana* Mill). *Agronomía Tropical*, 34(1-3), 119-129.
- Yabrudy-Vega, J. (2012). *El aguacate en Colombia: Estudio de caso de los Montes de María, en el Caribe colombiano*. Colombia: Banco de República - Economía Regional.