

05

Estudios de la implementación de aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo en sistemas agropecuarios

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Editores

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria


ecoPETROL

05

Estudios de la implementación de aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo en sistemas agropecuarios

Édgar Fernando Almansa Manrique

José Guillermo Velásquez Penagos

Editores

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria


ecopetrol

Estudios de la implementación de aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo en sistemas agropecuarios / Édgar Fernando Almansa Manrique [y otros diecisiete] editado por: Édgar Fernando Almansa Manrique y José Guillermo Velásquez Penagos -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2020.

172 páginas -- (Colección Transformación del agro)
Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos
ISBN obra impresa: 978-958-5461-70-3
ISBN e-Book: 978-958-5461-71-0

1. Riego 2. Hidrocarburos 3. Desarrollo forestal 4. Sistemas agrosilvopascícolas 5. Sostenibilidad 6. Lisímetros
7. Producción animal I. Almansa Manrique, Édgar Fernando (editor) II. Velásquez Penagos, José Guillermo (editor).

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, AGROSAVIA, Centro de Investigación La Libertad. Kilómetro 17, vía Villavicencio-Puerto López, Meta. Código postal 502007, Colombia.

Ecopetrol S.A. Cl. 40 #24A-71, Villavicencio, Meta, Colombia

Esta publicación es resultado del proyecto convenio 5211320 Agrosavia-Ecopetrol titulado “Aunar esfuerzos técnicos, científicos, operativos y financieros para el desarrollo de la investigación del uso y manejo integral de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos en sistemas agropecuarios del área de influencia de Ecopetrol”.

Autores

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Julián Andrés. Peláez Montoya
José Orlando Arguello Tovar
José Henry Velásquez Penagos
Ciro Ortiz Valdés
Sonia Lucía Gutiérrez Parrado
Diana Patricia Barajas Pardo
Gloria Estefanía. Pastrana Aguirre
Jennifer Zulay Tafur Sanabria
Viviana Irene Romero Ramírez
Víctor Fabio Luna-Mora
Guillermo Alfonso Bueno Guzmán
Luisa Fernanda Posada
Óscar Javier Cerniza Murcia
Diego Mauricio Pabón Leal
Otoniel Pérez López
Xiomara Pulido Castro

Editores

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos

Ecopetrol S.A.

Felipe Bayón Pardo

Presidente

Santiago Martínez Ochoa

Gerente de Desempeño Ambiental

Rubén Darío Collazos Lamilla

Gerente de Desarrollo y Producción Castilla

Sandra Yamile Álvarez Aceros

Líder Palanca de Agua

Juanita de la Hoz Herrera

Gerente de Prosperidad Social

Edwinder Bolaños Rodríguez

Ingeniero de Producción Gerencia Castilla

Yalitza Margarita Sierra Gutiérrez

Líder Ambiental Regional Orinoquia

Agrosavia

Jorge Mario Díaz Luengas

Director Ejecutivo

Mauricio Torres Munevar

Director CI La Libertad

Ariel Hurtado Rodríguez

Director Administrativo y Financiero

Sandra Tatiana Rivero Espitia

Directora de Planeación y Cooperación Institucional

ISBN: 978-958-5461-70-3

Primera edición: 500 ejemplares, Bogotá, Colombia, junio de 2020



Coordinación editorial

Astrid Verónica Bermúdez
Juan Mikán
Andrés Barragán

Corrección de estilo

Juan Mikán

Diseño y diagramación

.Puntoaparte

Impresión: DGP editores

Citación sugerida: Almansa-Manrique, E. F. & Velásquez-Penagos, J. G. (2020). *Estudios de la implementación de aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo en sistemas agropecuarios*. Agrosavia; Ecopetrol.

Cláusula de responsabilidad

Agrosavia y Ecopetrol no son responsables de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente:
018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co/

Agradecimientos

Esta publicación es el esfuerzo conjunto de muchas personas, a quienes agradecemos por su apoyo. En Agrosavia a Jaime José Triana Restrepo†, Julián Londoño, Camilo Sánchez, Gustavo Alfonso Quijano, Guillermo González, Oscar Rondón, Sonia Gutiérrez, Harold Casa, Álvaro Cárdenas, Jaime Cardozo, James Franco, Eduardo Gil, Fernando García, Alejandro Cruz, Nelson Baquero, Guillermo Onofre, Albert Gutiérrez, Miguel Peña, Nubia Rodríguez, Miguel Peña, Elizabeth Cassalett, Lina Moreno, Oscar Pardo, Judy Chacón, Cesar Jaramillo, Nora Cubillos, Paola Espinosa , Alejandro Murcia, Adonái Rojas, Ruth Marín, Erlinda Nieto y Milady Ruiz. En Ecopetrol a Javier Genaro Gutiérrez, Héctor Castaño, Héctor Manosalva, Omar Armando Baquero, José Cotello, Mauricio Herrera, Lupe Estupiñán, Daniel Torregrosa, Wilson De Lacruz, Giovanni Annicchiarico, Andrés Zárate, Juan Burgos y Yalitza Sierra.

Así mismo, extendemos nuestro reconocimiento a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en este proyecto.



Contenido



01

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

P. 8



02

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal

P. 42



03

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

P. 72



04

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)

P. 108



05

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

P. 126



06

Los autores
Referencias

P. 160

P. 164



Introducción

En todo el mundo, el crecimiento demográfico y la expansión económica están incrementando la presión sobre los recursos de agua dulce, un fenómeno que se agrava ahora cada vez más a causa del cambio climático. Este recurso natural es fundamental para la producción agrícola, y su creciente escasez —que probablemente se intensificará en un contexto de cambio climático—, tiene implicaciones muy importantes que pone a prueba la capacidad de la humanidad para alimentarse. Al mismo tiempo, también aumentará el consumo del recurso en las ciudades y la industria: así, mientras que actualmente la agricultura supone el 70% del consumo de agua dulce en todo el mundo, el crecimiento de al menos un 50% esperado en la demanda de alimentos incrementará a su vez las necesidades hídricas del sector agrícola.

Frente a este panorama, el mayor uso de fuentes alternativas y no convencionales de agua, incluyendo los efluentes urbanos e industriales y la escorrentía superficial, surge como una valiosa alternativa, siempre que el agua sea tratada de forma adecuada. Las aguas residuales, particularmente, además de ayudar a hacer frente a la escasez de agua, tienen a menudo una elevada carga de nutrientes, por lo que en teoría serían un buen fertilizante. “Cuando se utilizan y manejan con seguridad para evitar riesgos para la salud y el medio ambiente, las aguas residuales pueden dejar de ser un problema

y convertirse en un activo” (FAO De Souza). Es así como lo que antes se consideraba un problema, esto es, los vertimientos líquidos urbanos e industriales, ahora sea visto como una opción frente a la escasez de agua.

Las aguas residuales pueden usarse de manera segura para la producción agrícola directamente mediante el riego o indirectamente mediante la recarga de acuíferos, pero hacerlo requiere de investigación y gestión diligente de los riesgos sanitarios a través de un tratamiento adecuado o un uso apropiado. Con esta premisa en mente, en esta publicación se presentan en forma resumida algunas de las experiencias realizadas dentro del marco del convenio entre Agrosavia y Ecopetrol que tiene como objetivo “aunar esfuerzos técnicos, científicos, operativos y financieros para el desarrollo de la investigación sobre el uso y manejo integral de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos en sistemas agropecuarios del área de influencia de Ecopetrol”.

ATAEP o Agua de producción: Es el agua tratada asociada a la explotación del petróleo que ha pasado por una serie de procesos de filtración, decantación y oxigenación para dar cumplimiento a parámetros establecidos por normatividad para reúso en otras actividades.



01

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

Édgar Fernando Almansa Manrique*

Julián Andrés Peláez Montoya

José Orlando Arguello Tovar

*Autor de correspondencia

En la explotación de pozos petroleros se obtienen por lo general grandes cantidades de agua al extraer el crudo desde las profundidades de la corteza terrestre. A través de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia (antes Corpoica), Ecopetrol ha realizado trabajos de investigación sobre el efecto de estas aguas en los suelos, cuando se usan para el riego, en sistemas de producción agrícola.

En el municipio de Villavicencio, localizado en el departamento del Meta, Colombia, se realizó una investigación en condiciones de invernadero durante siete años consecutivos en la que se monitoreó, mediante la técnica de lisímetros con fondo, el efecto del riego con aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo (ATAEP) en la calidad y salud del suelo, así como en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos. Para alcanzar este objetivo se monitorearon permanentemente las propiedades físicas, químicas, microbiológicas y ambientales de los suelos a los que se les suministró riego permanente con dos calidades de agua (ATAEP y agua normal de pozo profundo).

La información consignada en esta publicación se sustenta en 36.836 determinaciones analíticas, las cuales se originaron en 2.892 muestras de suelo, 2.112 análisis químicos a plantas efectuados en 248 muestras de tejido vegetal y 5.000 determinaciones de calidad realizadas a 1.000 muestras de agua. Como resultado general de la investigación, no se encontró efecto negativo del uso de ATAEP para el riego de cultivos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Los análisis realizados a las muestras del agua de riego de la estación Apiay permiten clasificar el agua disponible como C2S1, según el diagrama de Wilcox del Laboratorio de Salinidad de Riverside California utilizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Por lo tanto, las ATAEP utilizadas en esta investigación son aptas para irrigación de cultivos, sin restricciones en su utilización (cumple con el artículo 40 del Decreto 1594 para uso agrícola y la Resolución 1207 de 2014 sobre reúso de aguas).

Generalidades

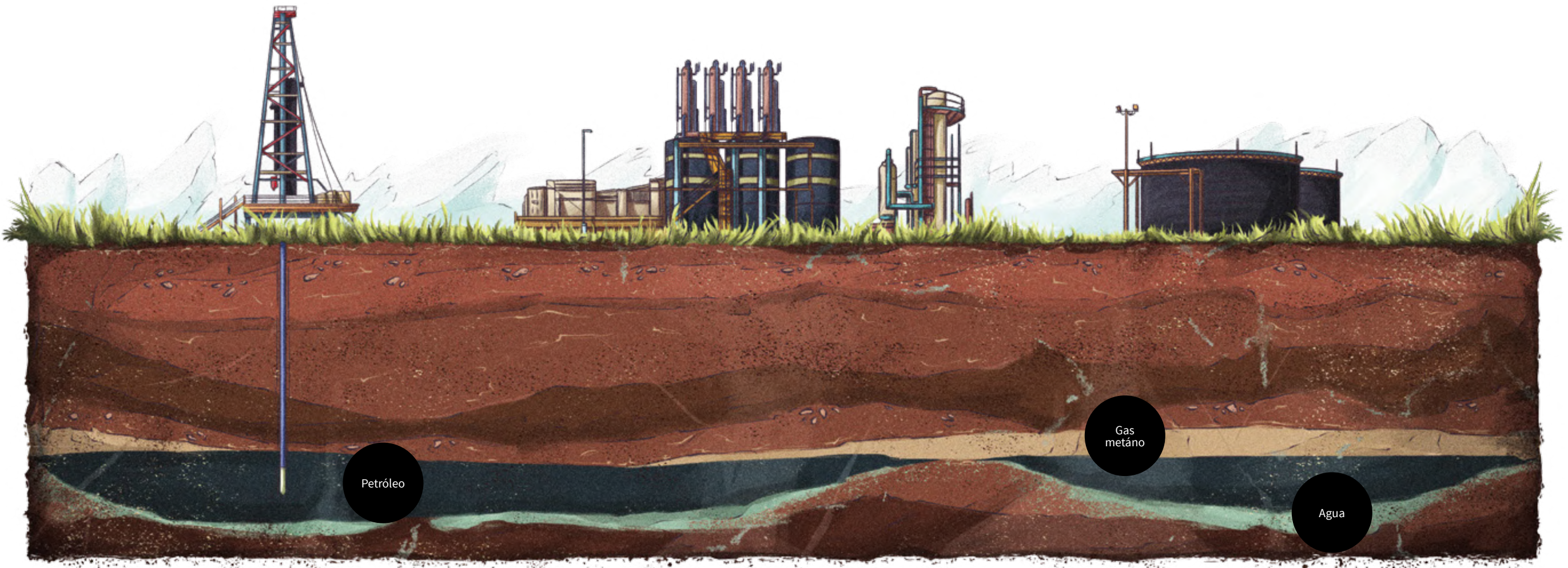
Las ATAEP que derivan de la zona industrial de Eco-petrol en la gerencia de desarrollo Apiay cumplen con la norma de calidad legal ambiental exigida para ser vertidas a un cauce superficial de agua. Sin embargo, es conveniente evaluar su uso potencial en sistemas productivos con miras a convertir este residuo en un recurso y aumentar la eficiencia en el uso del agua en el área de influencia del piedemonte llanero, especialmente en la época seca del año (cuatro meses), cuando la falta de este recurso natural se convierte en el principal limitante a la producción agropecuaria.

La solución ambiental adecuada de los residuos de la industria con algunos contenidos de hidrocarburos generados durante los procesos de la perforación, extracción y producción del petróleo se encuentra dentro de las prioridades fundamentales de la industria petrolera. El ATAEP, en especial, puede ser tratada y eliminada por varios métodos, la mayoría de los cuales se limitan a acatar con lo establecido en la norma ambiental para el vertimiento a corrientes

superficiales. Ahora bien, particularmente para su uso en riego, las ATAEP deben cumplir con la Resolución 1207 de julio de 2014, el Decreto 3930 de 2010, el Decreto 1594 de 1984 y el Decreto 1541 de 1978.

Debido a los costos que implica el manejo de ATAEP —de entre 5 y 50 centavos de dólar por barril de agua producido según Reyna (2018)—, es imprescindible desarrollar modelos de uso de esta agua que permitan gestionar una mayor eficiencia en su tratamiento y disposición final, de manera que su peso relativo no llegue a ser limitante en la rentabilidad de las operaciones de campo. Este razonamiento admite que, si bien el aspecto económico es substancial tanto para la industria como para la sociedad actual, la gestión ambiental ha cobrado un papel relevante que está motivando hoy por hoy a buscar nuevas alternativas para disminuir la disposición final de los residuos y, en su lugar, darles un uso que permita generar la solución a una necesidad de la comunidad. En este sentido, el potencial del reúso de las aguas tratadas cobra importancia a la luz de los trabajos realizados con ATAEP en el piedemonte llanero.

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo





Materiales y métodos

Para el monitoreo del efecto de las aguas tratadas de producción en cultivos bajo condiciones controladas, se implementó la técnica de lisímetros plásticos con fondo (área superficial de 1 m²), que consiste en mantener un volumen de suelo conocido al cual se le siembra un cultivo y se le

aplica periódicamente una dosis de agua hasta alcanzar la cosecha bajo condiciones de manejo agronómico similares a las que se utilizan en un cultivo convencional.

Ubicación

La investigación se realizó en el Centro de Investigación La Libertad de Corpoica, en el municipio de Villavicencio: geográficamente, a los 04° 3' 32,39" latitud norte y 73° 27' 59,86" longitud oeste. Dentro de un invernáculo, se instalaron 48 tanques lisimétricos que fueron llenados con suelo de textura franca arenosa arcillosa (FArA).



Figura 1.
Invernáculo del ensayo

Fuente: Fotografía tomada por los autores

Metodología

Riego de agua
tratada de
producción y su
efecto sobre
el suelo

- 1 Se implementó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones.
- 2 Se ensayaron tres coberturas: caña de azúcar (CC-8592), pasto elefante y suelo desnudo.
- 3 Se utilizaron láminas de riego controladas (según el consumo registrado con medidores de humedad edáficos) con una frecuencia de dos riegos semanales.
- 4 Se evaluaron dos calidades de agua (ATAEP y agua normal de pozo profundo) y dos límites de agua (suministros de agua para mantener el 100% y el 80% de la humedad disponible en el suelo para la planta). El agua normal (N) provino del pozo profundo manejado en el centro de investigación, y las ATAEP de Ecopetrol provinieron de las aguas tratadas del sistema de tratamiento de aguas de producción (STAP) de la estación Apiay.
- 5 Para el análisis se realizó semestralmente un muestreo de suelos con el fin de evaluar las variaciones químicas, físicas, microbiológicas y ambientales debidas a los tratamientos.
- 6 Semanalmente, se monitorearon para cada tipo de agua la conductividad eléctrica, la salinidad, el pH y la temperatura.
- 7 Mensualmente, se monitorearon los parámetros vegetativos de las especies establecidas, y al final de cada ciclo se hicieron análisis de tejido vegetal y bromatológico.
- 8 Se monitorearon las condiciones ambientales por medio de una estación climática automatizada (temperatura del ambiente y edáfica, humedad relativa, brillo solar, radiación).
- 9 Se realizó permanentemente el manejo agronómico recomendado por Corpoica-Agrosavia a las especies establecidas.
- 10 Para el análisis de resultados se utilizó el paquete estadístico SAS y el software JMP® de SAS y se realizaron pruebas de comparación de medias por Tukey.



Resultados

Efecto en suelos

Para conocer los efectos en el suelo de la aplicación de ATAEP como riego en la producción de cultivos se realizaron diferentes tipos de análisis y determinaciones (físicas, químicas, microbiológicas y ambientales) que permitieron cuantificar el contenido de elementos minerales aportados por esta práctica y vislumbrar la posibilidad real de afectación al recurso edáfico.

Física de suelos

Las propiedades físicas del suelo permiten entender la manera en que las prácticas agronómicas que el hombre realiza para la producción de cultivos modifican y afectan la calidad del recurso. De este modo es posible comprender la importancia del suelo y las posibles formas de mantener y mejorar las condiciones de este. Para el caso de esta investigación, se determinó el efecto del uso de ATAEP en las propiedades físicas del suelo al compararlo con el efecto observado con el uso de un agua normal (de pozo profundo, no petrolera). El análisis de varianza incluyó pruebas de comparación múltiple de Tukey (tabla 1).

→
Tabla 1.
Respuesta de la densidad aparente, porosidad total y diámetro ponderado medio en suelos con riego (ATAEP y normal).

	D.A (g.cm ⁻³)		Porosidad total (%)		DPM (mm)	
E 100	Sin cultivo 1,39 a	Con cultivo 1,23 a	Sin cultivo 47,44 b	Con cultivo 52,97 a	Sin cultivo 2,38 a	Con cultivo 3,13 a
E 80	Sin cultivo 1,38 a	Con cultivo 1,21 a	Sin cultivo 47,36 b	Con cultivo 54,23 a	Sin cultivo 1,84 b	Con cultivo 2,30 b
N 100	Sin cultivo 1,31 b	Con cultivo 1,21 a	Sin cultivo 50,69 a	Con cultivo 54,69 a	Sin cultivo 1,45 b	Con cultivo 1,76 c
N 80	Sin cultivo 1,26 b	Con cultivo 1,20 a	Sin cultivo 52,08 a	Con cultivo 54,36 a	Sin cultivo 1,75 b	Con cultivo 1,49 c

*DA: Densidad aparente y DPM: Diámetro ponderado medio. Letras distintas dentro de la misma columna para cada variable representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Densidad aparente (DA)

La densidad aparente de un suelo se define como la relación que existe entre el peso seco de una muestra secada en horno (105 °C) y el volumen que esa muestra ocupaba en el suelo. Esta es una de las propiedades más estudiadas en física de suelos por su importancia en la cuantificación de los cambios en la compactación, la dispersión de agregados y la circulación de aire y agua, entre otros producidos por prácticas agrícolas inadecuadas.

Tal como se observa en la tabla 1, en el ensayo llevado a cabo en el Centro de Investigación La Libertad se encontró diferencia significativa de la densidad aparente debida al tipo de agua utilizada en los lisímetros sin cultivo que fueron regados permanentemente, mientras que no se encontró influencia del agua en la densidad aparente en los lisímetros cuando contenían cultivos.

El valor de la densidad aparente encontrada en esta investigación para todos los casos es inferior al normal reportado por Amézquita, Hoyos y Molina (2003) para un suelo franco arcilloso de la Orinoquia colombiana (1,46 g.cm⁻³). Para los mismos suelos, Almansa, Bernal y Argüello (2006) consideran que un valor de 1,3 g.cm⁻³ permite una adecuada aireación y movimiento del agua.



Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

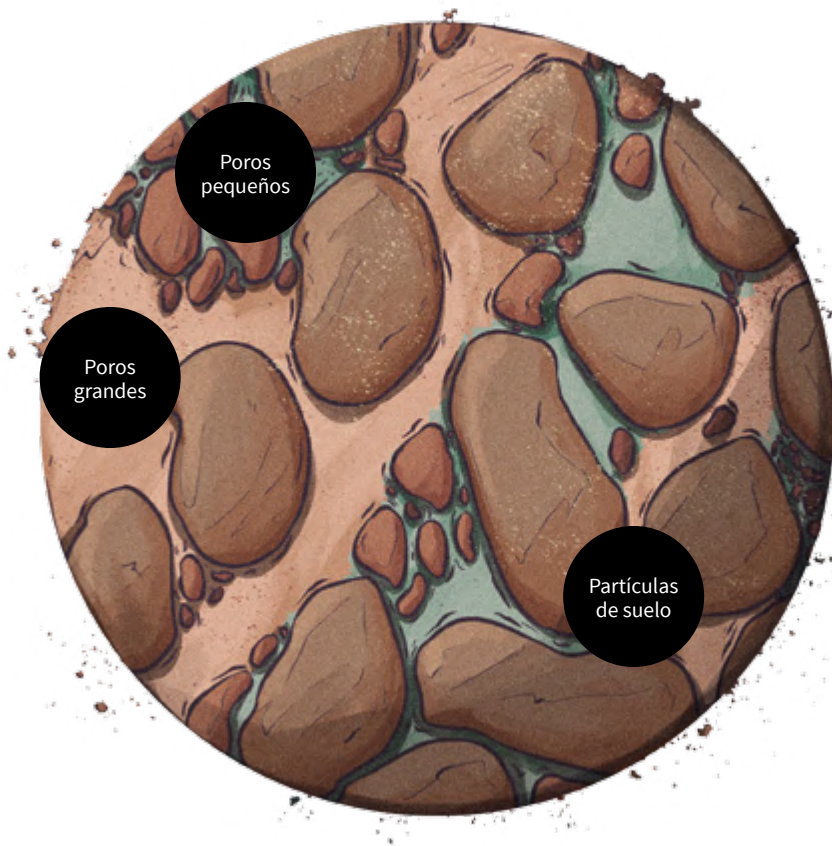


Porosidad total

La porosidad constituye una de las características más importantes del suelo desde el punto de vista de la fertilidad (Lora, 1998) y se define como la porción de espacios o cavidades ocupados por aire y agua que existe en un volumen de suelo. La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo.

Para una correcta aireación del suelo y una buena retención de agua, es conveniente que la porosidad se sitúe entre el 40% y el 60%. Valores menores del límite inferior pueden crear asfixia en las raíces, contenidos muy bajos de agua retenida, o ambas cosas a la vez, mientras que un valor superior al límite máximo supone una dificultad para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas.

El análisis estadístico realizado a propósito de esta propiedad, reflejado en la tabla 1, trató de determinar si en el tiempo la porosidad total se había afectado por los tratamientos de manejo utilizados. Como se observa en dicha tabla, se encontró diferencia significativa de la porosidad



total debida al tipo de agua utilizada en los lisímetros sin cultivo que fueron regados permanentemente, en tanto que no se encontró influencia del agua en la porosidad total en los lisímetros cuando contenían cultivos.

En todo caso, se puede establecer que los valores encontrados en la porosidad del suelo en los ensayos realizados no presentaron niveles críticos que indicaran afectación negativa por los tratamientos de manejo realizados.

Estabilidad estructural

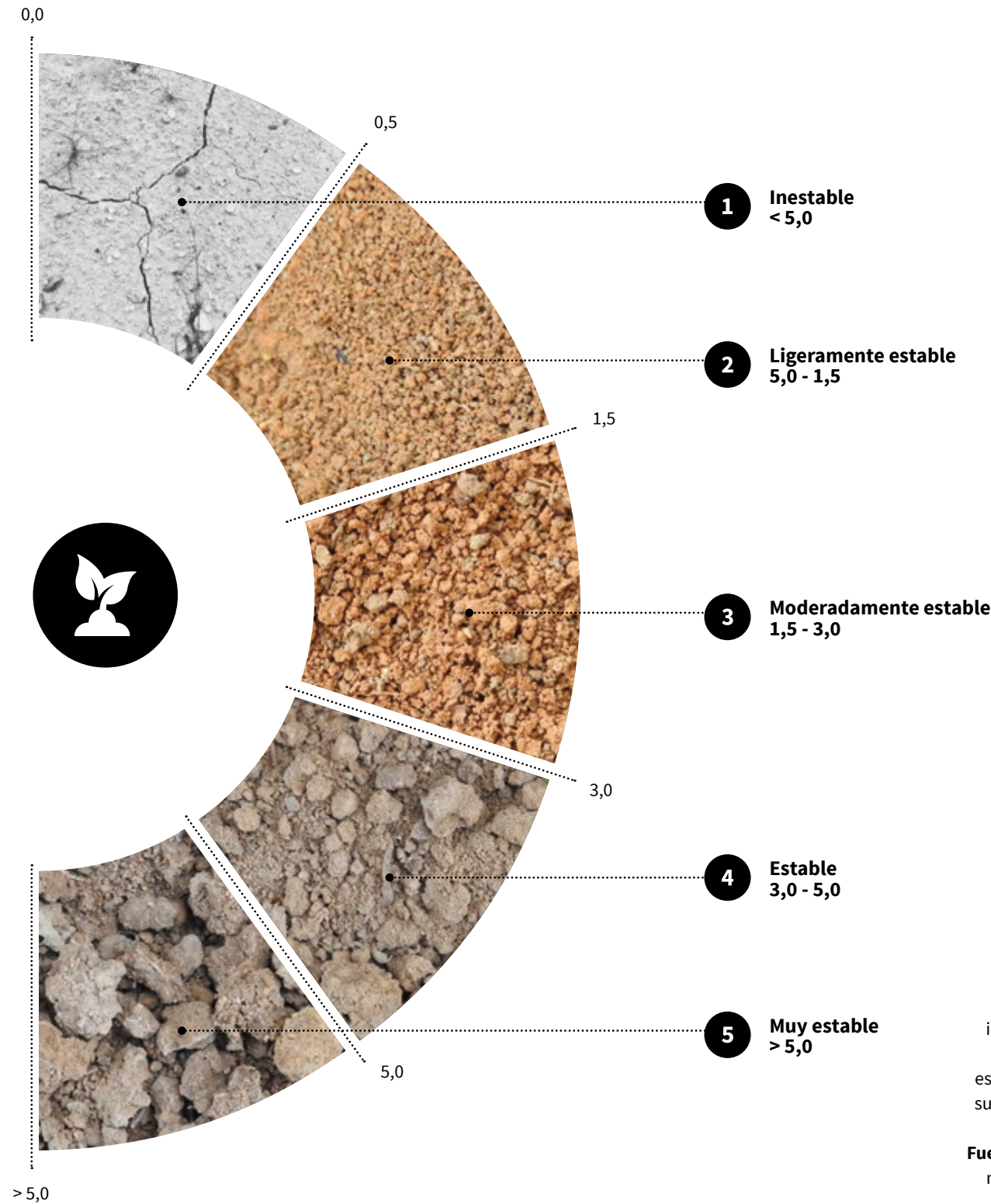
La estructura del suelo se define como el “ordenamiento de las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla) en agregados”. Un agregado es un grupo de dos o más partículas primarias cuya coherencia entre sí es más fuerte que con las partículas que las rodean. Por otra parte, la estabilidad de la estructura es definida como la resistencia que los agregados del suelo ofrecen a los agentes disgregantes externos (el principal agente destructor de la estructura del suelo es el agua). También hay pérdida de la estructura por otros mecanismos fisicoquímicos tales como el efecto dispersante de algunos cationes (Baver, Gardner y Gardner, 1972). Finalmente, el tamaño de los agregados del suelo es un factor determinante en el tamaño de los poros, lo cual condiciona el movimiento y distribución del agua y del aire en este (Motta *et al.*, 1990).

La inestabilidad de los agregados se debe principalmente al tipo de arcilla, a la naturaleza de los productos de la descomposición de la materia orgánica, a los cationes asociados con los coloides (el exceso de sodio provoca dispersión de partículas) y a la naturaleza de la floculación microbiana (los micelios y las sustancias gomosas producidas por las bacterias favorecen la agregación). El pH y la cantidad de calcio también influyen (Narro, 1994). En 1949, Van Bavel introdujo el concepto del diámetro ponderado medio de los agregados del suelo como índice de agregación. En la tabla 2 se presenta la clasificación de Montenegro, con los rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al diámetro ponderado medio (DPM).

Así pues, en la evaluación de estabilidad estructural se tuvo en cuenta el DPM (figura 2). La investigación evidenció la tendencia, con diferencia significativa de los lisímetros sometidos a tratamientos de riego con ATAEP (E100), a presentar condiciones de suelo moderadamente estable

(sin cultivo), mientras que los casos con cultivo presentaron una clasificación estable (3,13 mm). En general, las mejores condiciones de estabilidad de los agregados valorados con el método de DPM se observan en los tratamientos con cultivo y en donde se han utilizado ATAEP para el riego.

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo



←
Figura 2. Rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al DPM
Fuente: Montenegro (2003).

Química de suelos

La calidad del suelo se define como su “capacidad de asegurar las condiciones y disponibilidad de nutrientes requeridos para producir cultivos sanos y nutritivos de una manera sostenible a largo plazo, sin impactar los recursos naturales o dañar el ambiente, reflejada en salud, bienestar y calidad de vida” (Sánchez de Prager, 2007).

Las propiedades químicas del suelo conciernen fundamentalmente a los contenidos de diferentes nutrientes importantes para el desarrollo óptimo de las plantas y que le dan al suelo diferentes características de acuerdo con el origen y a las condiciones en que se ha formado. El conocimiento de estas propiedades permite identificar ciertas características del suelo respecto a su manejo y a los cambios químicos originados por la acción antrópica y las nuevas reacciones que alteran el estado de equilibrio natural de estos.

Calcio

La cantidad total de calcio (Ca) en el suelo es variable. En los suelos áridos y calcáreos se presentan niveles muy altos, mientras que en los suelos viejos de los trópicos se tiene bajo nivel de este elemento. En general, los suelos arcillosos contienen más Ca que los suelos arenosos.

Las concentraciones más bajas de Ca ocurren en suelos muy lavados, con capacidades de intercambio catiónico bajas. Para los suelos de los llanos orientales, Amézquita *et al.* (2003) encontraron valores usuales de Ca en suelos de textura franco arcillosa de 0,11 cmol⁽⁺⁾.kg⁻¹ y de 0,20 cmol⁽⁺⁾.kg⁻¹ para suelos de textura franco arenosa. Para ambos tipos de suelo se consideró que se debe tener un valor mínimo de 1,5 cmol⁽⁺⁾.kg⁻¹ para garantizar la salud y productividad de este recurso. En el caso de este experimento, se registraron valores superiores a los

niveles mínimos adecuados considerados por estos investigadores en suelos naturales ácidos con alto contenido de aluminio (tabla 2).

Los tratamientos de manejo en donde se utilizó ATAEP para riego mostraron diferencias significativas de este elemento con relación a los tratamientos en donde se utilizó agua normal. Así, los valores más altos se dieron en los tratamientos en donde se establecieron cultivos en relación con los lisímetros en donde no hubo cultivos.

Para el caso de los lisímetros con cultivos, este elemento es extraído por las plantas para su desarrollo vegetativo, el cual es esencial para el crecimiento de los meristemos y, particularmente, para el desarrollo y funcionamiento adecuados de los ápices de las raíces. Por otro lado, en los lisímetros sin cultivo se presentó una disminución del Ca en los tratamientos (N) debido posiblemente a que el agua natural no aporta este elemento, como sí lo hace el ATAEP (E).

En el ensayo realizado en el CI La Libertad en los lisímetros con y sin cultivo se encontró en todos los casos que el contenido de Ca reportado superó los 1,5 cmol.kg⁻¹, que es el fijado por Amézquita *et al.* (2003) como indicador deseable para los oxisoles de la Orinoquia colombiana.



Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

- Sin cultivo
- Con cultivo

	E 100		E 80		N 100		N 80	
Ca (cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)	3,31 a	5,04 a	2,80 b	4,18 b	1,91 c	1,68 c	1,82 c	1,64 c
Mg (cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)	0,66 a	0,84 a	0,61 b	0,80 a	0,52 c	0,43 b	0,47 d	0,40 b
K (cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)	0,27 a	0,19 b	0,25 a	0,21 a	0,09 b	0,10 c	0,10 b	0,10 c
Na (cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)	1,88 a	1,76 a	1,93 a	1,80 a	0,12 b	0,11 b	0,10 b	0,09 b
Cond. eléctrica (dS.m ⁻¹)	0,48 a	0,72 a	0,54 a	0,73 a	0,09 d	0,20 b	0,13 c	0,16 b
pH (suelo 2,5 : 1,0)	6,66 a	6,65 a	6,53 b	6,47 a	5,29 c	4,75 b	5,07 d	4,67 b

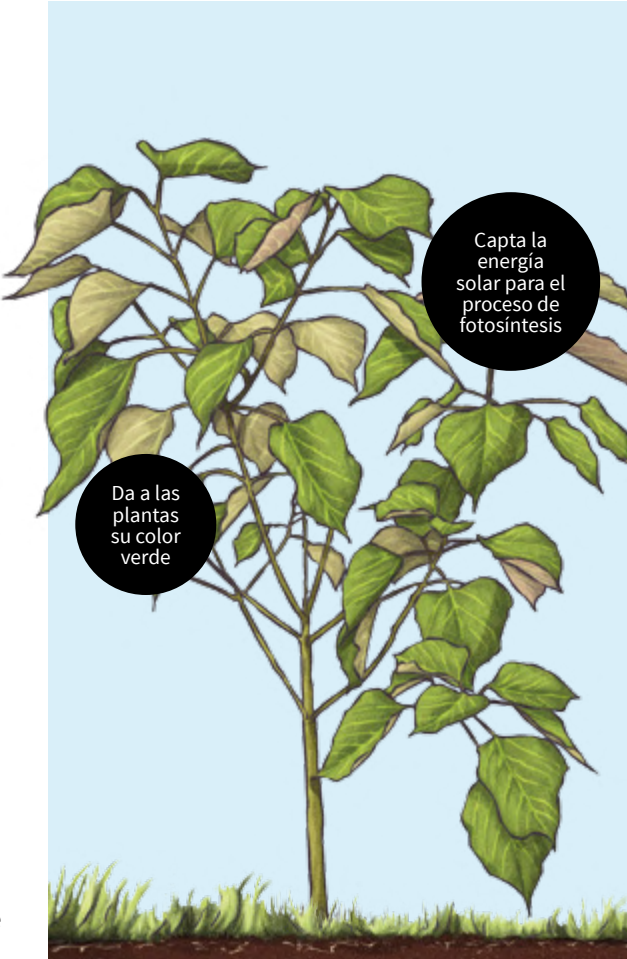
← **Tabla 2.** Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de Ca en el suelo

*Letras distintas dentro de la misma fila para cada variable representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Magnesio

El magnesio (Mg) es un elemento fundamental para la realización de varias funciones importantes en los vegetales, como la intervención en la síntesis de xantofilas y carotenos y la activación de varias enzimas, particularmente aquellas involucradas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas, que contribuyen a mantener una turgencia óptima de las células y participan en la formación de carbohidratos en la planta. Uno de los papeles más importantes del Mg se encuentra en el proceso de la fotosíntesis, ya que es un componente elemental de la clorofila. La deficiencia de este nutriente restringe el desarrollo radicular, especialmente en el cultivo de caña de azúcar, debido principalmente a la extracción de este elemento para el desarrollo vegetativo (Humbert, 1974; Silva y Casagrande, 1983, citado por Durán, 1998).

Según Salinas y Valencia (1983), el contenido representativo de los oxisoles de la Orinoquia colombiana es de $0,1 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$. Amézquita *et al.*



→ **Figura 3.** El Mg como componente fundamental de la clorofila

al. (2003) por su parte sitúan este tenor según la textura del suelo entre $0,09 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ para suelos arcillosos y $0,07 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ para suelos francos. Según la Universidad de la Rioja (2014), valores por debajo de 0,25 son considerados muy bajos. En definitiva, un contenido de Mg de $0,6 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ se considera aceptable según el criterio de Amézquita *et al.* (2003) para mantener la salud y fertilidad del suelo (oxisol). Los tratamientos regados con ATAEP durante esta investigación lograron esta condición, pero no así los regados con agua normal.

Potasio

El potasio (K) es un nutriente esencial para las plantas, requerido en grandes cantidades para el crecimiento y la reproducción de estas. Se considera segundo en importancia luego del nitrógeno, cuando se trata de nutrientes que necesitan las plantas, y es generalmente considerado como el “nutriente de calidad”. Este elemento afecta la forma, el tamaño, el color y el sabor de la planta y otras medidas atribuidas a la calidad del producto.

Según Salinas y Valencia (1983), el contenido de potasio representativo de los oxisoles de la Orinoquia colombiana es de $0,1 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$, y Amézquita *et al.* (2003) sitúan este tenor según la textura del suelo entre $0,09 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ para suelos arcillosos y $0,04 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ para suelos francos. Según Andrades y Martínez (2014), valores por debajo de 0,12 son considerados muy bajos. En ese orden de ideas, Amézquita *et al.* (2003) consideran un contenido de K de $0,15 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ como aceptable para mantener la salud y fertilidad del suelo (oxisol).

De acuerdo con el análisis estadístico realizado a la información multitemporal de este parámetro del suelo (tabla 2), se presentan diferencias significativas entre los tratamientos considerados: para el caso de los lisímetros sin cultivo, se evidencia que el ATAEP realiza aporte de este elemento, mientras que los lisímetros con cultivo presentan una disminución del K a través del tiempo debido a la extracción de este nutriente por la planta. Solamente los tratamientos regados con ATAEP lograron la cantidad aceptable de potasio propuesta por Amézquita *et al.* (2003), esto es, mayor o igual a $0,15 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$.



Figura 4. Síntomas de deficiencia de K en plantas.



Sodio

Para la mayoría de los cultivos no se ha demostrado que el sodio (Na) sea esencial para su desarrollo, aunque se conoce que puede reemplazar al potasio en algunos casos. Muchas plantas cuentan con mecanismos que reducen la absorción y la translocación del Na a las hojas, por lo que no es común que aparezcan síntomas de toxicidad en estas, ya que se acumula en tallos, troncos y raíces. El exceso de Na puede provocar deficiencias de otros cationes, como K, Ca y Mg. El efecto perjudicial del Na sobre los cultivos es en la mayoría de los casos indirecto debido a la influencia negativa que tiene este catión sobre la estructura del suelo, desplazando al Ca y al Mg del complejo arcillo-húmico, provocando así la dispersión de las partículas del suelo, lo que acarrea el desmoronamiento de la estructura de este, de manera que el recurso pierde su capacidad de aireación y de infiltración. Además, se produce alcalinización, pudiéndose elevar el pH por encima de 8,5.

El análisis de suelos normalmente reporta el valor del Na intercambiable del suelo, el cual suele ser mayor que el del Na soluble; de hecho, usualmente es un múltiplo (entre el doble y el quíntuplo) del Na soluble. Dicho de otra forma, entre un 20% y un 50% del Na que aparece en los análisis de suelos reportados como Na intercambiable es extraíble por el agua pura.

La concentración de sales confiere al suelo unas propiedades muy particulares con efectos nocivos para los cultivos. Si el catión predominante es el Ca^{++} , las

sales solubles son muy abundantes en el suelo. El perfil se encuentra muy poco diferenciado, pero su estructura tiende a ser estable, como resultado de la acción floclante del Ca^{++} . Por otro lado, cuando el Na^{+} es el catión dominante se produce la dispersión de las arcillas, lo que lleva a una destrucción de la estructura.

Las sales pueden encontrarse en el suelo de varias formas: precipitadas bajo la forma de cristales, disueltas en la solución, o bien retenidas, adsorbidas, en el complejo de cambio. El contenido en sales en el suelo está cambiando continuamente al ir variando la humedad edáfica, de forma que estas van pasando de una posición a otra. Así, en el periodo seco la cristalización aumenta, las sales en solución disminuyen (aunque la solución se concentra) y aumentan las adsorbidas, mientras que en el periodo húmedo el comportamiento es inverso.

Al proceso de acumulación de sales en los suelos con predominio del Ca y el Mg se le denomina salinización, y cuando es el Na el que predomina netamente, en el suelo se desarrolla un proceso llamado alcalinización.

En el trabajo realizado y aquí comentado se advierte que, en todos los casos considerados, en los tratamientos en donde se utilizó ATAEP para riego los niveles de Na son más altos en comparación con los regados con agua normal debido a los mayores contenidos de dicho elemento en las ATAEP. Sin embargo, dicho contenido de Na se considera bajo (95 mg.l^{-1} en promedio), teniendo en cuenta que el límite permisible estipulado por la norma de reúso (Resolución 1207) es de 200 mg.l^{-1} .



Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica ha sido el parámetro más extendido y ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución, y se expresa en dS.m^{-1} (deciSiemens por metro). La CEs (conductividad eléctrica saturada) refleja la concentración de sales solubles en la solución.

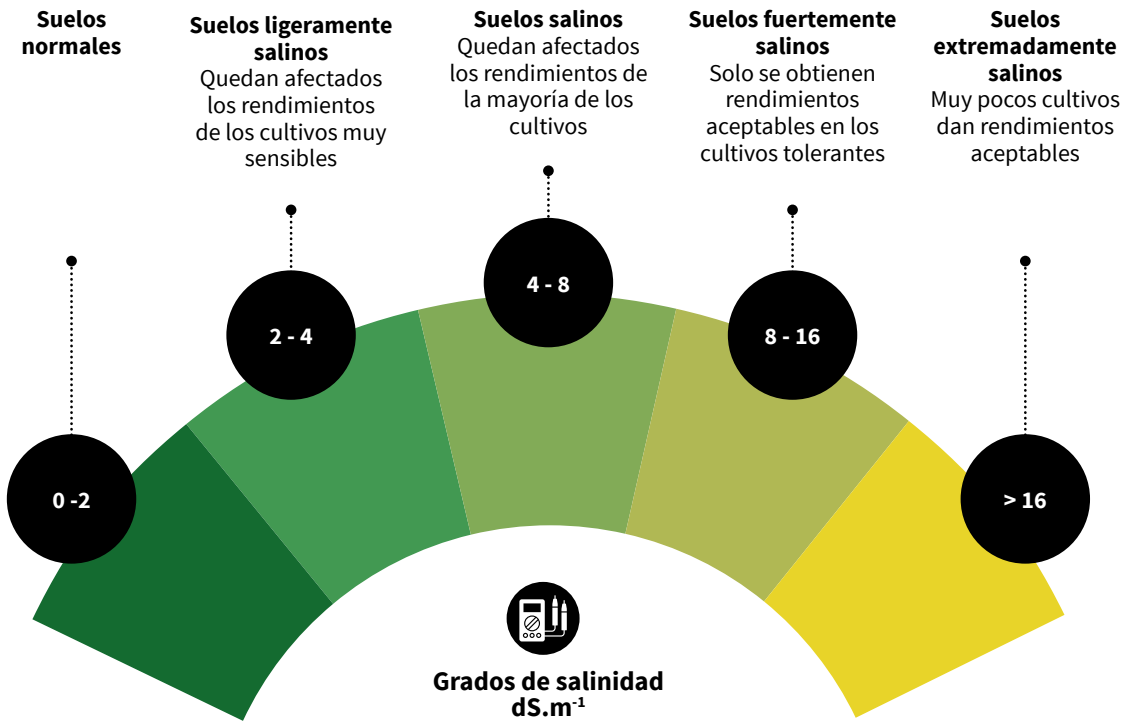
Para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dS.m^{-1} como límite para el carácter salino a nivel de gran grupo y subgrupo, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil (y por tanto la génesis) quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino. El laboratorio de salinidad de los EE. UU., por su parte, ha establecido el límite de 4 dS.m^{-1} para que la salinidad comience a ser tóxica para las plantas (punto de vista aplicado en la experiencia en campo).

Con base en la CEs, el United States Salinity Laboratory de Riverside establece los grados de salinidad expresados en la figura 5.

Al hacer el análisis estadístico multitemporal de la conductividad eléctrica del suelo en este experimento (tabla 2), se encontró diferencia significativa para los tratamientos con distintas calidades de agua. En estos se registraron valores por debajo de 2 dS.m^{-1} , que según la clasificación anteriormente expuesta corresponden a “suelos normales”. En el CI La Libertad, para las épocas de muestreo consideradas y todos los tratamientos de riego y cobertura, la conductividad eléctrica se mantuvo en la clasificación de suelo normal.



Figura 5. Clasificación de suelos según los grados de salinidad propuesta por el United States Salinity Laboratory de Riverside
Fuente: United States Salinity Laboratory.



pH

Las letras pH son una abreviatura del potencial de hidrógeno, definido como el logaritmo cambiado de signo de la actividad de los iones hidrógeno en una solución. Este parámetro, cuyos valores en los suelos pueden variar ampliamente, es crítico por la influencia que ejerce sobre la dinámica de los nutrientes que han de ser absorbidos por las plantas; particularmente, valores extremos de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes, con lo que permanecen en forma no disponible para las plantas, de manera que estos niveles deben ser corregidos (los valores normales están entre 5 y 7 para zonas húmedas). Asimismo, el pH influye en gran medida en el desarrollo de los cultivos determinando el desarrollo de los microorganismos, la velocidad de los procesos de humificación y de mineralización, y la capacidad de adsorción de cationes en el complejo de cambio.

Los distintos cultivos muestran diferente adaptabilidad para su desarrollo en función del pH del suelo. Existen especies más acidófilas que otras, y cada una presenta un rango de pH del suelo ideal para su crecimiento. En la figura 6 se presentan los valores de clasificación del pH.

El pH de las soluciones entre 4 y 9 no tiene una influencia marcada sobre la absorción de iones; solo

a pH menores de 4 se presentan trastornos en el desarrollo de raíces, mientras que a pH mayores de 9 se produce una absorción deficiente de fosfatos.

Los suelos solo llegan a ser ácidos cuando el abastecimiento de iones básicos, principalmente Ca en el complejo coloidal, llega a ser agotado, y es entonces cuando hay principio para opinar que la deficiencia de Ca es una de las causas de restricción en el desarrollo de muchas plantas en suelos altamente ácidos.

Los suelos con pH ácido son desfavorables para el desarrollo radicular, suelen ser pobres en bases de cambio (Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+}), y en ellos se reduce la actividad microbiana, al tiempo que disminuye la asimilación del fósforo, el cual se precipita y da formas insolubles con el manganeso, el aluminio y el hierro. Por otra parte, cuando la acumulación de sales afecta la productividad del suelo, se le denomina suelo salino. El pH en este caso puede variar de 7,0 a 8,5.

En este experimento, los mayores cambios en este parámetro se observaron en condiciones de lisímetros con cultivo, si bien en todos los casos los valores hallados se encuentran en el rango normal para suelos minerales de región húmeda. Asimismo, el comportamiento del pH en los suelos considerados mostró cambios estadísticamente significativos por la aplicación de los tratamientos de calidad de agua.

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

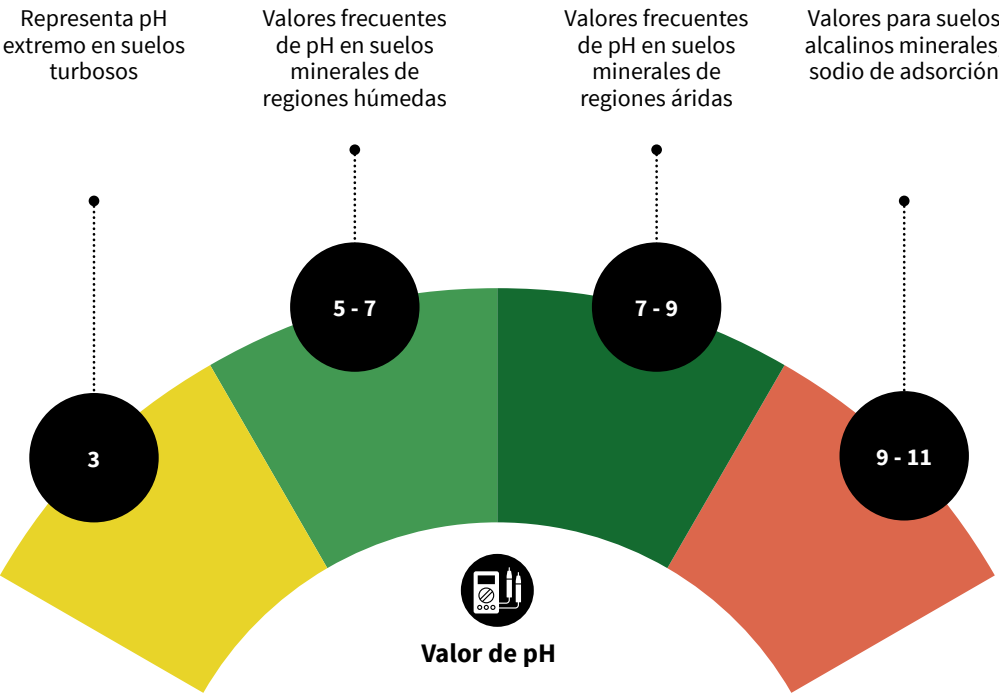


Figura 6. Valores utilizados en la clasificación del pH

Metales pesados

Los metales pesados, y en general los elementos traza, están presentes en relativamente bajas concentraciones (<mg.kg⁻¹) en la corteza terrestre, los suelos y las plantas. La presencia de concentraciones nocivas (anomalías) en los suelos es una degradación especial denominada contaminación.

El elemento traza en los suelos puede ser de origen geogénico o antropogénico. Los de origen geogénico proceden de la roca madre, de actividad volcánica o de la lixiviación de mineralizaciones, mientras que los metales pesados antropogénicos derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería e industria agrícola, y residuos sólidos urbanos (RSU). Legalmente, se entiende por contaminación la producida por estos contaminantes.

Sostenibilidad y calidad del suelo son dos conceptos que deben ir juntos. Según este argumento, los fenómenos de contaminación de suelos son importantes precisamente por incidir directamente en lo indicado con anterioridad.

Según García, Moreno, Hernández y Polo (2002),

El suelo está formado por material inorgánico (arena, limo y partículas arcillosas), materia orgánica, agua, gases y organismos vivos (lombrices, insectos, algas, bacterias, hongos, etc.), entre los que se produce un intercambio continuo de moléculas mediante procesos físicos, químicos y biológicos. De ahí se deduce que, para poder establecer la calidad de un suelo, el estudio de todo tipo de propiedades (físicas, químicas, biológicas y microbiológicas) es imprescindible.

A diferencia del agua y del aire, los cuales poseen claros estándares de calidad, para el suelo es difícil definir y cuantificar dicha calidad. Esto es debido a que los criterios que deben de usarse cuando se trata de suelos pueden variar según el uso a que se destinen, las prácticas de manejo que se utilicen, e incluso las prioridades socioeconómicas y/o políticas. La Calidad del Suelo no es fácil de definir, pues depende del uso que se le vaya a dar a dicho suelo (agrícola, forestal, urbano, industrial).

La acción de los metales pesados sobre el suelo, y por tanto el nivel de peligrosidad de este tipo de contaminantes, dependerá (además de su concentración) de las condiciones del suelo (pH, contenido en carbonatos, materia orgánica...) y del propio metal. En función de dichas condiciones, se podrán dar diferentes procesos (adsorción, desorción, complejación), los cuales influirán sobre la biodisponibilidad de dicho metal. Tal “biodisponibilidad” es la que marca la peligrosidad de la contaminación metálica en suelos, la cual puede producirse:

- 1

De forma directa: efecto del metal o metales sobre la actividad microbiana de dicho suelo.
- 2

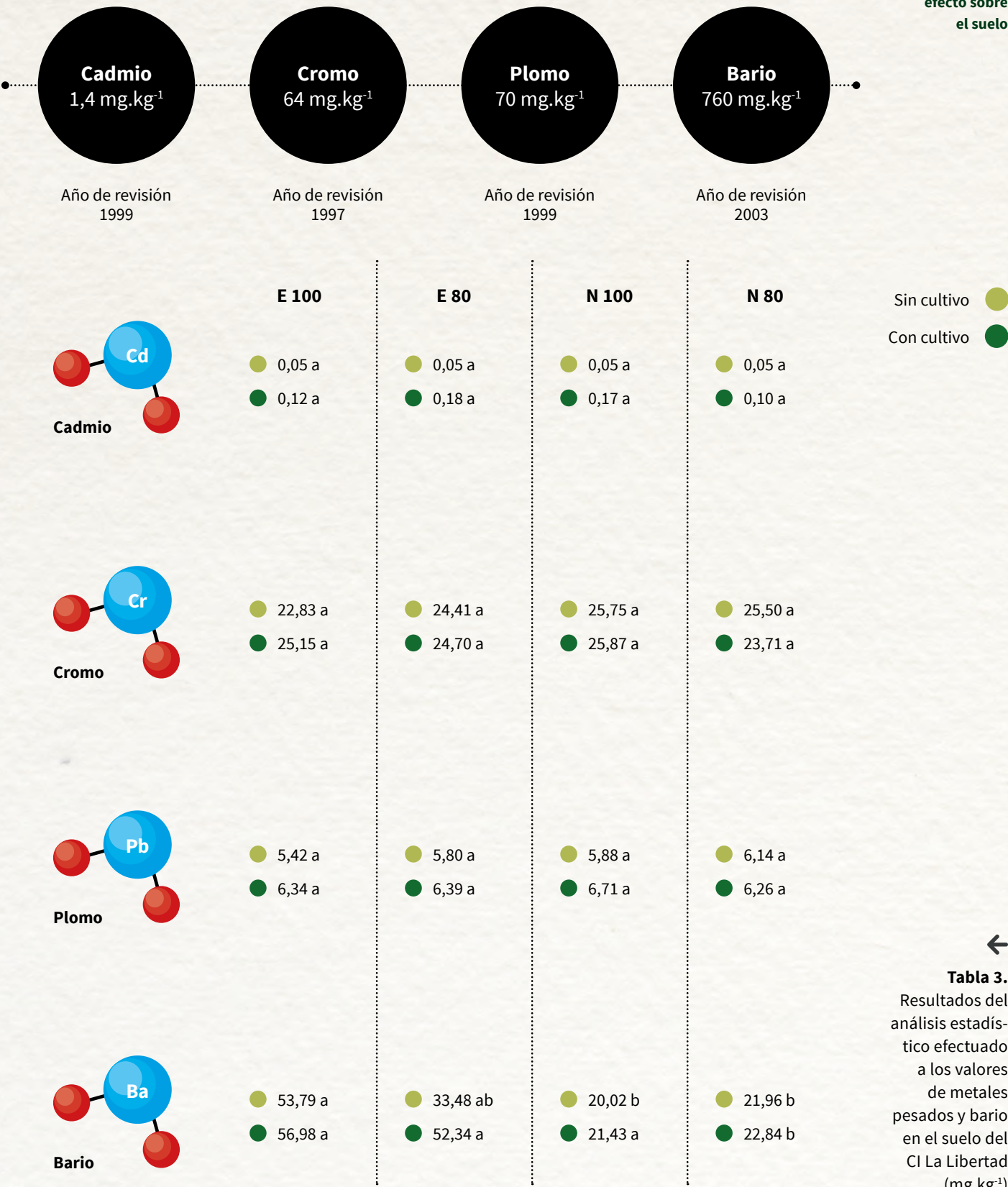
De forma indirecta: afectando a las plantas que crecen en dicho suelo, las cuales pueden ver inhibido su desarrollo, o bien sin experimentar alteraciones fisiológicas y absorbiendo el metal, el cual pasa a la cadena trófica.

Tampoco es descartable un efecto colateral y problemático de la contaminación metálica, como es la posible lixiviación de algún metal, lo que puede dar lugar entonces a contaminación sobre aguas subterráneas.

Para la comparación de los niveles permisibles de metales pesados en suelos se utilizó la Norma Canadiense para la Protección del Medio Ambiente y la Protección Humana (Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health). En la figura 7 se presenta un resumen de esta guía con los indicadores seleccionados para esta investigación.

En la tabla 3, por otro lado, se presenta el análisis estadístico de los valores de estas sustancias hallados en los suelos en donde se aplicaron los diferentes tratamientos de agua. Al comparar estos datos con los de la guía canadiense (figura 7), se ve claramente que los niveles máximos permisibles de las sustancias catalogadas peligrosas se encuentran muy alejados de los valores reales encontrados en esta investigación.

Figura 7. Límites permisibles en suelos (mg.kg⁻¹) de sustancias peligrosas según la norma canadiense (2007)



*Letras distintas dentro de una columna para cada elemento representan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0,05).

Bario

El bario es un metal que, si bien no se encuentra libre en la naturaleza, puede hallarse en el medioambiente, donde existe de forma natural en combinación con otros elementos químicos como el azufre, el carbón o el oxígeno. También se presenta como un elemento traza en rocas ígneas y sedimentarias. Su sal más común es el sulfato de bario (barita), y la menos común es el carbonato de bario.

La concentración de bario en suelos varía entre 20 y 3.000 mg.kg⁻¹, señalándose un valor medio en torno a 500 mg.kg⁻¹. La fracción biodisponible es generalmente baja, sobre todo en medios de pH neutro a básico, mientras que la biodisponibilidad aumenta en medios ácidos, desaturados, con bajos niveles de sulfatos, fosfatos y materia orgánica y textura arenosa a franco arenosa (Macías y Calvo, 2009).

Para el caso de esta investigación realizada en lisímetros, se observa en la tabla 3 una diferencia

significativa en los contenidos de este elemento en los tratamientos de riego con ATAEP. Por otra parte, en el periodo de tiempo en que se realizó este trabajo de investigación (figura 8), no se observan incrementos de este elemento.

Según la normatividad ambiental de Canadá, el nivel crítico de este elemento en el suelo es de 760 mg.kg⁻¹, y los valores máximos registrados en esta investigación fueron de 56,98 mg.kg⁻¹, inferiores al contenido medio normal de este elemento en suelos agrícolas (500 mg.kg⁻¹).

Plomo

El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11,4 g.cm⁻³ a 16 °C), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico y se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como

sales metálicas del ácido plúmbico. Es un elemento que, en definitiva, forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos.

Las fuentes naturales de este elemento son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de los minerales de plomo y las emanaciones volcánicas. La galena es la principal fuente de producción de plomo y se encuentra generalmente asociada con diversos minerales, zinc y en pequeñas cantidades con el cobre, el cadmio, el fierro, etc.

Cuando el plomo se libera al ambiente tiene un largo tiempo de residencia en comparación con la mayoría de los contaminantes. Como resultado, tiende a acumularse en tierra y sedimentos, donde, debido a su baja solubilidad, puede permanecer accesible a la cadena alimentaria y al metabolismo humano por mucho tiempo.

El contenido de plomo en suelos oscila normalmente entre 3-189 mg.kg⁻¹, con un valor medio en torno a 30 mg.kg⁻¹. La contaminación difusa es general en

todos los suelos del mundo, de manera que, exceptuando regiones particularmente aisladas, el fondo edafogeoquímico aparece siempre incrementado respecto al contenido litológico natural, sobre todo en áreas de elevada densidad de tráfico (Macías y Calvo, 2009).

Tal como lo refleja la tabla 3, en este trabajo de investigación se encontró que este parámetro de evaluación de la calidad del suelo está muy por debajo de los niveles críticos establecidos por la norma canadiense (70 mg.kg⁻¹). El valor más alto registrado fue para el tratamiento con cultivo y riego con agua normal (6,71 mg.kg⁻¹) (a nivel mundial el contenido normal de plomo en suelos es alrededor de 30 mg.kg⁻¹). Por otra parte, en la figura 9 se presenta el comportamiento temporal de este elemento durante la investigación en la localidad considerada.

En general, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas de la presencia de este elemento atribuibles a los tratamientos considerados.

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo



Figura 8. Contenido final de bario edáfico en lisímetros durante el periodo de evaluación

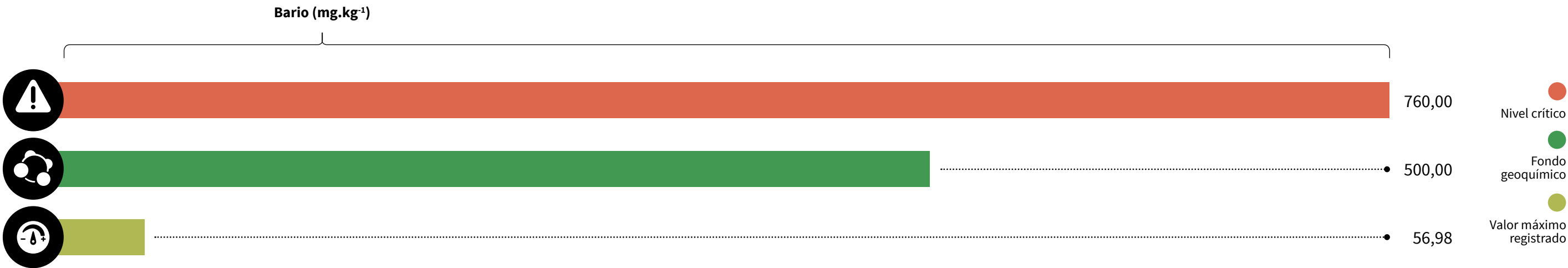
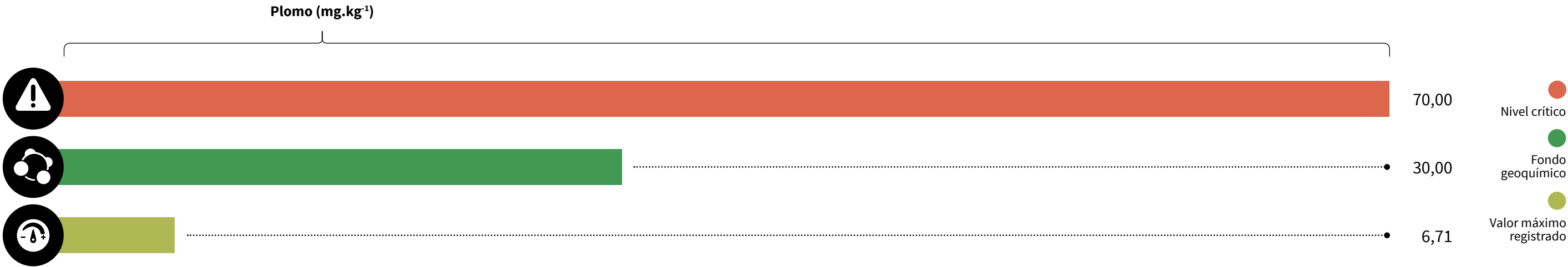


Figura 9. Contenido final de plomo edáfico en lisímetros durante el periodo de evaluación



Cromo

El cromo es un elemento natural que se encuentra en rocas, plantas, suelos y animales y en los humus y gases volcánicos. Es un metal de transición duro, frágil, gris acerado y brillante, muy resistente frente a la corrosión. Puede funcionar con distintas valencias, y en el ambiente se halla en varias formas; las más comunes son las derivadas del cromo trivalente o cromo III y las cromo hexavalente o cromo VI. Este último se encuentra muy frecuentemente en naturaleza como $\text{Cr}_2\text{O}_4\text{Fe}$, constituyendo la peridotita y la serpentina, de las que se deriva. Es un agente cancerígeno de las vías respiratorias.

Los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de cromo con el fin de que esta sea lo suficientemente baja como para no causar daños. No obstante, cuando la cantidad de cromo en el

suelo aumenta, también pueden incrementarse las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo puede también influir en esta captación.

Como resultado de un trabajo de investigación realizado por la FAO, se encontró que el cromo se fija y se acumula irreversiblemente en el suelo. Por ello, el exceso de lo requerido por las plantas eventualmente llega a contaminar los suelos.

En la tabla 3, a la luz del análisis estadístico realizado a este parámetro, se observa que no hay diferencias en el contenido de cromo en el suelo de los diferentes lisímetros sometidos a los tratamientos de agua.

Según Sierra (2005), el fondo geoquímico del cromo o herencia de la roca madre de las rocas ácidas está entre los niveles de 4-25 mg.kg^{-1} , valor similar al encontrado por esta investigación para los suelos

estudiados (oxisoles de la Orinoquia Colombiana). Asimismo, los valores hallados se presentan por debajo del nivel crítico de afectación de este elemento para suelos agrícolas reportados por la norma canadiense (64 mg.kg^{-1}).

En la figura 10 se presenta el comportamiento temporal del contenido de cromo edáfico para todos los tratamientos estudiados. En este sentido no se observaron cambios, y en todos los casos los niveles de cromo encontrados corresponden a los valores normales para este tipo de suelos.

Cadmio

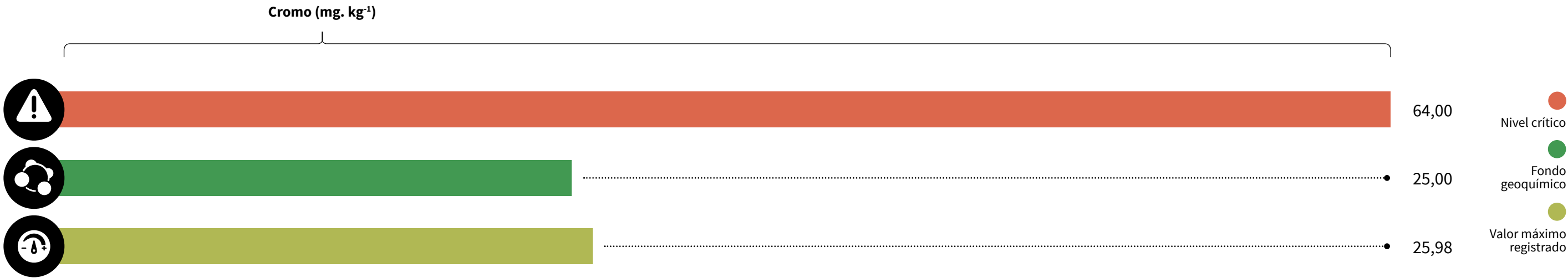
El cadmio es un metal blanco plateado dúctil y maleable que no se encuentra nativo. Es insoluble en bases, se disuelve en ácido nítrico diluido y es poco soluble en los ácidos sulfúricos y clorhídricos. Se encuentra en

partes específicas del mundo, como un subproducto de la extracción del zinc. De hecho, dada su similitud con este último, el cadmio puede ser absorbido por las plantas y acumulado en cantidades que pueden entrañar serios riesgos para la salud humana por su alta toxicidad (DIGESA, 2011). Según Sierra (2005), la herencia de la roca madre o fondo geoquímico de las rocas ácidas se presenta en el rango de contenido entre 0,09-0,20 mg.kg^{-1} de suelo.

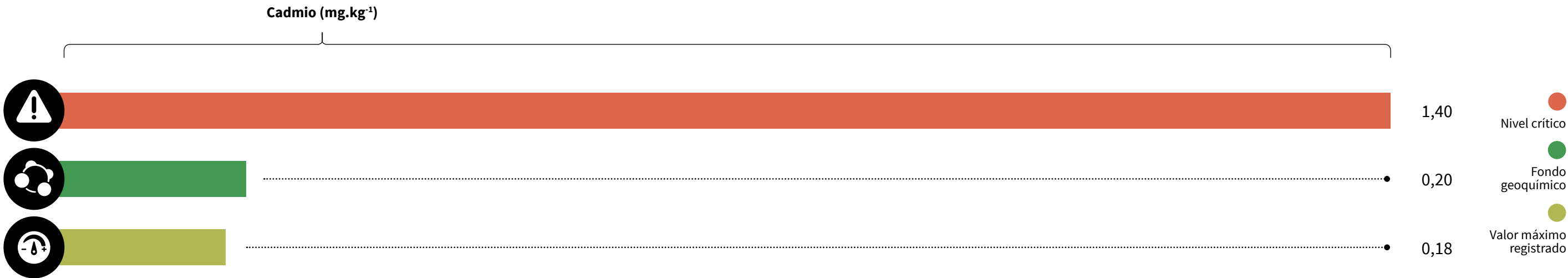
El resultado del análisis estadístico realizado a este elemento se observa en la tabla 3, mientras que en la figura 11 se presenta su comportamiento temporal. Nótese que no se presentan diferencias significativas de los niveles de cadmio en el suelo debidas a los tratamientos, con valores por debajo del reportado por Sierra (2005) y muy inferiores de los niveles críticos considerados por la norma canadiense (1,4 mg.kg^{-1}).

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

→ **Figura 10.** Contenido final de cromo edáfico en lisímetros durante el periodo de evaluación



→ **Figura 11.** Contenido final de cadmio edáfico en lisímetros durante el periodo de evaluación



Análisis microbiológico del suelo

Los microorganismos son los componentes más importantes del suelo. Constituyen su parte viva y son los responsables de la dinámica de transformación y desarrollo de la fracción mineral. La mayor actividad de los microorganismos se realiza desde la superficie del suelo hasta unos 20 cm de profundidad. Las colonias de microorganismos permanecen adheridas a las partículas de arcilla y humus (fracción colonial) y a las raíces de las plantas, las cuales les suministran sustancias orgánicas que les sirven de alimentos y estimulan su reproducción (Delgado, s.f.).

La microflora del suelo está compuesta por bacterias, actinomicetos, hongos, algas, virus y protozoarios. Entre las funciones más importantes que cumplen asociadamente en los procesos de transformación están:

- 1
- Suministro directo de nutrientes (fijación de nitrógeno).
- 2
- Transformación de compuestos orgánicos que la planta no puede tomar a formas inorgánicas que sí pueden ser asimiladas.
- 3
- Solubilización de compuestos inorgánicos para facilitar la absorción por las plantas.
- 4
- Cambios químicos en compuestos inorgánicos debidos a procesos de oxidación y reducción.
- 5
- Aumento del desarrollo radicular en la planta, que mejora la asimilación de nutrientes, la capacidad de campo y el desarrollo.
- 6
- Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo (Córdova y Tabasco, 2013).

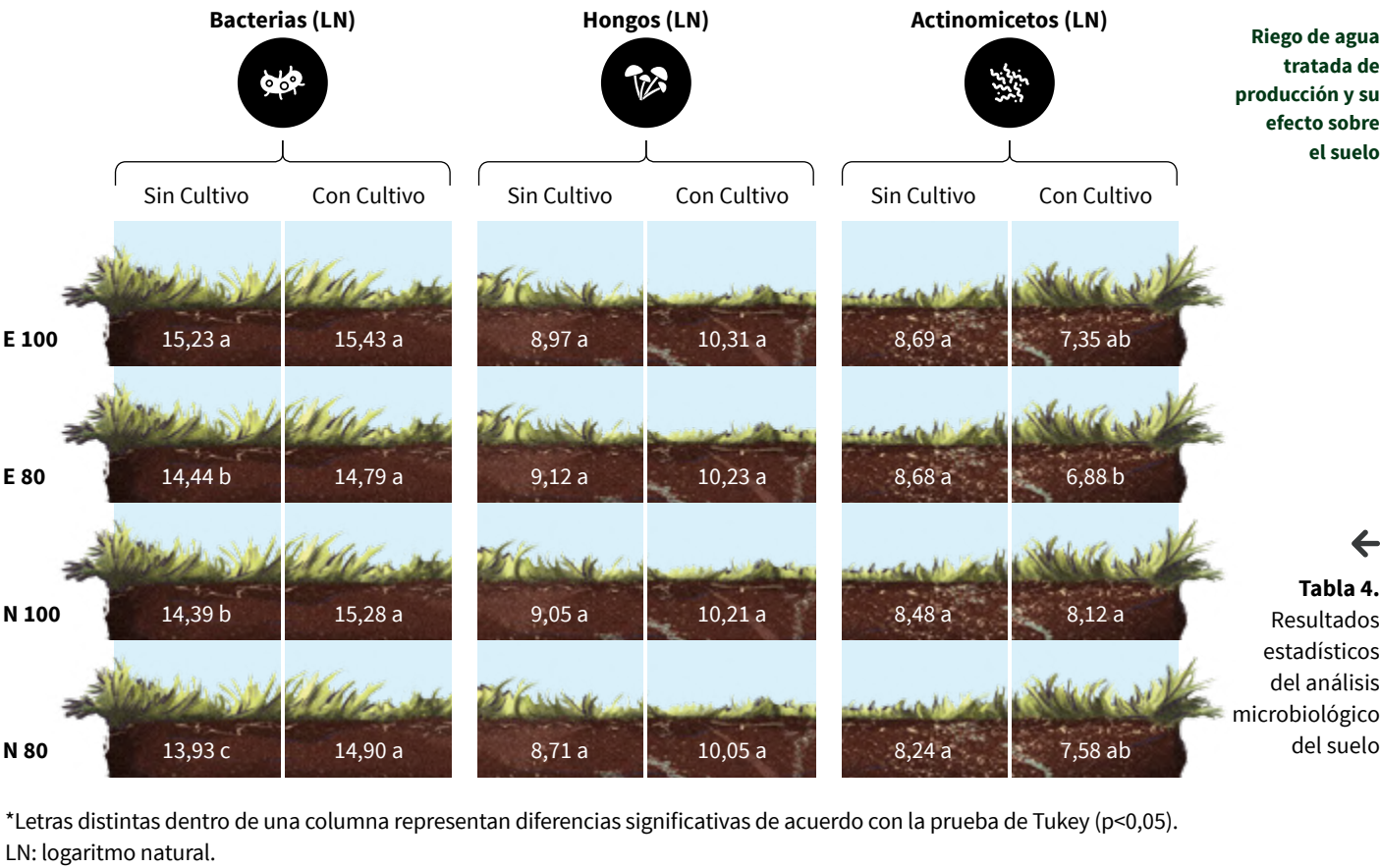
Bacterias

Las bacterias son uno de los grupos de los microorganismos del suelo claves en la transformación de la materia mineral y orgánica del suelo que contribuye a su fertilidad. Estas tienen una amplia diversidad bio-

química, y por ello son las más abundantes de los microorganismos del suelo. Ahora, si bien su número es grande, por su tamaño representan menos de la mitad de la masa celular microbiana total. Las bacterias en un suelo con oxígeno son dominantes y responsables de las transformaciones de la materia orgánica ya que crecen rápidamente y mineralizan una amplia gama de compuestos orgánicos naturales.

En un suelo, la población bacteriana nativa incluye géneros que crecen al agregar nutrientes de carbono orgánico sencillo, mientras que aquellas de alta actividad de mineralización requieren nutrientes que se consumen rápidamente porque responden de inmediato a compuestos de fácil degradación, la cual disminuye cuando se agota la fuente alimenticia. Según Osorio (2012), en un gramo de suelo seco es posible encontrar 10⁶-10⁸ UFC (unidades formadoras de colonias) de bacterias. En la tabla 4 se presentan los resultados del análisis estadístico efectuado al conteo de UFC por gramo de suelo, expresado como logaritmo natural (LN), durante el desarrollo de la investigación.

Los valores más altos en el conteo de bacterias corresponden a los tratamientos en donde se establecieron cultivos, aunque no es claro el efecto de los tratamientos de agua de riego en el conteo de las bacterias del suelo. De cualquier forma, los contenidos de bacterias registrados en este trabajo se presentan dentro del rango reportado como normal por Osorio (2012), esto es, entre 13 y 18.



Actinomicetos

Dentro de la gran variedad de microorganismos habitantes del suelo se encuentran los actinomicetos: microorganismos heterótrofos, aerobios y poco tolerantes a la acidez, por lo que crecen de forma óptima en un pH cercano a la neutralidad, si bien pueden desarrollarse en un rango de pH entre 5,0 y 9,0. En consecuencia, solo se encuentran en raras ocasiones en suelos con un pH inferior a 5,0, al igual que en suelos con una alta humedad entre el 85-100% de capacidad de campo, en comparación con suelos que presentan condiciones semiáridas, con una humedad baja, como los suelos franco arenosos, los cuales son ideales para el desarrollo de estos microorganismos debido a la aireación y poca capacidad para retener agua. La mayoría de las especies crecen en un rango de temperatura entre 25-30 °C.

Los actinomicetos han sido estudiados a lo largo del tiempo por el papel importante que desempeñan en diferentes campos, equilibrando el suelo como un ecosistema dinámico y por su gran aporte a la industria en la producción de compuestos bioactivos como los antibióticos. Se ven involucrados en

procesos de fitorremediación, reciclaje de los constituyentes más resistentes de la materia orgánica como lignina, celulosa, hemicelulosa y quitina.

En esta investigación no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Los valores de conteo de UFC de actinomicetos se encuentran en niveles inferiores a los normales (10⁶-10⁷ UFC.g⁻¹) reportados por Osorio (2012).



Hongos

Los hongos son organismos saprofitos, aeróbicos, que desempeñan un rol muy importante en la transformación de los constituyentes del suelo. Intervienen en la descomposición de celulosa, hemicelulosa, pectinas, almidón, grasas y compuestos de lignina, así como en la formación del humus, y contribuyen al reciclaje de nutrientes y a la estabilidad de agregados mediante la degradación de residuos vegetales y animales. Estos microorganismos no contienen clorofila, y su biomasa es de 1.000 a 10.000 kg.ha⁻¹. Son además los principales agentes de descomposición de la materia orgánica en todos los ambientes ácidos y poseen una red de filamentos o hifas en el suelo. El micelio se observa fácilmente en los humus tipo mor y moder. La importancia de los hongos filamentosos en el suelo puede a veces incluso exceder a la de las bacterias.

Estos organismos se desarrollan bien en pH variable, pero prefieren los ácidos, donde las bacterias y actinomicetos no pueden competir. Asimismo, son importantes descomponedores de residuos en suelos forestales ácidos. Su población va de 100.000 a un millón por gramo de suelo.

Como se contempla en la tabla 4, en esta investigación no se presentaron diferencias significativas debidas a los tratamientos. Osorio (2012) reporta como cantidad adecuada de hongos en el suelo entre 10⁴-10⁵ UFC.g⁻¹; según esto, para todos los tratamientos y tipos de coberturas utilizados, se observa que los hongos se presentaron en un rango de población aceptable.



Análisis ambiental en suelos (hidrocarburos totales del petróleo)

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades del Gobierno de los Estados Unidos de América (USA), en su artículo titulado “Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)”, revisado en 2014, diserta lo siguiente con relación a los aspectos ambientales de estos hidrocarburos:

El término hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se usa para describir a un grupo extenso de varios cientos de sustancias químicas derivadas originalmente del petróleo crudo.

En este sentido, los TPH son realmente una mezcla de sustancias químicas. Se les llama hidrocarburos porque casi todos los componentes están formados enteramente de hidrógeno y carbono. La mayoría de los productos que contienen TPH se incendian. Algunos TPH son líquidos incoloros o de color claro que se evaporan fácilmente, mientras que otros son líquidos espesos de color oscuro o semisólidos que no se evaporan. Debido a que en la sociedad moderna se usan tantos productos derivados del petróleo (por ejemplo, gasolina, kerosén, aceite combustible, aceite mineral y asfalto), la posibilidad de contaminación ambiental es alta.

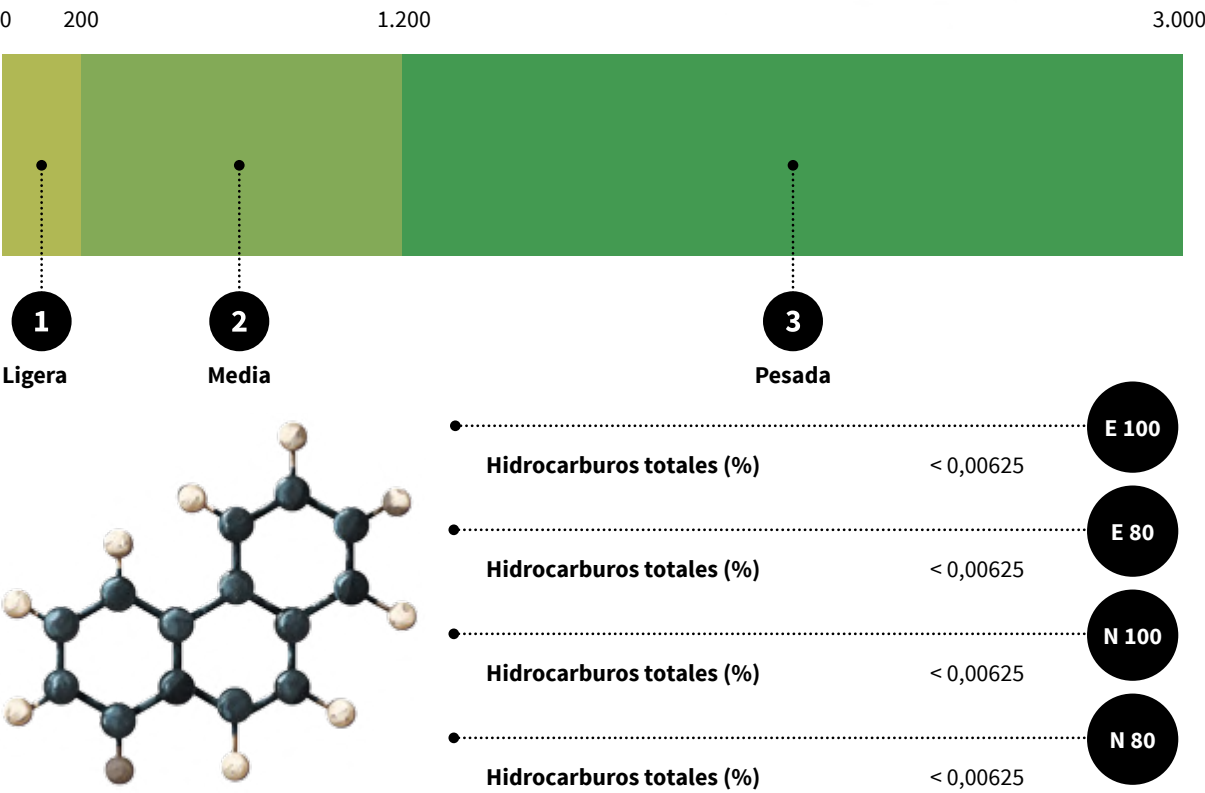
La contaminación con productos de petróleo estará constituida por una variedad de estos hidrocarburos. Debido al gran número de hidrocarburos involucrados, generalmente no es práctico medir cada uno de ellos. Sin embargo, es útil medir la cantidad total del conjunto de hidrocarburos que se encuentran en una muestra de suelo, agua o aire. La cantidad de TPH que se encuentra en una muestra sirve como indicador general del tipo de contaminación que existe en el sitio. Sin embargo, la cantidad de TPH que se mide suministra poca información acerca de cómo hidrocarburos de petróleo específicos pueden afectar a la gente, los animales y las plantas.

Los TPH que son liberados al suelo pueden movilizarse hacia el agua subterránea a través del suelo. Allí, los componentes individuales pueden separarse de la mezcla original dependiendo de

las propiedades químicas de cada componente. Algunos de estos componentes se evaporarán al aire y otros se disolverán en el agua subterránea y se alejarán del área donde fueron liberados. Otros compuestos se adherirán a partículas en el suelo y pueden permanecer en el suelo durante mucho tiempo, mientras que otros serán degradados por microorganismos en el suelo.

El conocimiento del tipo de contaminación y su concentración es fundamental para establecer las condiciones del sitio, el riesgo que existe y la selección de posibles tecnologías de recuperación.

Los límites de limpieza para hidrocarburos en suelos y aguas dependerán de los criterios o normas vigentes. En México (2013) se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-138- Semarnat/SSA1-2012, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. En esta norma se fijan los límites en función de las fracciones de hidrocarburos ligera, media y pesada, así como del uso del suelo (figura 12). Con esto en mente, en la tabla 5 se relacionan los resultados del contenido de hidrocarburos totales en suelos de los lisímetros de esta investigación.



*Método: Standard methods for examination of water & wastewater 22nd edition 2012, NMX-AA-145-SCFI-2008 Y SM 5520 CF

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

Figura 12. Límites máximos permisibles en México para fracciones de hidrocarburos en suelo (mg.kg⁻¹)

Tabla 5. Aspectos ambientales del suelo en lisímetros de CI La Libertad

Calidad del agua

En este aparte se considera que las ATAEP, antes de ser usadas para el riego en sistemas agropecuarios, cumplen con todas las condiciones legales vigentes que regulan la actividad petrolera, es decir, se ajustan a la normatividad autorizada vigente en el país (Decreto 1594 de 1984, Resolución 1207 de 2014 y Resolución 0631 de 2015). En la tabla 7 se presenta un resumen con las características principales del recurso hídrico utilizado en el campo Apiay en Villavicencio, Meta. Esta información fue suministrada directamente por Ecopetrol de los análisis que periódicamente se hacen para cumplir con la reglamentación de la autoridad ambiental y revela que el agua utilizada suministrada por Ecopetrol se ciñe a la normatividad vigente en todos sus parámetros.

Adicionalmente para esta investigación, se realizaron análisis extemporáneos de calidad en laboratorios especializados para las aguas que se utilizaron de forma directa en los experimentos (tabla 6). De este modo se ha constatado que la calidad de las ATAEP utilizadas en el marco de este estudio ha venido cambiando y optimizándose debido principalmente a las mejoras tecnológicas realizadas en el STAP y a la dinámica reglamentación y gestión

que el Estado ha venido impulsando para ordenar el recurso hídrico del país.

La mayor diferencia entre las aguas utilizadas en esta investigación es el mayor contenido de sales contenidas en las ATAEP en comparación con las normales (pozo profundo) del CI La libertad. La salinidad es un parámetro importante de aguas usadas industriales y de cuerpos de agua naturales que se concibió originalmente como una medida de la cantidad total de sales disueltas en un volumen determinado de agua. La salinidad y la conductividad están relacionadas porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas.

El agua salobre es aquella que tiene más sales disueltas que el agua dulce (0-0,5 gramos de sal por litro), pero menos que el agua de mar. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0,5-30 gramos de sal por litro, expresados más frecuentemente como de 0,5 a 30 partes por mil

Los valores encontrados de salinidad para el agua normal del CI La Libertad muestran la ausencia de sales, mientras que para las ATAEP de Ecopetrol se observaron oscilaciones alrededor de 0,5 partes por mil, con un promedio durante toda la experimentación de 0,48 partes por mil, que la colocan en el rango de agua dulce.

→ **Tabla 6.** Análisis de calidad extemporáneos de las aguas utilizadas en la investigación

Variable		Unidad de medida	ATAEP Apiay*	Agua de pozo La Libertad*
	Conductividad	µS.cm ⁻¹	1220	38,5
	Cloruros Cl-	mg.l ⁻¹	215	< 3,3
	Calcio Ca	mg.l ⁻¹	9,35	1,21
	Magnesio Mg	mg.l ⁻¹	2,67	0,389
	Sodio Na	mg.l ⁻¹	104	1,58
	Manganeso Mn	mg.l ⁻¹	0,223	< 0,079
	Bario Ba	mg.l ⁻¹	1,04	< 0,096
	Cadmio Cd	mg.l ⁻¹	< 0,01	< 0,01
	Mercurio Hg	mg.l ⁻¹	< 0,002	< 0,0019
	Molibdeno Mo	mg.l ⁻¹	< 0,106	< 0,010
	Arsénico As	mg.l ⁻¹	0,0005	0,0004
	RAS	-	7,7	0,32
	Hidrocarburos totales	mg.l ⁻¹	0,74	< 0,67

*ANTEK S.A.

						
Variable	Unidad de medida	Decreto 1594 / 1984		Resolución 1207 /2014	Resolución 0631 / 2015	Promedio 4 años
		Artículo 38	Artículo 40		Artículo 11	
Generales						
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg.l ⁻¹ O ₂	NR	NR	NR	180	NS
Demanda bioquímica química de oxígeno (DBQ5)	mg.l ⁻¹ O ₂	NR	NR	NR	60	NS
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg.l ⁻¹	NR	NR	NR	50	NS
Sólidos sedimentables (SSED)	mg.l ⁻¹	NR	NR	NR	1	NS
Grasas y aceites	mg.l ⁻¹	NR	NR	NR	15	5,94
Físicos						
pH	Unidades	5,0 - 9,0	4,5 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	NS
Conductividad	µS.cm ⁻¹	NR	NR	1500	NR	NS
Químicos						
Fenoles totales	mg.l ⁻¹	NR	NR	1,5	0,20	0,21
Hidrocarburos totales	mg.l ⁻¹	NR	NR	1,0	10	1,97
Iones						
Cianuro libre	mg CN-.l ⁻¹	NR	NR	0,2	NR	0,0100
Cloruros Cl-	mg.l ⁻¹	250	NR	300	1200	225,35
Floruros	mg.l ⁻¹	NR	NR	1,0	1,0	1,58
Sulfatos SO ₄	mg.l ⁻¹	400	NR	500	300	58,15
Metales						
Amoníaco N	mg.l ⁻¹	1,0	NR	NR	NR	NS
Aluminio Al	mg.l ⁻¹	NR	0,5	0,5	NR	NS
Bario Ba	mg.l ⁻¹	1,0	NR	NR	NR	0,5739
Berilio Be	mg.l ⁻¹	NR	0,1	0,1	NR	NS
Cadmio Cd	mg.l ⁻¹	0,01	0,01	0,01	0,1	0,0001
Cianuro CN-	mg.l ⁻¹	0,2	NR	NR	1,0	NS
Cinc Zn	mg.l ⁻¹	15	2,0	3,0	3,0	0,2355
Cobalto Co	mg.l ⁻¹	NR	0,05	0,05	NR	NS
Cobre Cu	mg.l ⁻¹	1,0	0,2	1,0	1,0	0,0039
Cromo Cr+	mg.l ⁻¹	60,05	60,1	0,1	NR	0,0011
Hierro Fe	mg.l ⁻¹	NR	5,0	5,0	3,0	NS
Mercurio Hg	mg.l ⁻¹	0,002	NR	0,002	0,01	0,0002
Litio Li	mg.l ⁻¹	NR	2,5	2,5	NR	NS

*Resolución 0631 de marzo 2015. MINAMBIENTE, Capítulo V, artículo 11, Vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos. NR: No reportado NS: No solicitado.

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

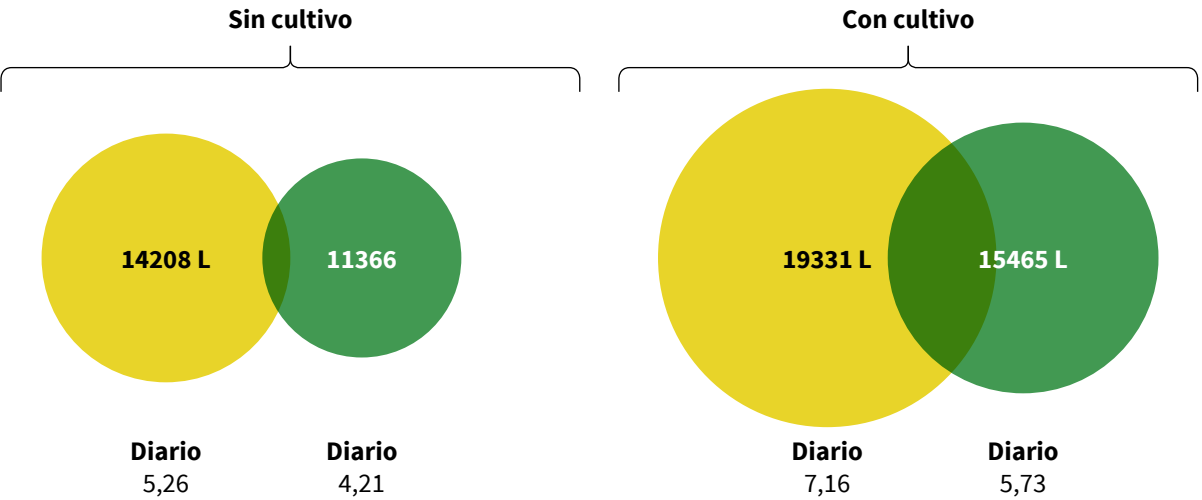
← **Tabla 7.** Características medias del agua tratada de producción del campo Apiay

						
Variable	Unidad de medida	Decreto 1594 / 1984		Resolución 1207 /2014	Resolución 0631 / 2015	Promedio 4 años
		Artículo 38	Artículo 40		Artículo 11	
Metales						
Manganeso Mn	mg.l ⁻¹	NR	0,2	0,2	NR	NS
Molibdeno Mo	mg.l ⁻¹	NR	0,01	0,07	NR	NS
Níquel Ni	mg.l ⁻¹	NR	0,2	0,2	0,5	0,0018
Plomo Pb	mg.l ⁻¹	0,05	5,0	5,0	0,2	0,0007
Sodio Na	mg.l ⁻¹	NR	NR	200	NR	NS
Vanadio V	mg.l ⁻¹	NR	0,1	0,1	1,0	0,0634
Plata Ag	mg.l ⁻¹	0,05	NR	NR	NR	0,0190
No Metales						
Selenio Se	mg.l ⁻¹	0,01	0,02	0,02	0,20	0,3024
Nitrógeno total	mg.l ⁻¹	NR	NR	NR	10	1,95
Metaloides						
Boro B	mg.l ⁻¹	NR	0,3 - 4,0	0,4	NR	-
Arsénico As	mg.l ⁻¹	0,05	0,1	0,1	0,1	0,0045
Halógenos						
Fluor F	mg.l ⁻¹	NR	1,0	NR	NR	NS
Otros parámetros	NR	NR	NR	NR	NR	NS
Cloro total residual (con mínimo 30 min. de contacto)	mg Cl ₂ .l ⁻¹	NR	NR	< 1,0	NR	NS
Nitratos (NO ₃ - N)	mg.l ⁻¹	10,0	NR	5,0	NR	NS
Nitritos N	mg.l ⁻¹	10	NR	NR	NR	NS
Compuestos fenólicos fenol	mg.l ⁻¹	0,002	NR	NR	NR	NS
Difenil policlorados concentración de agente activo	NR	No detectable	NR	NR	NR	NS
Tensoactivos sustancias activas al azul de metileno	mg.l ⁻¹	0,5	NR	NR	NR	NS
Microbiológicos						
Coliformes totales	NMP.100 ml ⁻¹	20000	5000	1,0E + 05	NR	NS
Coliformes fecales	NMP.100 ml ⁻¹	2000	1000	1,0E + 02	NR	NS
Helmintos parásitos humanos	Huevos y larva.l ⁻¹	NR	NR	1,0	NR	NS
Protozoos parásitos humanos	Quistes.l ⁻¹	NR	NR	1,0	NR	NS
Salmonella sp.	NMP.100 ml ⁻¹	NR	NR	1,0	NR	NS

*Resolución 0631 de marzo 2015. MINAMBIENTE, Capítulo V, artículo 11, Vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos. NR: No reportado NS: No solicitado.

Volúmenes de agua aplicada

En la figura 13 se presentan las cantidades de agua aplicadas en las dos coberturas consideradas en los lisímetros (con cultivo y sin cultivo). El volumen total del agua de riego empleada se estableció en función de los registros tomados



Cultivos

Básicamente, los lisímetros con cultivos fueron sembrados con las especies caña de azúcar y pasto elefante. A continuación se hace una breve descripción de cada especie y se observan los rendimientos obtenidos para cada tratamiento establecido.

Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)



diariamente con un medidor de humedad del suelo tipo TDR a una profundidad de 20 cm desde la superficie.

El consumo diario de agua por lisímetro sin cultivo en el CI La Libertad, para una dotación del 100%, fue de 5,2 mm, mientras que para la misma dotación, pero con cultivo, fue de 7,1 mm/día.

Riego de agua tratada de producción y su efecto sobre el suelo

Tratamiento 100 (yellow circle)

Tratamiento 80 (green circle)

← **Figura 13.** Volúmenes de agua aplicada por lisímetro en 2.699 días en el CI La Libertad

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una planta monocotiledónea que pertenece a la familia de las gramíneas. Su ciclo de vida se caracteriza por un largo periodo vegetativo y una fase reproductiva altamente dependiente de las condiciones ambientales (García *et al.*, 2007).

La caña es un cultivo de zonas tropicales o subtropicales del mundo que requiere de agua y suelos adecuados para crecer bien. Es una planta que asimila muy bien la radiación solar y tiene una eficiencia cercana al 2% de conversión de la energía incidente en biomasa. Un cultivo eficiente puede producir de 100 a 150 toneladas de caña por hectárea por año (14% a 17% de sacarosa, 14% al 16% de fibra y el 2% de otros productos solubles).

Este cultivo requiere extraer grandes cantidades de elementos nutritivos del suelo, los cuales deben incorporarse mediante procesos de fertilización. La variedad sembrada también establece los requerimientos de nutrientes. Se ha determinado que tanto la germinación como el vigor de la planta dependen, en gran parte, del estado nutricional de la semilla (Manrique, Ramírez, Rangel y Bayona, 2008).

Dependiendo de la variedad de caña y de la zona, requiere nitrógeno, fosforo y potasio y elementos menores para su fertilización.

El manejo agronómico del cultivo de caña comprende la interacción de factores de tipo genético (estudio de variedades), ecoclimático (factores ambientales como presión atmosférica, radiación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación), edáfico (características de los suelos) y técnico (relacionados como el manejo del cultivo). El estudio de estos factores permite determinar su influencia sobre la bioproductividad de la caña en una zona agroclimática dada.

Los parámetros de rendimiento, para el caso de la presente investigación, se evaluaron en los lisímetros señalados con cultivo. En la tabla 8 se presenta el análisis estadístico realizado a los valores de rendimiento en toneladas de caña por hectárea de diferentes tratamientos y periodos considerados.

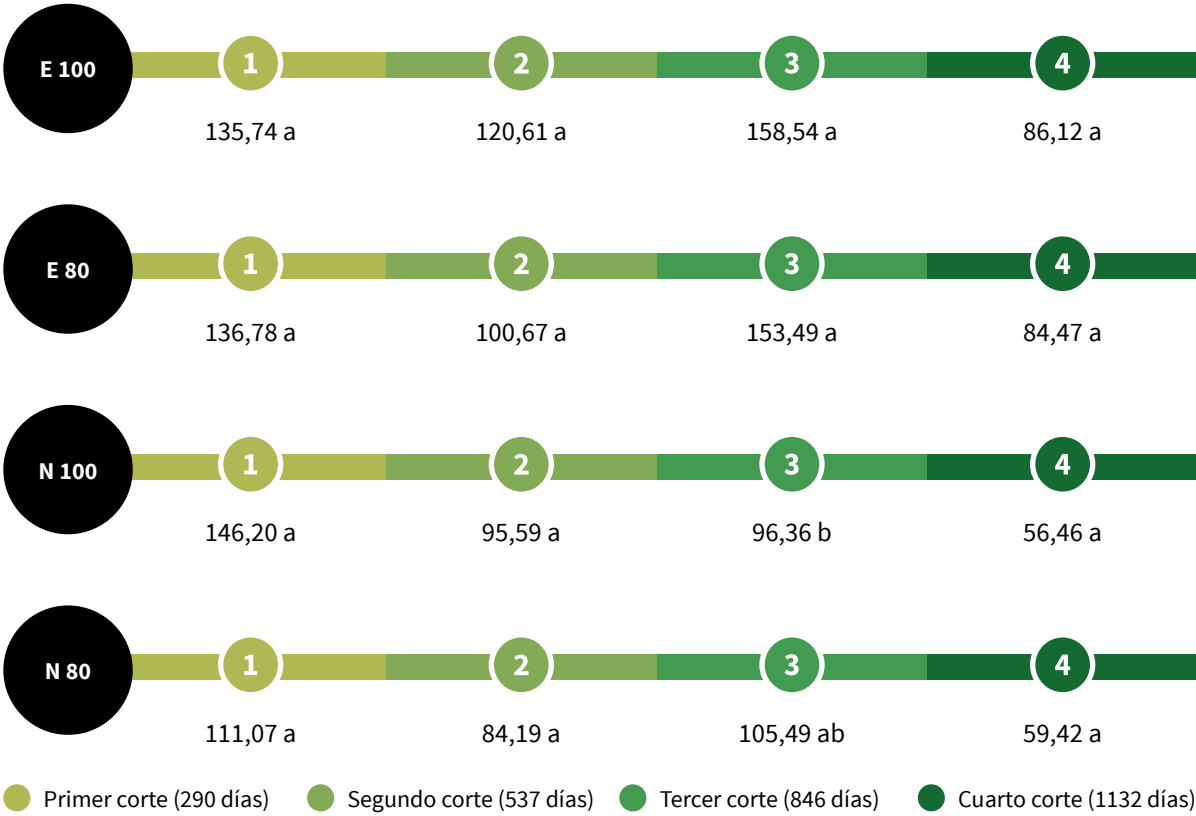
En Colombia, para las condiciones del Valle del Cauca, la cosecha para la variedad CC 8592, que es la utilizada en esta investigación, se presenta entre

los 10 a 14 meses en promedio (el país ocupa el primer lugar a nivel mundial en cuanto a rendimiento en toneladas de caña por hectárea —TCH—). Según Cenicaña (2010), el rendimiento promedio para la variedad en las dos últimas décadas se encuentra entre 120 y 130 TCH (FAO, 2013).

El rendimiento obtenido experimentalmente, para las condiciones de suelos y clima del CI La Libertad, se presenta comparable a los rendimientos promedios reportados para las condiciones del Valle del Cauca, consideradas las ideales para este cultivo. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados en el tiempo.

En términos generales, es necesario renovar cuando el TCH haya caído en más del 18% con respecto al potencial productivo en la plantilla (Riopaila-Castilla, 2007). Con la información contenida en la tabla 8, se puede observar que la renovación del cultivo mantenido con agua normal llega al límite preestablecido en dos cortes, mientras que el que se mantuvo con ATAEP llega a ese límite al cuarto corte, que es aproximadamente el que se ha fijado para excelentes plantaciones en el Valle del Cauca.

→
Tabla 8.
Rendimiento
medio en los
diferentes ciclos
de caña de azúcar
(t.ha⁻¹) en el
CI La Libertad



*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).

Pasto elefante (*Pennisetum purpureum* Schumacher)



El pasto elefante es una gramínea perenne cespitosa estival de la tribu Paniceae, gigante, originaria de África tropical y húmeda, particularmente de Uganda, y naturalizada en América. La mayoría de los tipos son de altos y robustos tallos (superiores a 3 m), aunque se han desarrollado tipos enanos. De raíces gruesas y rizomatosas, tallos cilíndricos y sólidos, folíolos lanceolados, generalmente pubescentes, que pueden alcanzar una longitud de 1,25 m. Su inflorescencia es una espiga de forma cilíndrica que se forma en el ápice de los tallos, cubierta densamente por espiguillas (Bemhaja, 2000).

Este pasto es una planta C4, que presenta alta tasa fotosintética y, consecuentemente, alta producción de materia seca. Las bajas temperaturas son la mayor limitante para su producción de forraje. El mayor volumen radicular se encuentra en los primeros 15 cm de profundidad, dependiendo del suelo. Prefiere suelos profundos, bien drenados, y en general no resiste la sequía prolongada (Bemhaja, 2000).

En el país existen muchas variedades e híbridos introducidos de diferentes países. Es una especie

que se adapta a las condiciones tropicales y subtropicales, desde el nivel del mar hasta los 2.000 m, aunque su mejor desarrollo se obtiene por debajo de los 1.500 msnm, con temperaturas entre 18-30 °C, siendo la óptima 25 °C, con una humedad relativa entre el 60-80%. Produce en distintos tipos de suelos; sin embargo, los mejores resultados se obtienen en suelos fértiles, arcillo-arenosos, no muy pesados y que conservan cierta humedad, mientras que en suelos arenosos sin materia orgánica su desarrollo es deficiente. Es una especie mejoradora de la estructura del suelo.

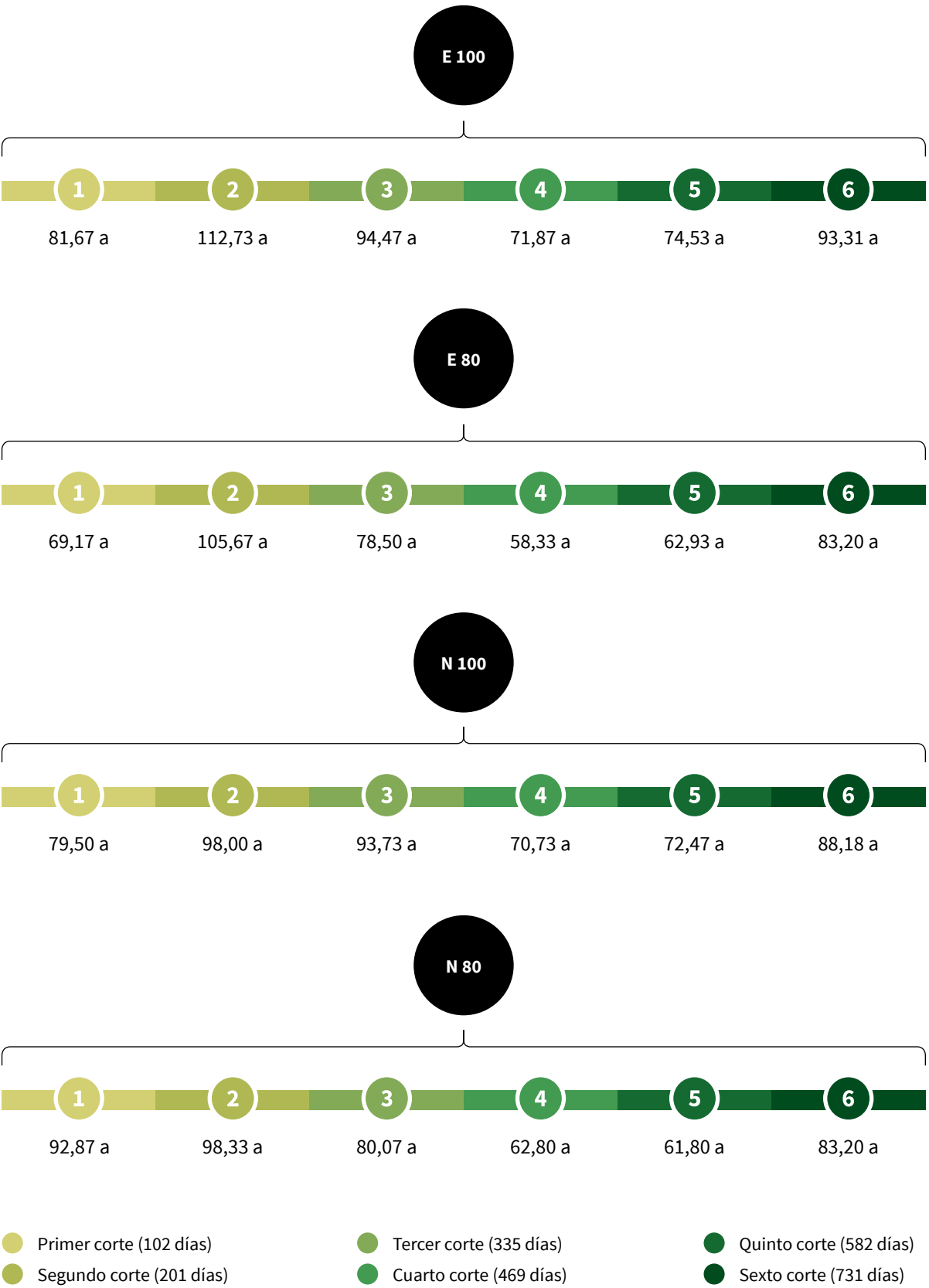
Crece bien en suelos de pH bajo y resiste sequía y humedad. Su uso principal es el de corte, pero en algunas zonas se destina al pastoreo, ensilaje o producción de heno. Puede producir, en condiciones óptimas de suelo, humedad y fertilidad, entre 200-350 t.ha⁻¹/año de forraje verde en ocho cortes, lo cual equivale a 40-70 t.ha⁻¹/año de materia seca. Sin embargo, lo más frecuente es esperar rendimientos que fluctúen entre 180-200 t.ha⁻¹/año de materia verde y 35-40 t.ha⁻¹/año de materia seca, con seis cortes al año (Rodríguez, 1983).

En el marco de la presente investigación, los parámetros de rendimiento de este pasto se evaluaron en los tanques lisímetros con cultivos en el CI La Libertad. En la tabla 9 se presenta el resultado del análisis estadístico hecho a los valores reportados en este sentido para los diferentes cortes realizados.

Como se puede apreciar, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los diferentes tratamientos de calidad de agua y dotación de riego (cantidad). Asimismo, al comparar los valores medios de rendimientos en toneladas por hectárea de materia verde descritos en la tabla con lo descrito por Cardona, Ríos y Peña (2012), se advierte que se encuentran en el rango reportado por esta referencia (80-100 t.ha⁻¹/corte), aproximadamente 250 a 300 t.ha⁻¹ de materia verde al año (en el CI La Libertad el rendimiento experimental estuvo alrededor de las 270 t.ha⁻¹ de materia verde al año).



Tabla 9.
Rendimiento
medio de mate-
ria verde (t.ha⁻¹)
en los diferentes
ciclos de corte
de pasto ele-
fante en el CI La
Libertad



*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).



Conclusiones

Con este trabajo experimental se determinaron los efectos (en el suelo y en los cultivos) de utilizar las ATAEP de la estación Apiay en el riego. Específicamente en suelos, no se encontró efecto de este tipo de agua en las propiedades físicas; de hecho, los resultados mostraron efectos positivos de este riego en la estabilidad de los agregados, mientras que, en cuanto a las propiedades químicas, se encontró aumento de los elementos Ca, Mg, K y Na. Asimismo, el pH se incrementó en los tratamientos en donde se utilizó ATAEP para riego, lo cual favorece la disponibilidad de nutrientes para las plantas. De los nutrientes analizados, el único que puede tener efectos adversos en el suelo y en condiciones de escasa lluvia es el Na, ya que este elemento en exceso afecta la estabilidad estructural.

Los análisis relacionados con presencia de metales pesados en el suelo asociados al uso de ATAEP indican que el contenido edáfico no tiene relación con los tratamientos de agua utilizados. Todos los niveles de los metales pesados analizados se

encuentran muy por debajo de los niveles críticos reportados por las normas internacionales, y en la mayoría de los casos son inferiores al contenido usual reportado para suelos con mejor fertilidad. A su vez, no se observaron efectos nocivos del uso de ATAEP como riego en la microbiología del suelo.

Por otra parte, los análisis realizados para determinar la presencia de hidrocarburos derivados del petróleo en el suelo indican que en todos los casos su contenido está por debajo del nivel de la técnica analítica utilizada, y no se encontró relación de la calidad del agua utilizada para el riego de los lisímetros con su tenor en el suelo.

Asimismo, las especies vegetales evaluadas mostraron excelentes condiciones de adaptación, rendimientos y respuestas al riego en las condiciones experimentales, de manera que no se encontró efecto del uso de ATAEP en los rendimientos de los cultivos.

Finalmente, los análisis realizados a las muestras del agua de riego de la estación Apiay permiten clasificar el agua disponible como C2S1. Por lo tanto, las ATAEP utilizadas en esta investigación son aptas para irrigación de cultivos, sin restricciones en su utilización (cumplen con el artículo 40 del Decreto 1594 para uso agrícola y con la Resolución 1207 de reúso de aguas).



A photograph of a herd of cattle in a lush green field. In the foreground, a large white cow with black spots is walking towards the right. Behind it, several other cows of various colors (brown, black, white) are standing or walking. The background is filled with tall green grass and a line of trees under a slightly overcast sky. A decorative horizontal bar with segments of yellow, green, and dark green is positioned at the top of the image.

02

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal

José Guillermo Velásquez Penagos*
Diana Patricia Barajas Pardo
Sonia Lucía Gutiérrez Parrado
Ciro Ortiz Valdés

*Autor de correspondencia

En su interés sobre el efecto del consumo de las ATAEP en la producción, la reproducción y la salud de grandes y pequeñas especies animales, Agrosavia, en asocio con Ecopetrol, adelantó actividades de monitoreo y evaluación en los centros de investigación Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA), del convenio Ecopetrol-Agrosavia (con ATAEP de la estación Castilla) y en el Centro de Investigación La Libertad, de Agrosavia (con ATAEP de la estación Apiay), ubicados en Acacias y en Villavicencio, respectivamente.

En esta publicación se presentan los estudios en bovinos del sistema doble propósito y en aves de postura con y sin consumo de ATAEP de las dos localidades.



Figura 14. Centro de Investigación La Libertad, Villavicencio Meta



Figura 15. Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA), Acacias, Meta



¿Sobre qué sistemas de producción animal se estudió el efecto del consumo de agua tratada sobre la producción, la reproducción y la salud?

Para el estudio los sistemas de producción seleccionados consideraron en bovinos el sistema de producción doble propósito tradicional (figura 16) y, en aves, el sistema de producción de huevos (figura 17).



Figura 16. Bovinos del sistema de producción doble propósito tradicional



El sistema doble propósito tradicional es el que se ha desarrollado empíricamente mediante cruzamientos en diferentes proporciones de bovinos *Bos indicus* y *Bos taurus* en busca de características productivas para carne y leche.



Figura 17. Aves de postura (Lohmann Brown)



La raza Lohmann Brown tiene la capacidad de producir carne y huevo, es altamente productiva y se adapta fácilmente a cualquier condición climática.



Evaluación del efecto del consumo de agua tratada sobre la producción, la reproducción y la salud del sistema de producción bovina



de consumo directo y de pasturas regadas con dicho tipo de agua.

1

Para el consumo directo, los animales del sistema doble propósito fueron seleccionados y distribuidos en cuatro grupos: a un primer grupo no se le suministró ATAEP (0%), de manera que únicamente consumió agua de pozo profundo no relacionada con la producción de petróleo; al segundo grupo y al tercero se les dio ATAEP en proporciones de mezcla de 25% y 50% con agua de pozo profundo, y finalmente el cuarto grupo consumió únicamente ATAEP (100%). Esto se aplicó tanto para los bovinos que consumieron agua de la estación o campo Apiay como para los de Castilla (figura 18).



Durante la investigación se suministró agua a voluntad. Para el predio ASA se trabajó con agua del campo Castilla, ubicado en el municipio Castilla La Nueva, Meta, y en el CI La Libertad, con el agua del campo Apiay ubicado en Villavicencio, Meta.

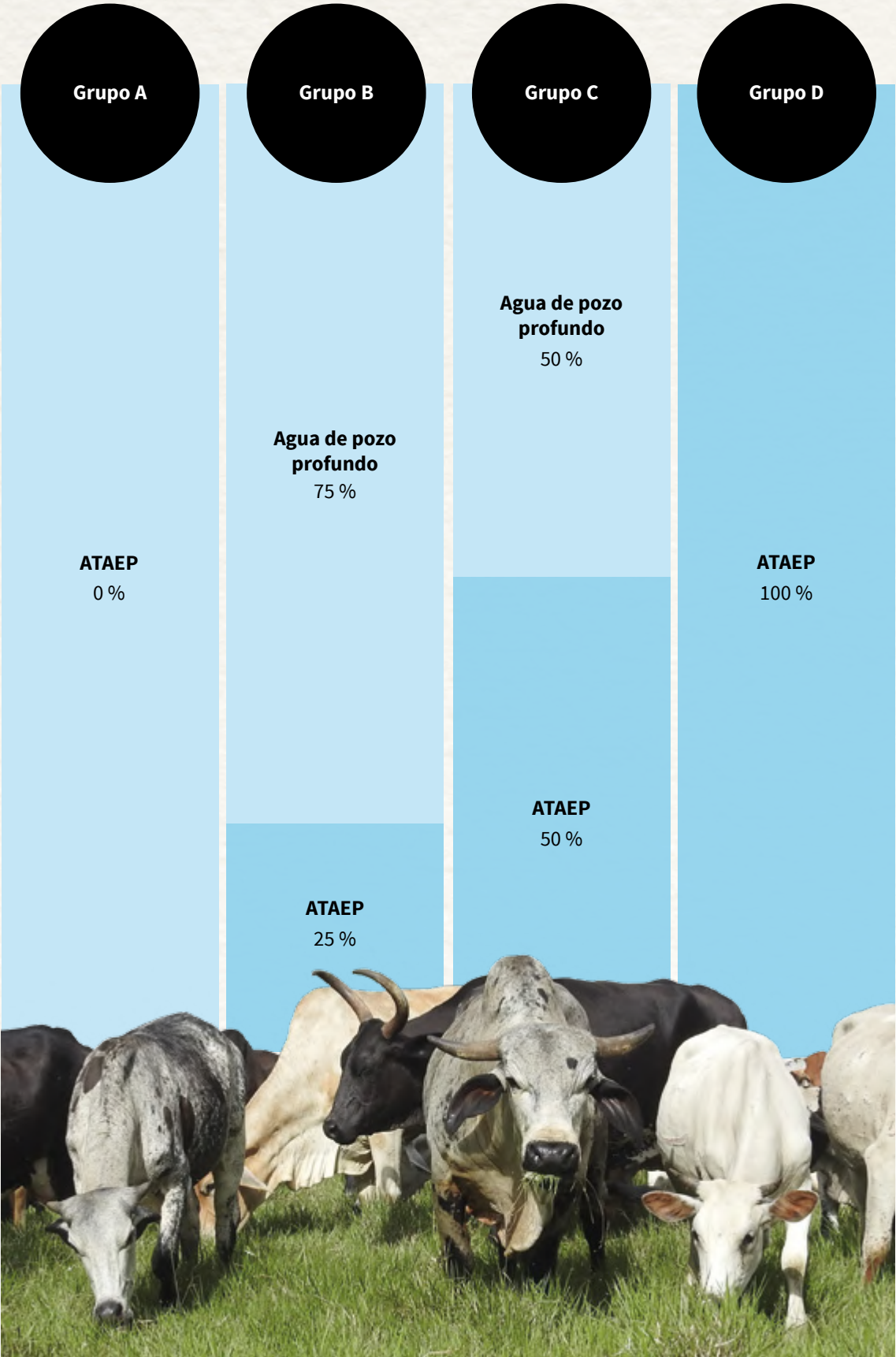
La investigación en bovinos sobre el efecto del consumo de ATAEP se realizó teniendo en cuenta que la ganadería de mayor influencia en el área de cobertura de la industria del petróleo, en las estaciones Castilla y Apiay, es el doble propósito.

Evaluación del consumo directo de agua y de pasturas regadas con agua tratada de producción en bovinos

Para evaluar el efecto de ATAEP en el sistema de producción doble propósito, se realizaron estudios



Figura 18. Mezclas de ATAEP con agua de pozo profundo no asociada a la producción de hidrocarburos de las estaciones de Apiay y Castilla evaluadas en bovinos en el CI La Libertad y en el ASA



- A** Testigo 100 % Agua de pozo profundo

B 25 % de consumo de ATAEP y 75% de pozo profundo
- C** 50 % de consumo ATAEP mezcladas con 50 % de agua pozo profundo

D 100 % de consumo ATAEP

2

Para las pasturas regadas con ATAEP, los animales monitoreados fueron distribuidos en dos grupos: uno que pastoreó en praderas

con riego de ATAEP, y otro que lo hizo en pasturas sin riego de dicha agua de la estación de Castilla en el ASA (figura 19).

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal



Figura 19. Grupos de bovinos alimentados con forraje sin riego y con riego de ATAEP

Metodología y resultados de parámetros productivos y sanitarios evaluados en bovinos con y sin consumo directo de agua tratada de producción

En este apartado se describirán los métodos y se discutirán en forma general los resultados obtenidos en el estudio de los bovinos que consumieron o no ATAEP a la luz de indicadores de producción y de nutrientes de la leche, la ganancia de peso de terneros en la fase de crecimiento, el comportamiento reproductivo de vacas y toros, y su estatus sanitario.

Producción y nutrientes de la leche

Para evaluar la producción en kilogramos por día y la calidad nutricional de la leche (porcentajes de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales), se

realizó inicialmente ordeño manual con apoyo de los terneros, los cuales eran encerrados el día anterior al procedimiento. Una vez la vaca era ordeñada a fondo, seguidamente se pesaba el ternero; este amamantaba y luego era pesado de nuevo (posordeño), de manera que la diferencia del pesaje en kilogramos del ternero más la cantidad de leche del ordeño se tomaba como la producción total del día.

Por otra parte, para la determinación de los nutrientes en leche se tomaron muestras el mismo día del ordeño, las cuales se envasaron en frascos de vidrio estériles para ser trasladadas al laboratorio del CI La Libertad de Agrosavia y ser procesadas en el Ekomilk, analizador de medición directa por tecnología ultrasónica, para determinar sus concentraciones (figura 20).

→ **Figura 20.** Toma de muestras de leche, envasado y análisis de calidad de la leche en laboratorios del CI La Libertad



Al analizar estadísticamente los resultados de producción de leche, como se puede observar en la tabla 10, se hallan diferencias entre los diferentes grupos. Ahora bien, no se evidencia que el consumo de ATAEP haya tenido efecto sobre la producción de leche diaria: en todos los casos los promedios obtenidos son valores que están en el rango esperado para el tipo de ganado en estudio.

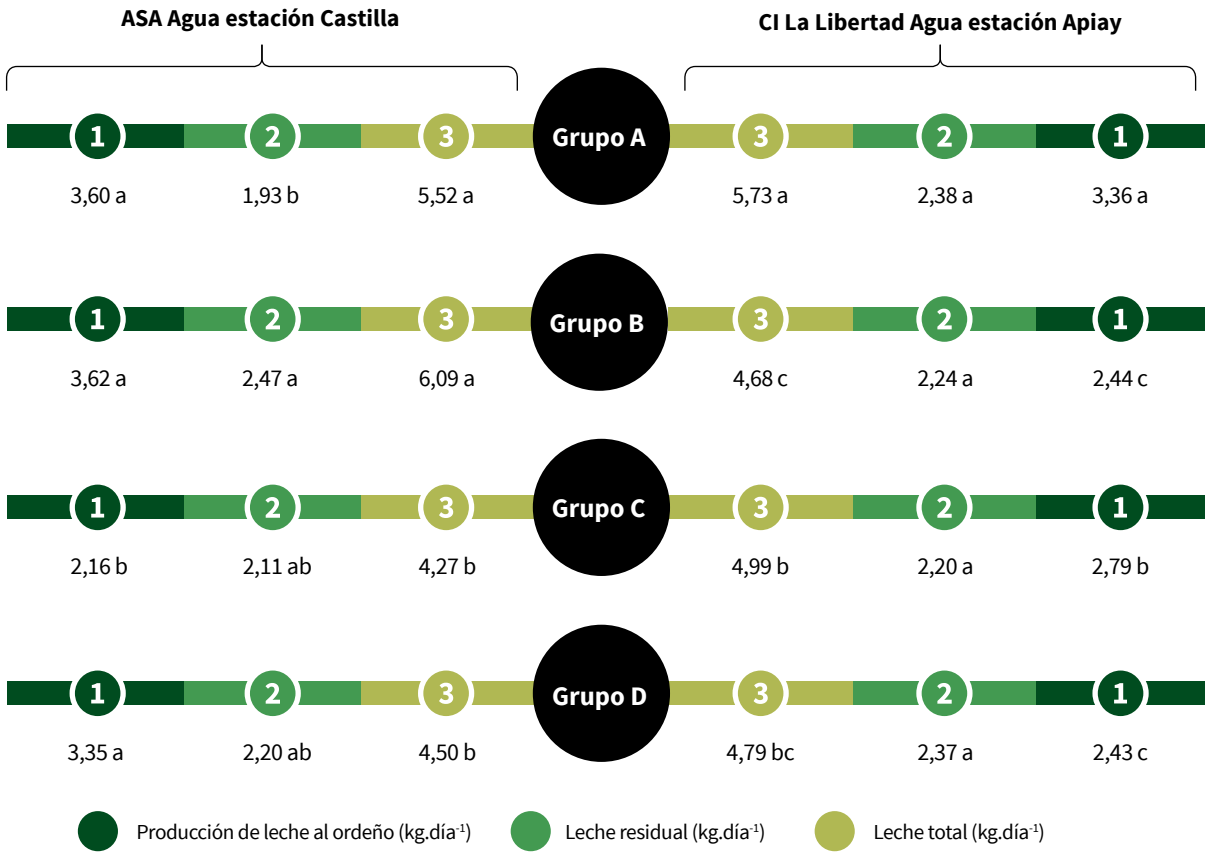
La producción promedio de leche en el ordeño para el ASA y para el CI La Libertad en los diferentes tratamientos osciló entre 2,16-3,62 y 2,44-3,36 kg/vaca/día respectivamente, sin considerar la leche residual. Estos resultados son similares a los de $3,109 \pm 1,24$ reportados por Briñez *et al.* (2008) y superiores a los 1,8 l/vaca/día reportados para la región por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2018). Además, los grupos A, B y D del ASA y el A del CI La Libertad produjeron más leche que lo encontrado en vacas doble propósito estudiadas en el piedemonte llanero por Pardo, Carulla y Hess (2008): 3 kg/vaca/día.

Cuando esta producción es sumada a la leche residual, el resultado indica la verdadera producción. En este sentido, los valores obtenidos para el ASA y para el CI La Libertad respectivamente muestran un rango entre 4,27-6,09 y 4,68-5,73 kg/vaca/día, que no mues-

tra un cambio proporcional al consumo de ATAEP que sugiera un efecto adverso de este tipo de agua.

En la tabla 11 se aprecian los resultados composicionales de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales de la leche producida por las vacas del CI La Libertad que consumieron ATAEP del campo Apiay. La grasa en leche muestra valores entre 1,50-2,10%; la cantidad de proteína en todos los tratamientos fue mayor a 3,4% —valor que supera el 3,12-3,17% reportado por Calderón, García y Martínez (2006)—, y los resultados de sólidos totales concuerdan con lo reportado por Parra, Martínez, Pardo y Vargas (1998), quienes encontraron vacas en el cordón del piedemonte llanero que produjeron leche con menos del 11,5% de sólidos totales (estos valores son determinados por influencia del bovino cebú en los diferentes componentes raciales del sistema doble propósito).

Los resultados obtenidos se evaluaron estadísticamente y no indicaron un efecto del consumo de ATAEP para las variables proteína y lactosa, mientras que sí se observó una influencia en la grasa y en los sólidos totales en el grupo D. De cualquier forma, los promedios hallados se encuentran dentro del rango esperado para el tipo de ganado en estudio.



*Letras distintas dentro de una columna corresponden a diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Grupo A				
	Grasa %	Proteína %	Lactosa %	Sólidos totales%
	2,10 b	3,46 a	5,47 a	10,31 b
Grupo B				
	Grasa %	Proteína %	Lactosa %	Sólidos totales%
	2,03 b	3,42 a	4,72 a	10,36 b
Grupo C				
	Grasa %	Proteína %	Lactosa %	Sólidos totales%
	1,99 b	3,46 a	5,06 a	10,22 ab
Grupo D				
	Grasa %	Proteína %	Lactosa %	Sólidos totales%
	1,50 a	3,40 a	4,90 a	9,87 a

*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0,05$).



← **Tabla 10.** Valores promedio (kg.día⁻¹) de producción de leche de vacas con y sin consumo de ATAEP de las estaciones Castilla y Apiay en el ASA y en el CI La Libertad

← **Tabla 11.** Promedio de los porcentajes de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales en leche de vacas con y sin consumo de ATAEP de la estación Apiay en el CI La Libertad

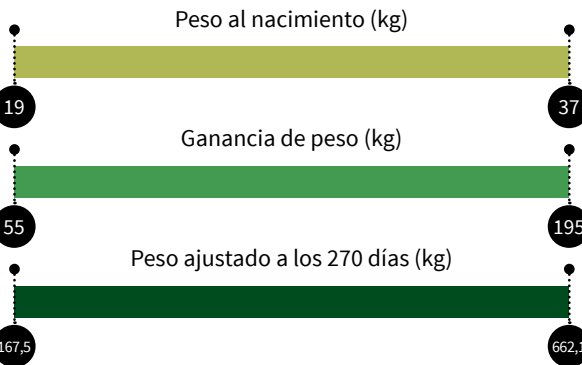
Ganancia de peso de terneros en la fase de crecimiento hasta el destete

Para evaluar la ganancia de peso de los bovinos estudiados en su fase de crecimiento, se efectuó seguimiento desde el nacimiento hasta el final de la lactancia (destete), pesando a los terneros al nacimiento y mensualmente. De este modo se valoró el peso al nacimiento y se calculó la ganancia de peso y el peso ajustado a los 210 días en todos los grupos en estudio, tanto en el ASA como en el CI La Libertad. Para evaluar la ganancia de peso de los bovinos estudiados en su fase de crecimiento, se efectuó seguimiento desde el nacimiento hasta el final de la lactancia (destete), pesando a los terneros al nacimiento y mensualmente. De este modo se valoró el peso al nacimiento y se calculó la ganancia de peso y el peso ajustado a los 210 días en todos los grupos en estudio, tanto en el ASA como en el CI La Libertad.

La respuesta obtenida se puede observar en la tabla 12, donde los pesos promedio al nacimiento de los terneros de vacas con y sin consumo de ATAEP de las estaciones Castilla y Apiay varían entre tratamientos entre 28,45-31,04 kg y 29,78-30,12 kg, y a

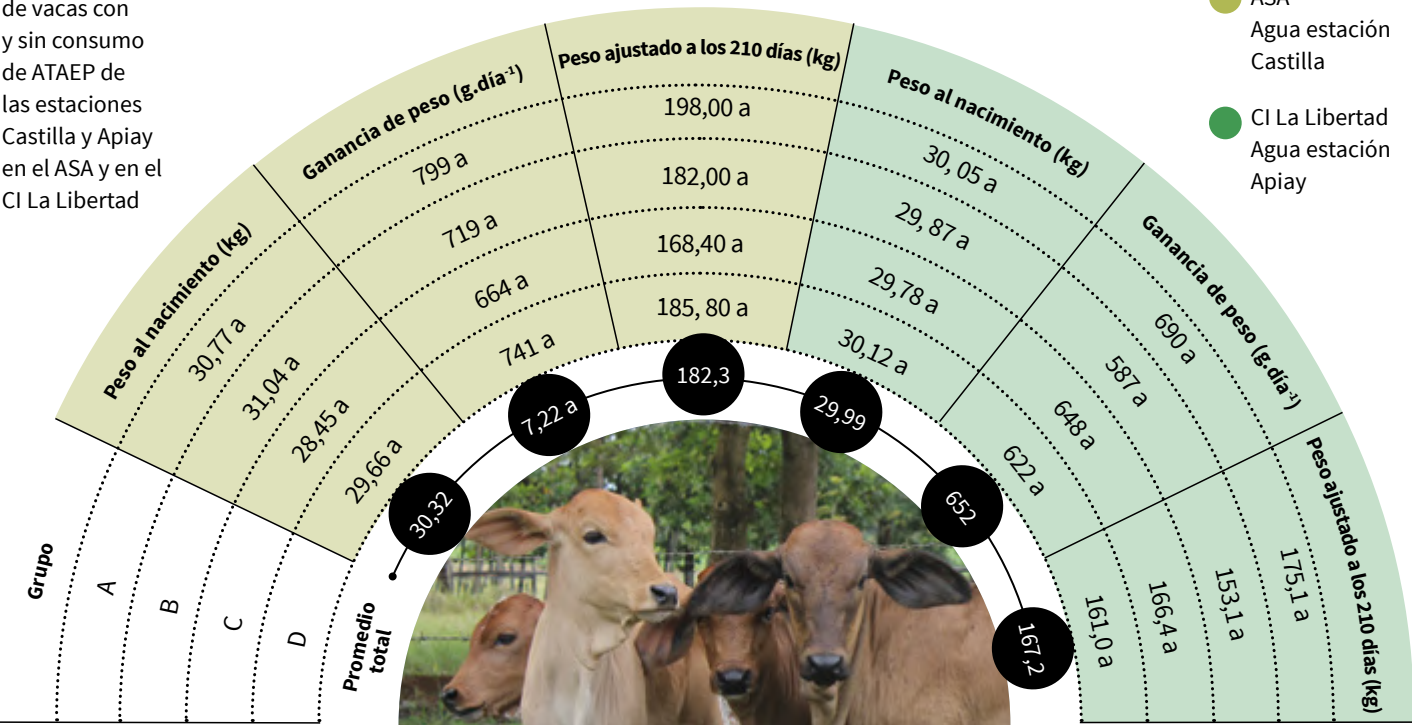
los 210 días entre 168,4-198 kg y 153,1-175,1 kg, con ganancias de peso de 664-799 g y 587-690 g respectivamente. Los resultados de estos indicadores indirectos del crecimiento son similares y, bajo el análisis estadístico, no muestran diferencias. En algunos casos son superiores a los que reportan Salamanca, Quintero y Benítez (2011), pero de cualquier forma se consideran buenos. Esta respuesta se debe al gran aporte de nutrientes que las madres brindaron durante su gestación y lactancia.

Un estudio de referencia en terneros doble propósito



(Salamanca, Quintero y Benítez, 2011)

Tabla 12. Pesos y ganancias de pesos promedios de terneros de vacas con y sin consumo de ATAEP de las estaciones Castilla y Apiay en el ASA y en el CI La Libertad



*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Comportamiento reproductivo de vacas y toros

La evaluación del comportamiento reproductivo en campo, apoyada con pruebas en laboratorio, permitió diagnosticar el estado reproductivo del hato. Para este caso el seguimiento en campo contempló como indicadores la edad a la primera concepción y la edad al primer parto de los diferentes grupos. Por otra parte, se desarrolló un trabajo en laboratorio para evaluar la calidad macroscópica y microscópica del semen mediante el uso del equipo CASA (análisis de semen asistido por computadora). También se realizaron pruebas *in vitro* de maduración ovocitaria en hembras de los diferentes grupos y de desarrollo embrionario empleando el semen criopreservado de los toros de cada uno de los tratamientos estudiados.

Edad 1.ª concepción viable (meses) 21,5 a
Edad 1.º parto (meses) 30,9 a



Edad 1.ª concepción viable (meses) 25,1 a
Edad 1.º parto (meses) 34,5 a



Total: Edad 1.ª Concepción viable (meses) : 22,2

Edad a la primera concepción y edad al primer parto

El estudio de edad a la primera concepción y de edad al primer parto de la hembra bovina se realizó por observación. La información fue registrada y se generó una base de datos que permitió el análisis a nivel estadístico de los diferentes grupos evaluados.

Como se puede observar en la figura 21, los resultados de estas evaluaciones indican que, para todas las vacas, la edad a la primera concepción viable fue similar, así como la edad al primer parto. Estos valores son menores que los 35,4 y 38,9 meses reportados por Motta, Rivera, Mariño y Lizcano (2012) y Vergara, Botero y Martínez (2009) en animales doble propósito.

Edad 1.ª concepción viable (meses) 21,2 a
Edad 1.º parto (meses) 30,6 a



Edad 1.ª concepción viable (meses) 20,8 a
Edad 1.º parto (meses) 30,2 a



Total: Edad 1.º parto (meses) : 31,6

* Letras distintas dentro del mismo parámetro representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).

Pruebas de calidad del ovocito

Para determinar la calidad ovocitaria por aspiración folicular de los ovarios de las vacas estudiadas, se extrajeron ovocitos y se efectuaron pruebas *in vitro* de maduración. El número de ovocitos maduros se estableció entonces mediante la observación microscópica de la expansión de las células que los rodean y por la

detección de placa metafásica a través de coloración (figuras 22 y 23).

Los resultados del proceso de maduración manifiestan un comportamiento similar entre los diferentes grupos y no reflejan una relación o efecto de ATAEP sobre el porcentaje de ovocitos inmaduros, las fases intermedias de la maduración y los ovocitos maduros (figura 24).

Tabla 21. Valores promedio de edad a la primera concepción viable y de edad al primer parto de hembras con y sin consumo de ATAEP de la estación Apiay en el CI La Libertad



Figura 22. Expansión de las células del cúmulo en ovocitos cultivados para maduración

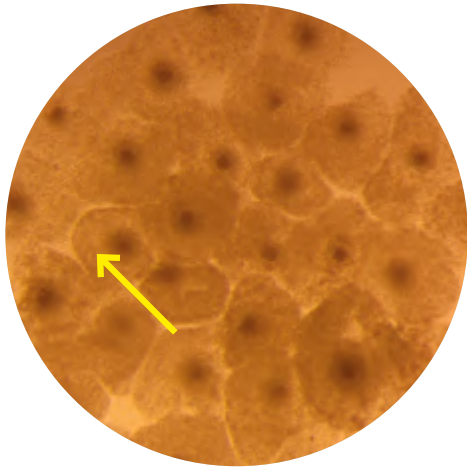
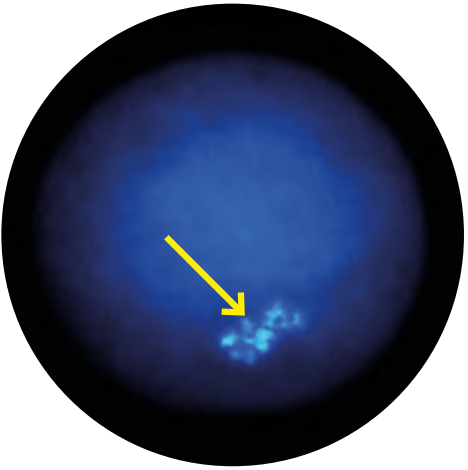


Figura 23. Presencia de placa metafásica de ovocito maduro, observado en microscopía de fluorescencia



- Ovocitos maduros
- Fases intermedias
- Ovocitos inmaduros

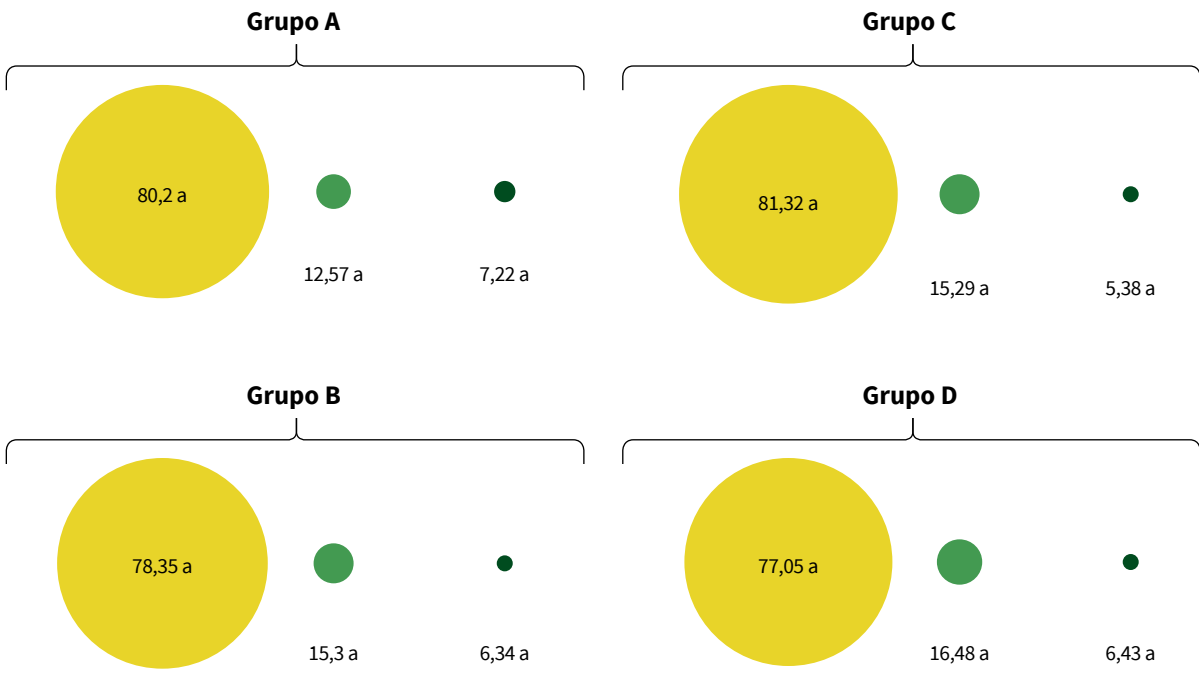


Tabla 24. Resultados de maduración de óvulos de las vacas evaluadas

* Letras distintas para la misma variable representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

● Pruebas de calidad del semen y del espermatozoide bovino

En el CI La Libertad se evaluó la calidad macroscópica y microscópica del semen del macho bovino de los diferentes grupos definidos para el estudio con apoyo del equipo CASA (análisis de semen asistido por computadora). Se efectuó la prueba de unión espermatozoide-zona pelúcida y se determinó la fertilización *in vitro*, así como el desarrollo embrionario, con semen criopreservado.

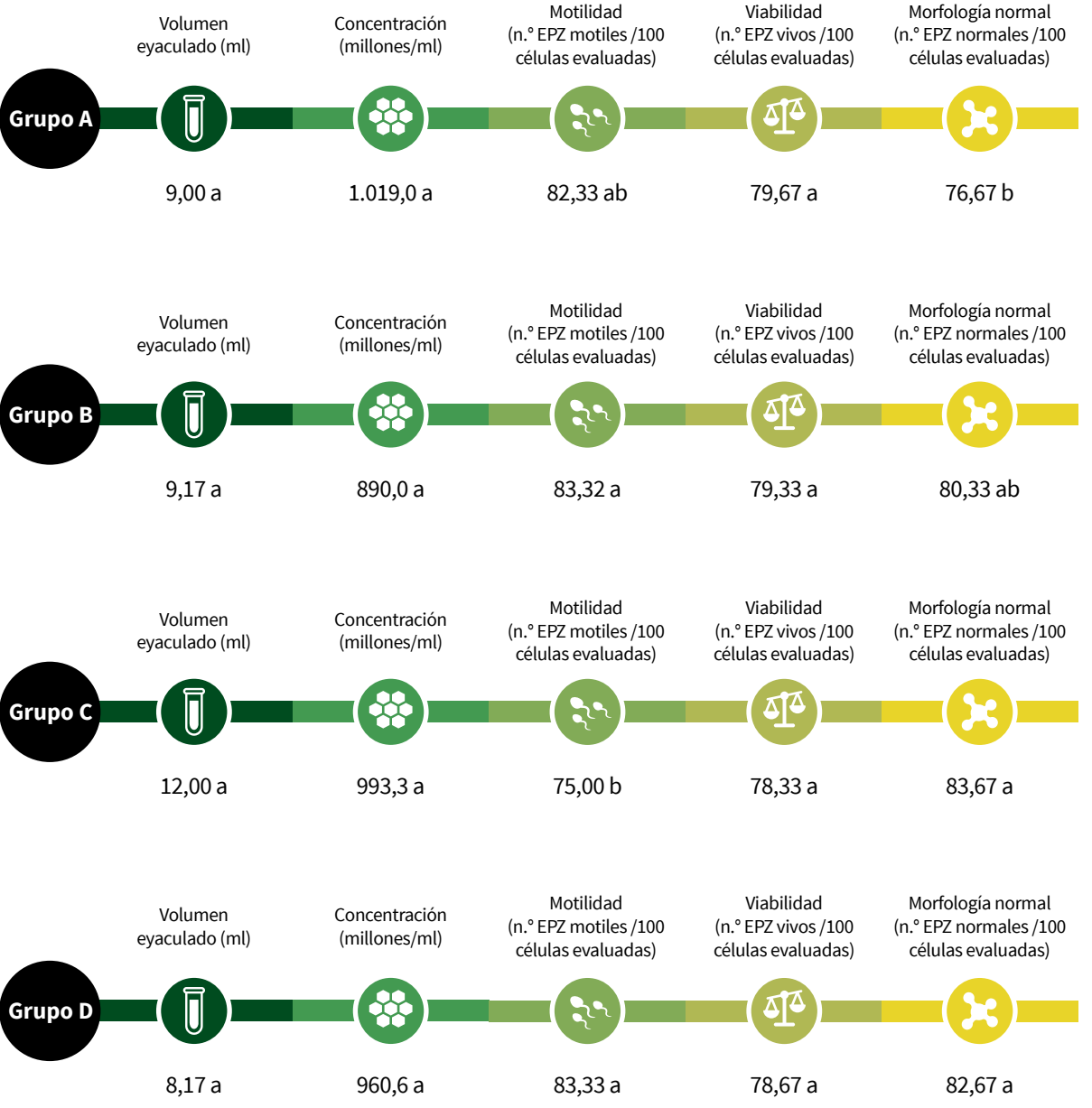
En la tabla 13 se registra la información de los diferentes comportamientos de los indicadores de calidad espermática para los grupos evaluados. Como se puede observar, en el análisis estadístico los valores promedios registrados para algunas variables presentaron diferencias entre grupos. Sin embargo, al comparar la respuesta a nivel general de las variables de los diferentes grupos (volumen: 9,17-12 ml; concentración: 890-1.019 espermatozoides x 10⁶; morfología: 76-83%) con los valores obtenidos por Cabrera y Pantoja (2015) y Hafez y Hafez (2002) (volumen: 5-8 ml; concentración:

600-2.000 espermatozoides x 10⁶; viabilidad: 77,5-84%; motilidad: 40-75%; morfología: 65-95%), se evidencia que los resultados encontrados son similares y en algunos casos superiores. La motilidad en particular, que señala cambios estadísticos, no muestra coherencia entre la proporción de agua consumida y la respuesta obtenida, y en la morfología el grupo con menor respuesta está dentro de los valores reportados.

Por otra parte, en la tabla 14 se aprecian los resultados obtenidos de una prueba de evalua-

ción de la fertilidad *in vitro* del toro, basada en la cantidad de espermatozoides que se unen a la zona pelúcida que rodea el ovocito después de ser adicionados (figura 27) y cocultivados por 30 minutos. Los valores hallados indican diferencias estadísticas entre grupos, pero el comportamiento de la variable espermatozoides unidos a la zona pelúcida no señala relación entre el tratamiento o grupo y el consumo de ATAEP. De este modo, el grupo A, de control, no muestra diferencias con el grupo D, que es el que consumió ATAEP al 100%.

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal



*EPZ: espermatozoide. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).

Tabla 13. Indicadores de calidad del semen de toros que consumieron ATAEP en diferentes mezclas en el CI La Libertad

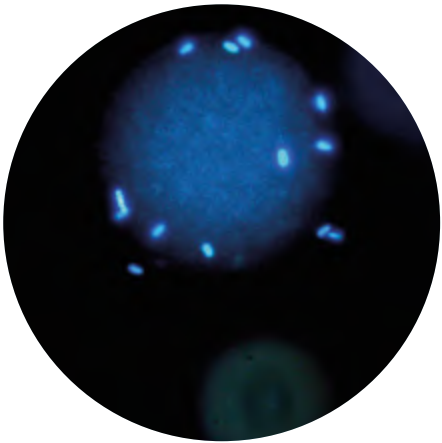
→ **Figura 25.** Toma de muestra de semen de toro mediante eyaculación inducida con electrodo



↓ **Figura 26.** Evaluación microscópica de semen. Se observan los espermatozoides en tinción eosina-nigrosina



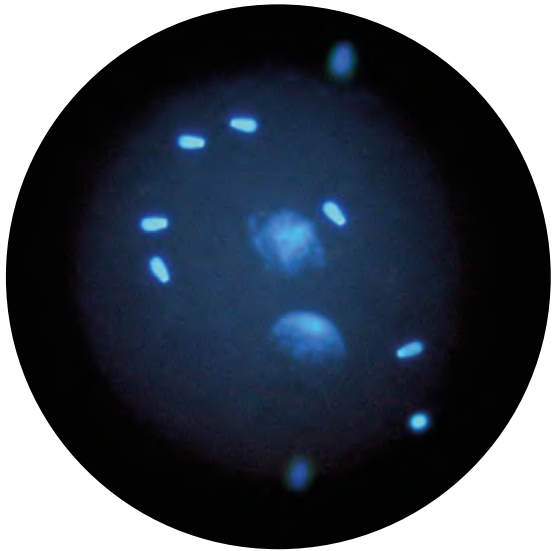
↓ **Figura 27.** Prueba de unión de espermatozoides a la zona pelúcida del ovocito



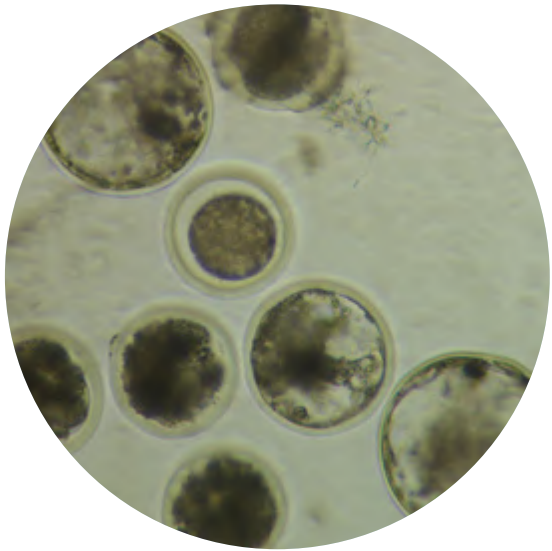
Finalmente, en este ítem de la parte reproductiva se muestran los resultados de la prueba de fecundación *in vitro* y de desarrollo embrionario para determinar la calidad espermática (tabla 15). Estas valoraciones permiten evaluar el semen criopreservado de los toros de cada grupo en ovocitos obtenidos por aspiración folicular en laboratorio de ovarios de hembras bovinas faenas en el frigorífico. El proceso implica, además de la colección y selección de ovocitos, la maduración,

la fecundación con los espermatozoides de los toros de cada grupo y el desarrollo embrionario, como se muestra en las figuras 28 y 29. La tabla 15 deja ver los mejores valores de fecundación *in vitro* y contribución al desarrollo embrionario en los tratamientos sin y con consumo completo de ATAEP, es decir, en los grupos A y D. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos determinados para toros en buenas condiciones y con capacidad reproductiva de la región.

↓ **Figura 28.** Formación de pronúcleos femenino y masculino en un ovocito fecundado (tinción de fluorescencia)



↓ **Figura 29.** Embriones bovinos en diferentes estados de desarrollo



→ **Tabla 14.** Pruebas de fertilidad del semen utilizando test de unión espermatozoide-zona pelúcida

	Número de zonas pelúcidas	Espermatozoides unidos a la zona pelúcida	Fecundación <i>in vitro</i>	Desarrollo embrionario
Grupo A	122	33 a	26,4 a	34,2 a
Grupo B	125	30,4 ab	61,4 ab	29,3 ab
Grupo C	106	23,2 b	53,2 b	24,2 b
Grupo D	120	34 a	66,9 a	36,28 a

*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

← **Tabla 15.** Resultados promedio de las pruebas realizadas para evaluar calidad seminal de toros de los diferentes grupos (fecundación *in vitro* y desarrollo de embriones)

En términos generales, en este estudio se observa que la reproducción de los grupos evaluados no se vio afectada por el consumo de ATAEP. En la figura 30 se pueden observar algunos terneros de las hembras bovinas en estudio.

Estatus sanitario

Para determinar el estado de salud de los animales evaluados tanto en el ASA como en el CI La Libertad, se implementó como metodología la exploración física con pruebas clínicas o de laboratorio durante el periodo de estudio. Esto se apoyó en valoraciones macro y microscópicas de animales *post mortem*.

● Examen físico: signos vitales, movimientos ruminales y condición corporal

Los signos vitales de los bovinos en estudio se evaluaron mediante variables como la frecuencia cardiaca, la frecuencia respiratoria y la temperatura corporal. Por otro lado, para valorar la función ruminal se analizaron los movimientos ruminales, los cuales fueron considerados a partir de los tres meses de edad. Finalmente, la condición corporal se determinó dentro de una escala de 1 a 5, como se ilustra en la figura 31, por auscultación, con apoyo de un termómetro digital rectal y por observación.

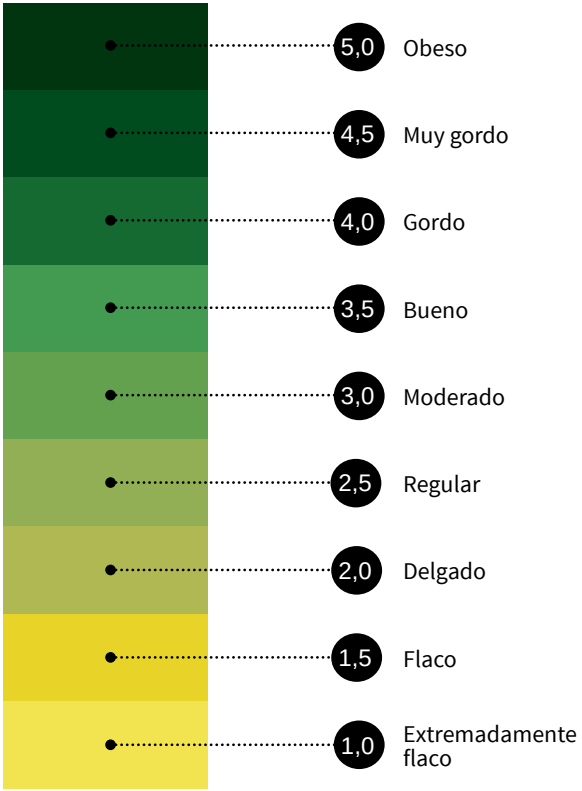


→ **Figura 30.** Terneros del sistema doble propósito



Figura 31. Escala para las determinaciones de condición corporal en bovinos

Condición corporal: Es una metodología que se evalúa por observación para clasificar el grado de reservas energéticas de los bovinos, donde se determina si está flaco o gordo.



Fuente: Ocampo, Domínguez y Galindo (2015)

Al hacer el análisis estadístico de los valores obtenidos para todas las variables descritas en la tabla 16, solo se halló diferencia en la frecuencia cardiaca, un comportamiento que, sin embargo, no se asocia con el consumo de mezclas de ATAEP; las respuestas de esta y las demás variables de signos vitales (frecuencia respiratoria, temperatura corporal) en los bovinos del ASA se encuentran dentro de los rangos espera-

dos para la especie y el sistema de producción. De igual forma, los valores obtenidos a nivel general para frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria y temperatura corporal (tabla 17) en los animales del CI La Libertad se encuentran entre los rangos reportados por Bradford (2010) (figura 32). En esta evaluación, el análisis estadístico no registró diferencias que indicaran cambios entre los grupos.

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal

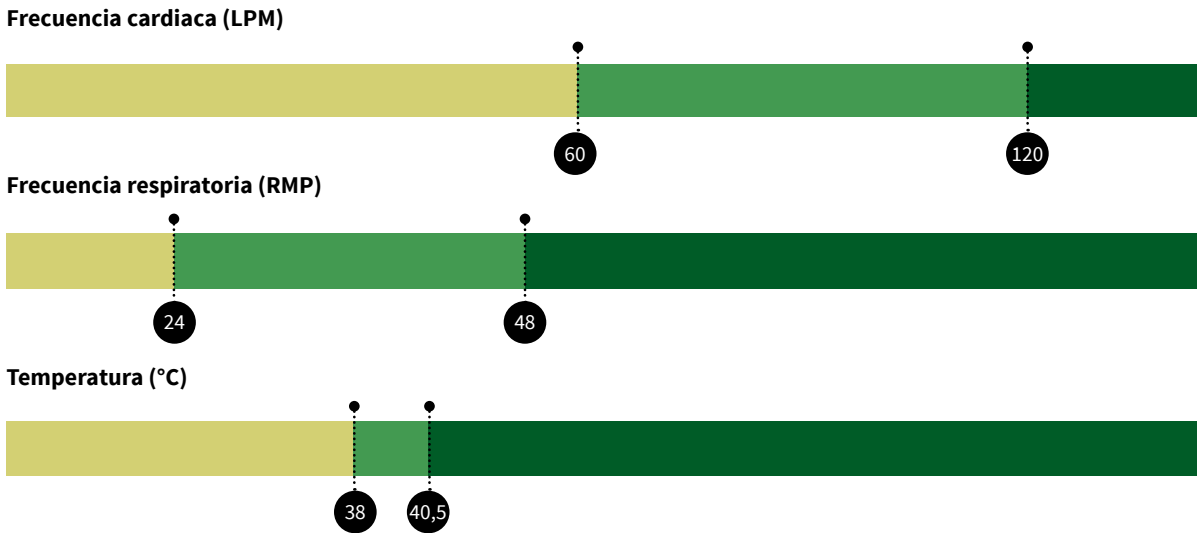
↓ **Tabla 16.** Resultados del examen físico en bovinos con y sin consumo de agua tratada de producción de la estación Castilla en el ASA

Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	
3,9 a	3,7 a	3,5 a	3,6 a	Condición corporal (1/5)
2,4 a	2,2 a	2,3 a	2,3 a	Movimientos ruminales/2 minutos
38,7 a	38,6 a	38,8 a	38,6 a	Temperatura
32,0 a	32,6 a	30,7 a	31,0 a	Frecuencia respiratoria (RPM)
74,5 a	77,3 a	72,7 b	73,9 ab	Frecuencia Cardiaca (LMP)
				
91,2 a	89,1 a	88,4 a	90,9 a	Frecuencia Cardiaca (LMP)
43,3 a	45,1 a	40,5 a	41,1 a	Frecuencia respiratoria (RPM)
38,4 a	38,9 a	38,9 a	39,0 a	Temperatura
2,9 a	3,0 a	3,1 a	2,9 a	Movimientos ruminales/2 minutos
3,8 a	3,8 a	3,9 a	3,9 a	Condición corporal (1/5)

↑ **Tabla 17.** Resultados del examen físico en bovinos con y sin consumo de agua tratada de producción de la estación Apiay en el CI La Libertad

*RPM: respiraciones por minuto. LPM: latidos por minuto. Para la tabla 16 y 17, las letras distintas dentro de la misma fila representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

→ **Figura 32.** Valores de referencia de constantes fisiológicas de bovinos en estado de salud normal. **Fuente:** Bradford (2010).



* LPM: latidos por minuto. RPM: respiraciones por minuto.

En cuanto a la evaluación de la funcionalidad ruminal, la respuesta obtenida señaló movimientos ruminales en los animales del ASA entre 2,2 y 2,4 por dos minutos, y entre 2,9 y 3,1 por dos minutos para los del CI La Libertad. No se observaron diferencias entre los grupos, y los valores son los normales para la determinación indirecta de la función ruminal (2 a 3 movimientos por dos minutos).

Con respecto a la condición corporal como variable indirecta del estado sanitario, tanto los resultados de bovinos en estudio del ASA como los del CI la libertad (tablas 16 y 17) no reflejan cambios o diferencias estadísticas entre grupos. Sus valores estuvieron entre 3,5-3,9 y 3,8-3,9, respectivamente, y corresponden a las categorías bueno y gordo (3,5-4) según Ocampo, Domínguez y Galindo (2015).



En los resultados obtenidos durante la exploración física, tanto para los animales evaluados en el ASA como para los del CI La Libertad, no se evidencia un comportamiento que muestre cambios de las variables evaluadas relacionados de forma determinante con el consumo del agua en estudio.

↓ **Figura 33.** Exploración física de bovinos



● **Evaluación de resultados de laboratorio clínico de los bovinos en estudio del ASA y del CI La Libertad**

Para apoyar el diagnóstico del examen físico se evaluaron pruebas clínicas analizadas en laboratorio. En este orden de ideas, se extrajó sangre de la vena coccígea en tubos Vacutainer con y sin anticoagulante para su posterior envío y análisis en laboratorio.

Las pruebas que se consideraron para el estudio fueron: perfil hemático, metabolismo proteico y función hepática. Los parámetros evaluados que se definieron como perfil hemático fueron el hematocrito y la hemoglobina; como indicador indirecto de metabolismo proteico se tomaron las proteínas séricas, y como indicadores de función hepática se consideraron el aspartato aminotransferasa (AST) y la gama glutamil transpeptidasa (GGT).

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal



Figura 34. Recolección y separación de muestras sanguíneas

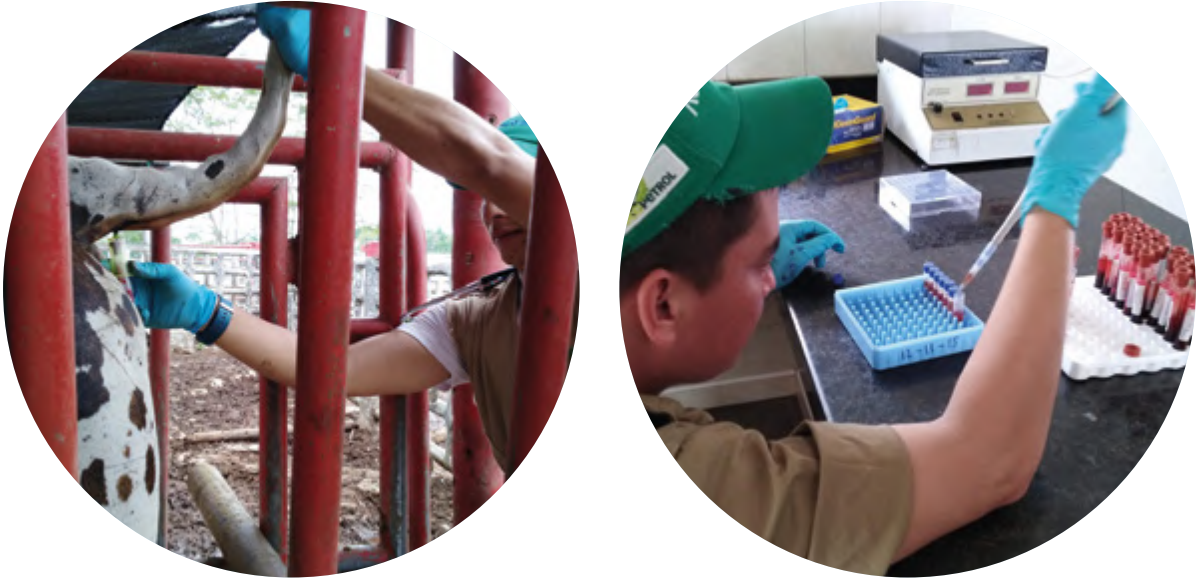
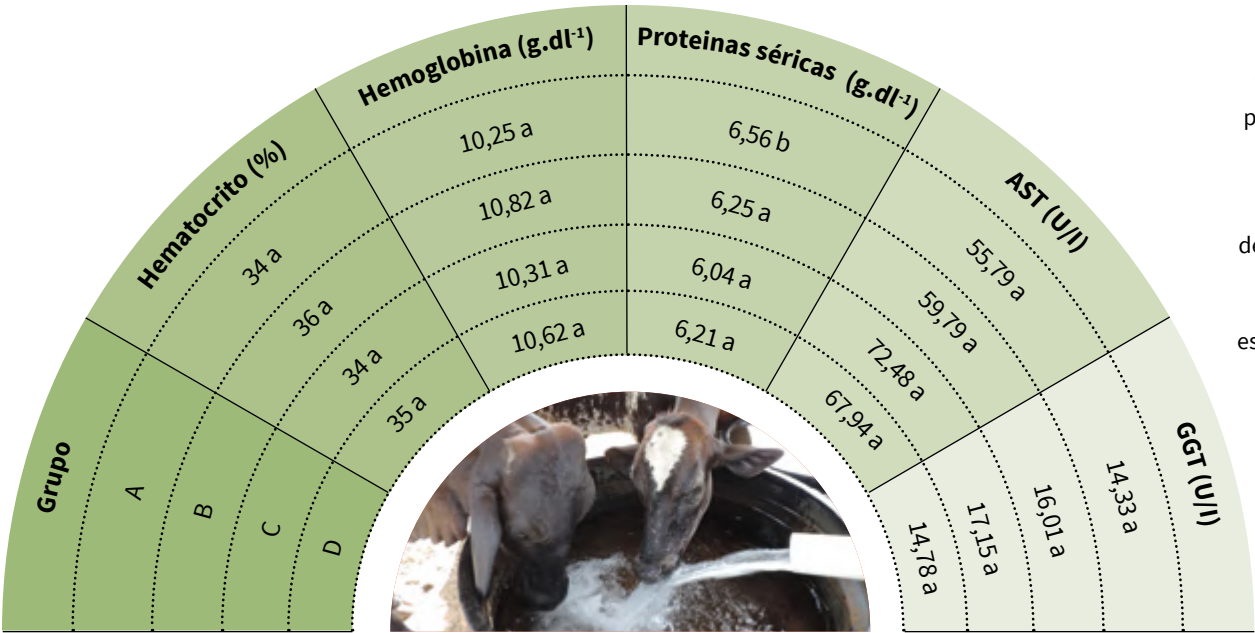


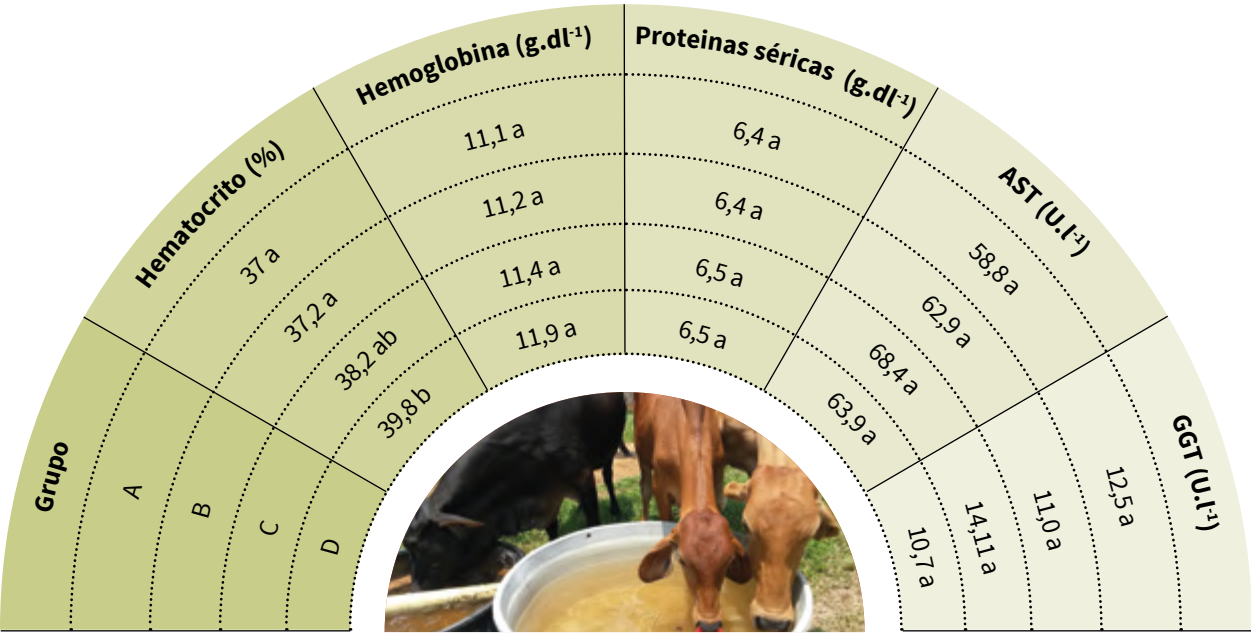
Tabla 18. Resultados de indicadores de perfil hemático, metabolismo proteico y función hepática de animales con y sin consumo de ATAEP de la estación Castilla en el ASA



*g.dl⁻¹: gramos/ decilitro. mg.dl⁻¹: miligramos/decilitro. AST: aspartato aminotransferasa. GGT: gama glutamil transpeptidasa. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).



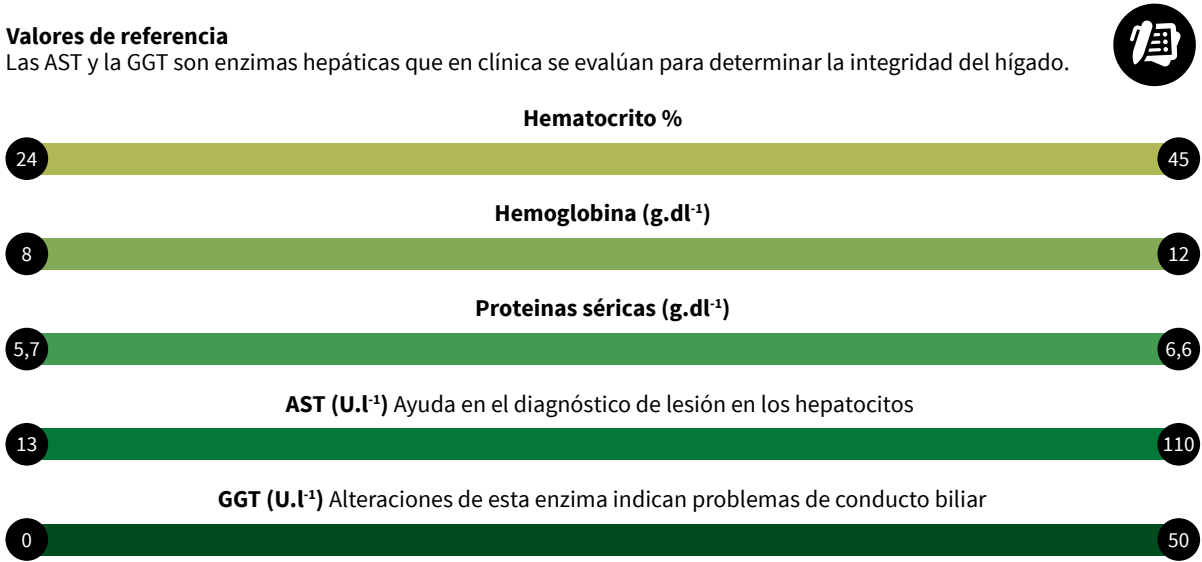
Tabla 19. Resultados de indicadores de perfil hemático, metabolismo proteico y función hepática de animales con y sin consumo de ATAEP de la estación Apiay en el CI La Libertad.



*g.dl⁻¹: gramos/ decilitro. mg/dl: miligramos/decilitro. AST: aspartato aminotransferasa. GGT: gama glutamil transpeptidasa. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).



Figura 35. Valores de referencia de parámetros clínicos en bovinos
Fuente: Ferreira *et al.* (2009), Campos, García, Hernández y Giraldo (2012) y Russell y Rous-sel (2007).



● **Evaluación macroscópica y microscópica de tejidos de los diferentes órganos de los bovinos del ASA y del CI La Libertad**

Para este tipo de valoración se seleccionaron animales de los diferentes tratamientos (A, B, C y D), tanto en el ASA como en el CI La Libertad, que fueron sacrificados. Luego se realizó una evaluación macroscópica detallada de cada órgano de los diferentes sistemas (muscular, nervioso, tegumentario, circulatorio, respiratorio, endocrino y óseo) con el fin de determinar visualmente el estado de estos. Además, se tomaron tejidos de los diferentes órganos que fueron fijados en solución de formaldehído para el estudio de histopatología.



Al evaluar a nivel macroscópico todos los órganos tomados, no se evidenciaron alteraciones que permitieran inferir un efecto del consumo de ATAEP sobre la integridad y la salud de los bovinos en estudio. De igual forma, la exploración microscópica no arrojó información que indicara asociación de alteraciones celulares producidas por el consumo de esta clase de agua.

En términos generales, en este capítulo se observa que los animales experimentales estudiados no manifiestan cambios que permitan suponer de forma contundente que existe un efecto del consumo de ATAEP tanto de la estación Castilla como de Apiay.

Figura 31. Insensibilización, evaluación macroscópica y toma de muestras de tejidos en bovino del ASA que consumió agua de la estación Castilla

Metodología y resultados de parámetros productivos y sanitarios evaluados en bovinos que pastorearon en pasturas regadas con agua tratada de producción en el ASA

Esta etapa del estudio se desarrolló en novillos doble propósito sometidos a pastoreo en praderas regadas con ATAEP. Para esta fase de la investigación se seleccionaron dos grupos de bovinos manejados bajo pastoreo en praderas con *Bracharia humidicola* sin riego y con riego superficial de ATAEP de la estación Castilla en el ASA.

Evaluación clínico-fisiológica y productiva de novillos en estudio

Para la evaluación sanitaria y productiva de los bovinos seleccionados y distribuidos en los dos grupos, se realizaron exámenes físico-clínicos *in situ*, donde se monitorearon constantes fisiológicas como frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria y movimientos ruminales. Asimismo, se tomaron muestras de sangre por venopunción de la coccígea para análisis en laboratorio de hematocrito, hemoglobina, proteínas séricas y fibrinógeno. Por último, para el componente productivo, se evaluó por observación la condición corporal y se efectuaron pesajes en ayuno al inicio y al final con miras a determinar la ganancia de peso.

Los resultados de signos vitales y movimientos ruminales obtenidos en la revisión clínica en

primera instancia se pueden observar en la tabla 20. Estos valores se encuentran dentro de los rangos de un animal normal bajo las condiciones de pastoreo, y el comportamiento entre los dos grupos es similar, de manera que no se puede definir un efecto del consumo de las pasturas regadas con ATAEP.

En la tabla 20 se puede visualizar también la respuesta del perfil hemático, representado por el hematocrito y la hemoglobina, al igual que las proteínas séricas y el fibrinógeno como indicadores indirectos de metabolismo proteico y de procesos inflamatorios respectivamente. Los resultados obtenidos presentan promedios que se encuentran dentro de los parámetros normales, y sus valores entre grupos no muestran diferencias que indiquen cambios determinantes por el consumo de pasturas regadas con ATAEP.

La respuesta del hematocrito y de la hemoglobina muestra un mejor comportamiento en los animales que consumieron pasturas regadas con ATAEP, mientras que las proteínas se muestran un poco más bajas en dicho grupo. Sin embargo, los datos están dentro del rango normal. El fibrinógeno por su parte tuvo un valor menor que uno (no indicó procesos inflamatorios), ni se dio diferencia entre grupos. Así pues, en términos generales, los parámetros clínico-fisiológicos evaluados no se vieron afectados por el consumo de pasturas regadas con ATAEP.

Finalmente, en la tabla 20 se aprecian los resultados de la condición corporal y de ganancia de peso extra en kilogramos de los grupos que consumieron pasturas regadas con ATAEP y sin riego. Los datos muestran un mejor comportamiento para los dos parámetros evaluados entre los semovientes que pastorearon en praderas regadas: 134,7 kg vs. 177,1 kg.

Estudios del agua tratada de la industria de hidrocarburos en sistemas de producción animal

→ **Figura 37.** Bovinos evaluados bajo pastoreo en praderas sin y con riego de ATAEP de la estación Castilla en el ASA

Grupo	Resultados de exploración física de bovinos			Resultados de perfil hemático, proteínas séricas y fibrinógeno de bovinos				Condición corporal y ganancia de peso promedio de bovinos	
	Frecuencia cardíaca (LPM)	Frecuencia respiratoria (RPM)	Movimientos ruminales / 2 min	Hematocrito (%)	Hemoglobina (g.dl ⁻¹)	Proteínas séricas (g.dl ⁻¹)	Fibrinógeno (g.dl ⁻¹)	Condición corporal (1-5)	Ganancia de peso (kg)
A  Bovinos alimentados bajo pastoreo con forraje <i>Bracharia humidicola</i> sin riego	 78,6 a	 34,8 a	 2,3 a	 34,7 a	 10,3 a	 6,5 a	 0,6 a	 3,9 a	 134,7 a
B  Bovinos alimentados bajo pastoreo con forraje <i>Bracharia humidicola</i> regado con ATAEP	79,4 a	35,2 a	2,4 a	37,3 a	11,2 a	6,3 a	0,6 a	4,3 b	177,1 b

*LPM: latidos por minuto. RPM: respiraciones por minuto. min: minutos. ATAEP: agua de producción tratada. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

*A: bovinos que consumieron forraje sin riego; B: bovinos que consumieron forraje regado con ATAEP

← **Tabla 20.** Resultados de exploración física de bovinos con y sin consumo de pasturas regadas con ATAEP de la estación Castilla en el ASA

Por otra parte, para complementar este trabajo se hizo el diagnóstico general de las praderas con riego y sin riego, estimando la producción de biomasa y calidad nutricional del forraje cosechado a intervalo de 6 a 9 semanas. Las praderas con riego presentaron una producción de biomasa de 6,8 toneladas de forraje verde (FV), mientras que en las praderas sin riego se encontraron 5,5 toneladas de FV. Estos valores presentaron diferencia significativa. Los resultados de la calidad nutricional, como se

muestra en la tabla 21, aunque no arrojan diferencias estadísticas, describen que la materia seca, la proteína cruda, la fibra detergente neutra y la ácida son un poco más altas en pasturas no regadas, un comportamiento posible por la mayor producción de forraje verde. En contraste, se puede apreciar que los forrajes de las praderas regadas con ATAEP presentaron una mejor digestibilidad *in vitro*, y las cantidades de calcio (Ca) y fósforo (P) fueron muy similares para las dos praderas.

Grupo A
Praderas sin riego



Producción de biomasa (t.ha ⁻¹ FV)	5,5 b
MS %	23,7 a
PC (%)	5,1 a
FDN (%)	83,5 a
FDA (%)	43,8 a
Dig <i>in vitro</i> (%)	73,8 a
Ca (mg.g ⁻¹)	2,4 a
P (%)	0,24 a

Grupo B
Forraje con riego



Producción de biomasa (t.ha ⁻¹ FV)	6,8 a
MS %	23 a
PC (%)	4,7 a
FDN (%)	80,6 a
FDA (%)	42,3 a
Dig <i>in vitro</i> (%)	77,7 a
Ca (mg.g ⁻¹)	2,7 a
P (%)	0,21 a

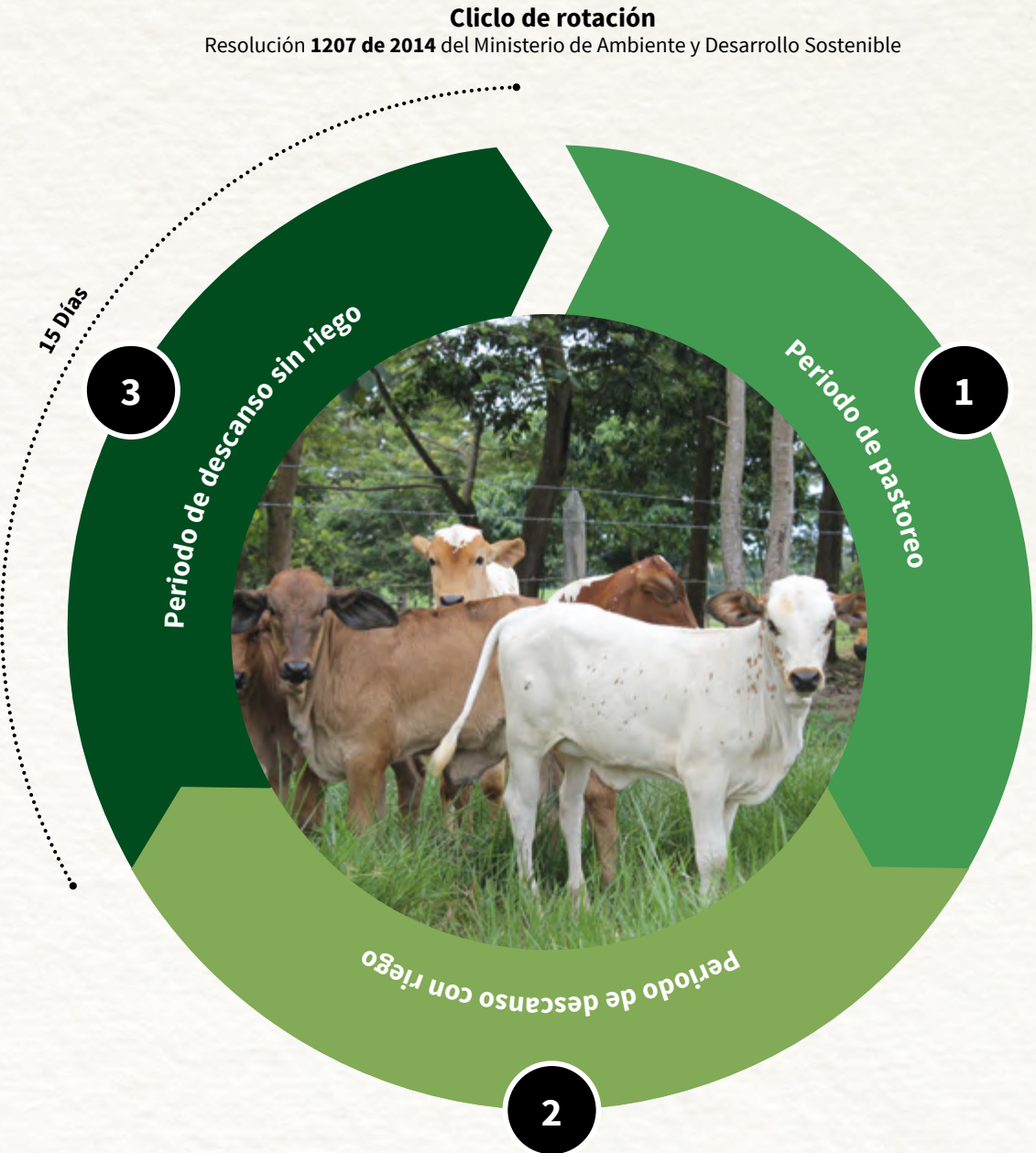
→
Tabla 21.
Promedio de parámetros de calidad nutricional del forraje de praderas con riego y sin riego

*MS: materia seca. PC: proteína cruda. FDN: fibra detergente neutra. FDA: fibra detergente ácida. Dig: digestibilidad. Ca: calcio. P: fósforo. FV: forraje verde. Letras distintas del mismo parámetro entre los grupos de riego y sin riego representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Como respuesta final a este estudio, se puede apreciar que la producción de biomasa y los valores de digestibilidad de las praderas regadas se vieron reflejados en la condición corporal y en la ganancia de peso de los novillos evaluados.

Por otra parte, en la revisión bibliográfica realizada se encontró que el Ministerio del Medio Ambiente, mediante la Resolución 1207 de 2014, establece que el agua de reúso puede ser utilizada en el riego de praderas para la alimentación animal si se considera un periodo de descanso obligatorio sin riego de 15 días. De esta manera se podría proponer un ciclo de rotación específico que permitiría dar cumplimiento a la normatividad.

Así las cosas, para dar cumplimiento a la normatividad, se debe contar con un ciclo de rotación que tenga un periodo de pastoreo y un periodo de descanso total dividido en dos: con riego y sin riego (15 días obligatorios), como lo ilustra la figura 38. El tiempo de descanso total de las praderas depende en gran medida de la especie y de las características del forraje, considerando que se busca realizar el pastoreo cuando la cobertura tenga la mejor producción y calidad nutricional. Asimismo, mientras que el periodo de descanso sin riego debe ser de 15 días obligatorios, los días de descanso con riego dependen del periodo de descanso total. Por otra parte, el tiempo de pastoreo está regulado por la biomasa disponible/pradera, el número de animales y el peso.



←
Figura 38.
Ciclo de rotación que se enmarca en la normatividad que regula la utilización de forraje regado con agua de reúso para la alimentación animal



Evaluación del efecto del consumo de agua tratada en las aves de postura

Basados en el estudio realizado para bovinos, el efecto del consumo de ATAEP en la producción y en la salud de aves se evaluó bajo el mismo diseño y esquema.

Metodología y resultados de parámetros productivos y sanitarios evaluados en aves de postura con y sin consumo directo de ATAEP en el ASA

Para este estudio se seleccionaron aves de la línea Lohmann Brown, con características para la producción de carne y huevo, con alta capacidad de adaptación. Las aves fueron distribuidas en cuatro grupos: uno al que no se le suministró ATAEP (0%) y que únicamente consumió agua de pozo profundo no relacionada con la producción de petróleo; un segundo grupo y un tercer grupo que recibieron ATAEP en proporciones de mezcla de 25% y 50% con agua de pozo profundo, y finalmente un cuarto grupo consumió únicamente ATAEP (100%). En la figura 39 se puede observar en forma esquemática la distribución de los tratamientos evaluados en el estudio.

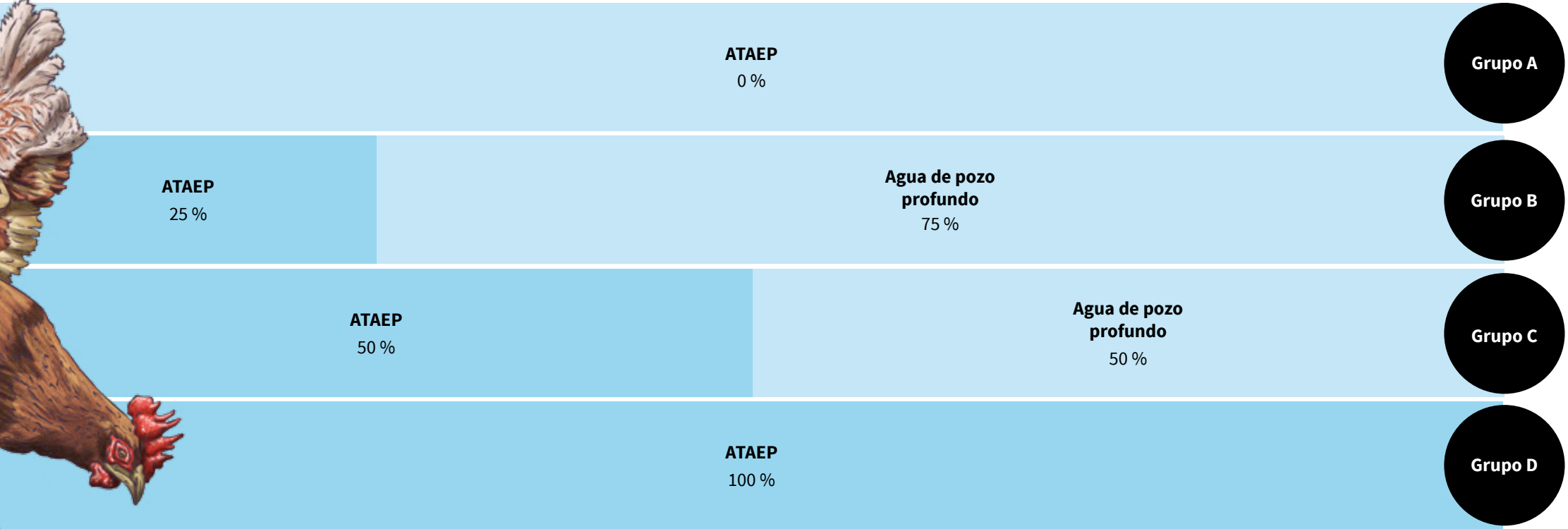
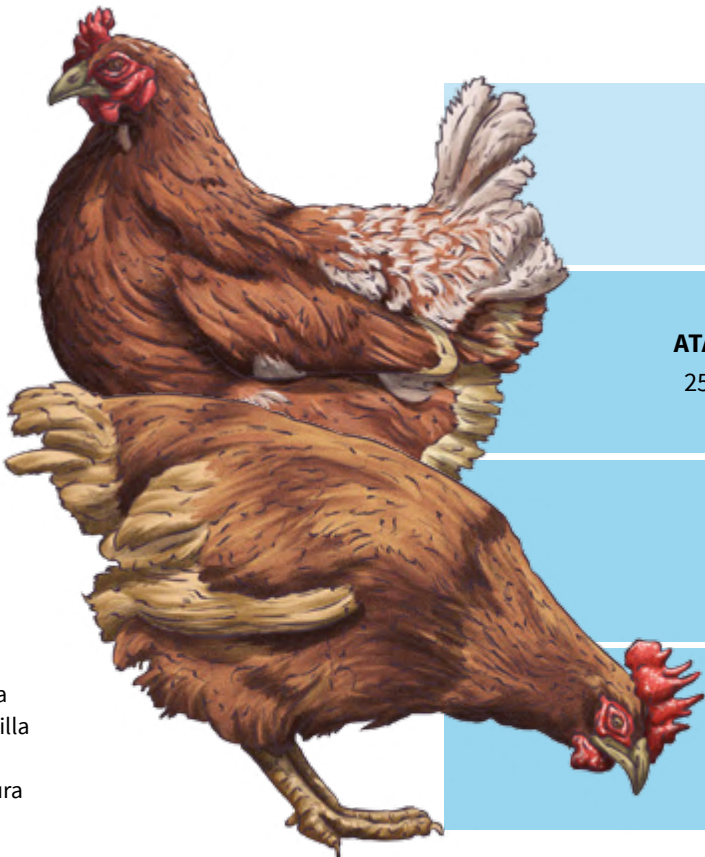
Las aves se manejaron en un ambiente de semi-pastoreo, con disponibilidad de agua a voluntad y concentrado según sus requerimientos nutricionales. La evaluación se realizó desde el primer día de nacidas hasta la semana 55 de vida, y se hicieron pesajes semanales tomando al azar 20 animales

de cada tratamiento (figura 40), estimando el peso promedio y la ganancia de peso acumulada. Una vez iniciada la postura, a diario se registraron la cantidad y el peso de huevos por tratamiento, calculando el número y el porcentaje de huevos por ave por día y también el peso promedio del huevo.



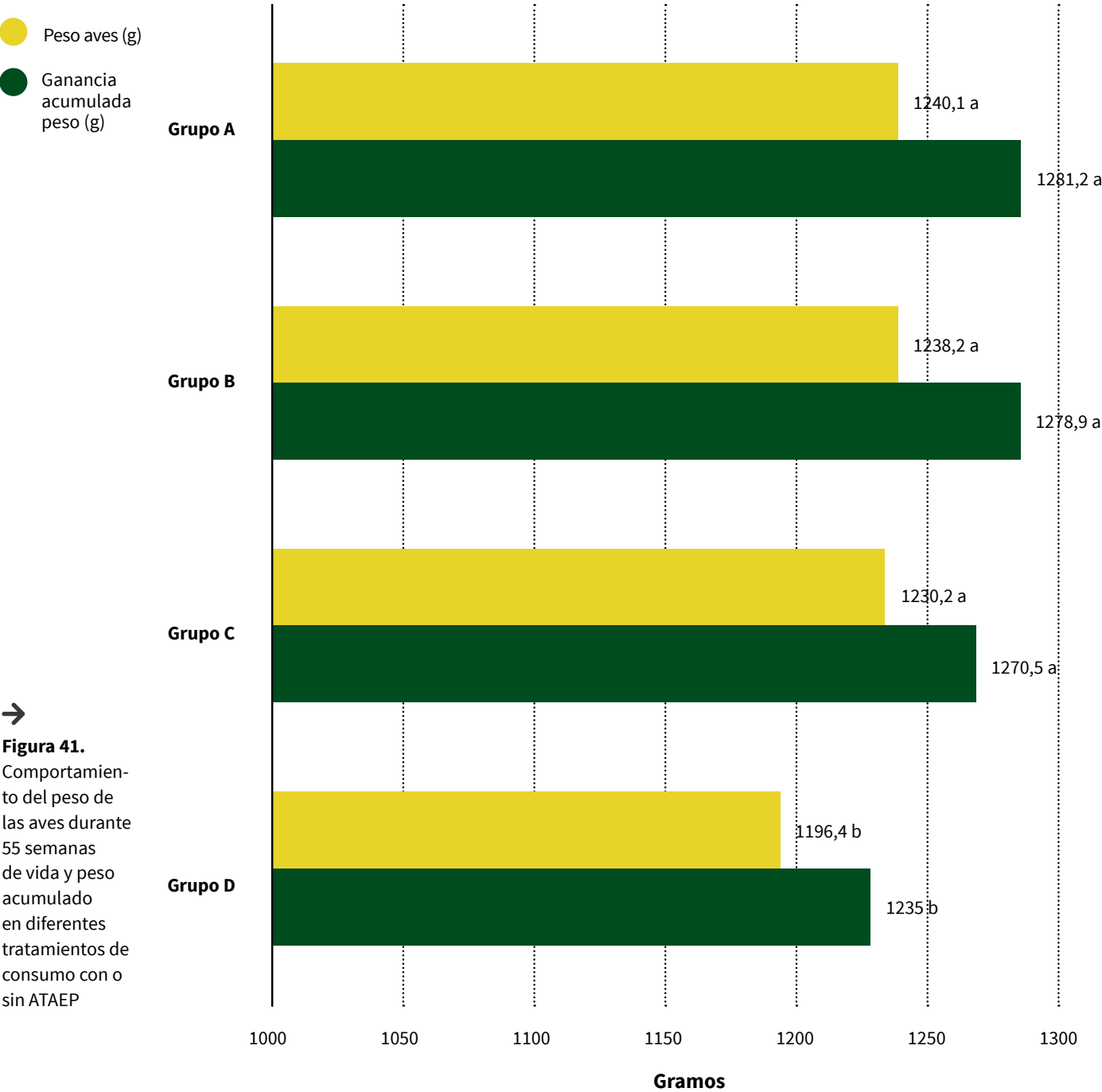
Figura 40. Pollitas y aves en la fase de postura

Figura 39. Mezclas de ATAEP con agua de pozo profundo de la estación Castilla evaluada en aves de postura en el ASA



Desarrollo productivo de aves de postura con y sin consumo directo de agua tratada de producción en el ASA

En la figura 41 se puede observar el comportamiento de la media para el peso de las aves durante las primeras 55 semanas y para el peso acumulado en los cuatro grupos en estudio. La diferencia entre estas dos variables en el grupo D es estadísticamente inferior a la de los otros grupos en estudio (A, B, C).



→ **Figura 41.** Comportamiento del peso de las aves durante 55 semanas de vida y peso acumulado en diferentes tratamientos de consumo con o sin ATAEP

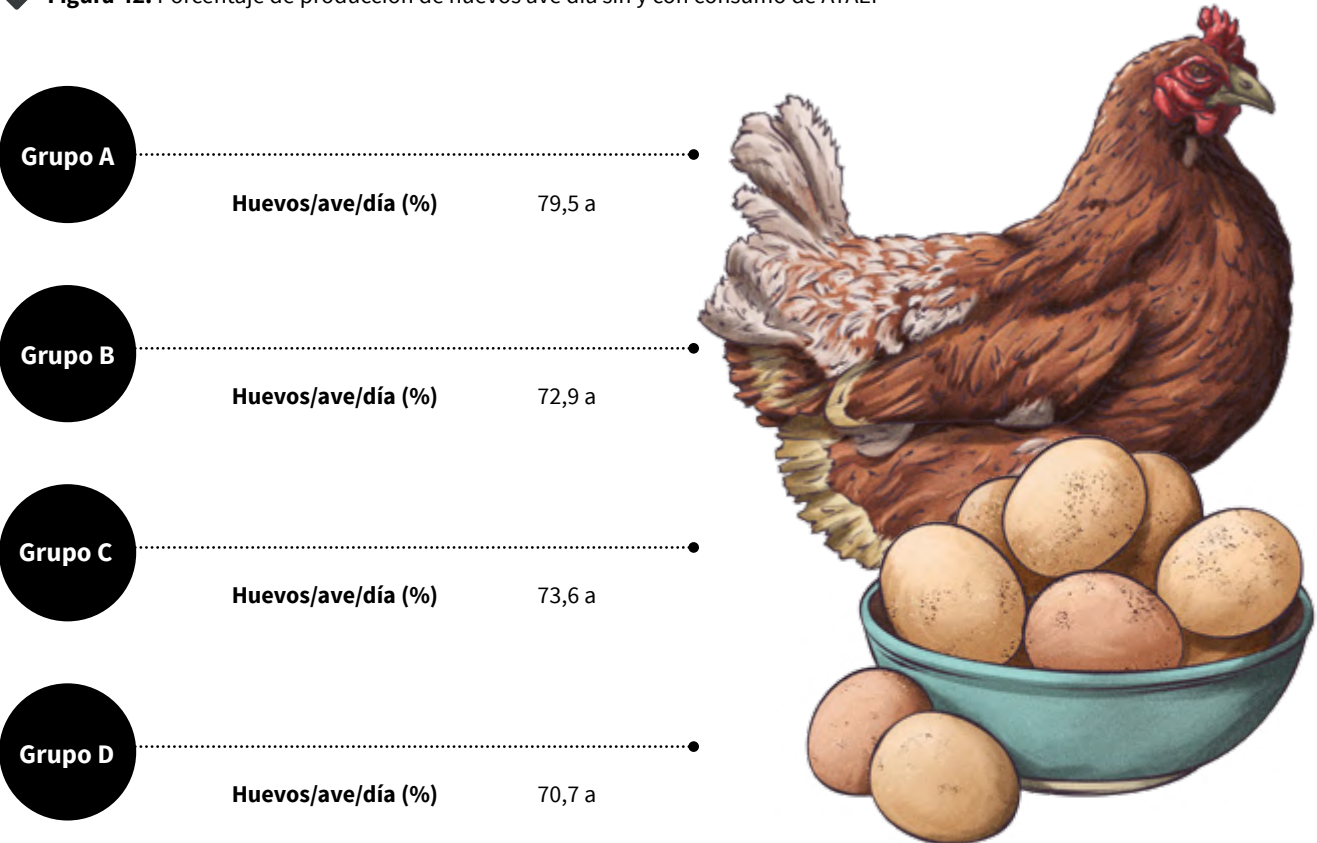
A: grupo de aves que consumieron solo agua de pozo profundo. B: grupo de aves que consumieron 25% de ATAEP y 75% de agua de pozo profundo. C: grupo de aves que consumieron 50% de ATAEP y 50% de agua de pozo profundo. D: grupo de aves que consumieron solo ATAEP (100%). Letras distintas para cada parámetro representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Además, la diferencia entre el peso de las aves del grupo A y el de las del grupo D (1.240,1 – 1.196,4) es de 43,7 g, aproximadamente 3%, y para la ganancia acumulada de peso (1.281,2 – 1.235) es de 46,2 g, aproximadamente 2%. Dado que esta diferencia está dentro del rango de dispersión para este tipo de variables y de aves, es probable que la respuesta no se asocie al consumo de ATAEP.

Por otra parte, en la figura 42 se describen los parámetros evaluados para estimar el desarrollo productivo de las gallinas estudiadas, entre ellos el porcentaje de postura, expresado en huevo/ave/día. Los resultados en este caso no muestran diferencias estadísticas entre tratamientos, y el rango de su presentación está entre 70,7 y 79,5, valores que se encuentran dentro de lo esperado para este sistema de producción.

Asimismo, en la figura 43, que describe el comportamiento de postura de acuerdo con la semana de vida de las aves, se observa que las gallinas de los cuatro grupos iniciaron su fase de postura en la semana de vida 18, con un máximo pico que osciló entre la semana 26 y la 29. Estas respuestas se encuentran dentro de lo esperado según lo reportado para la línea Lohman Brow Classic. Con respecto al tratamiento D, en la figura se puede notar un comportamiento inverso entre las semanas 23 y 28 con respecto a los demás tratamientos, y en la semana 33 y 38 en comparación con el tratamiento A, y a partir de esta semana la respuesta es muy similar. Estos cambios o diferencias, sin embargo, posiblemente se deben al rango de dispersión para estos tipos de variables y posiblemente no estén asociados al consumo de ATAEP.

↓ **Figura 42.** Porcentaje de producción de huevos ave día sin y con consumo de ATAEP

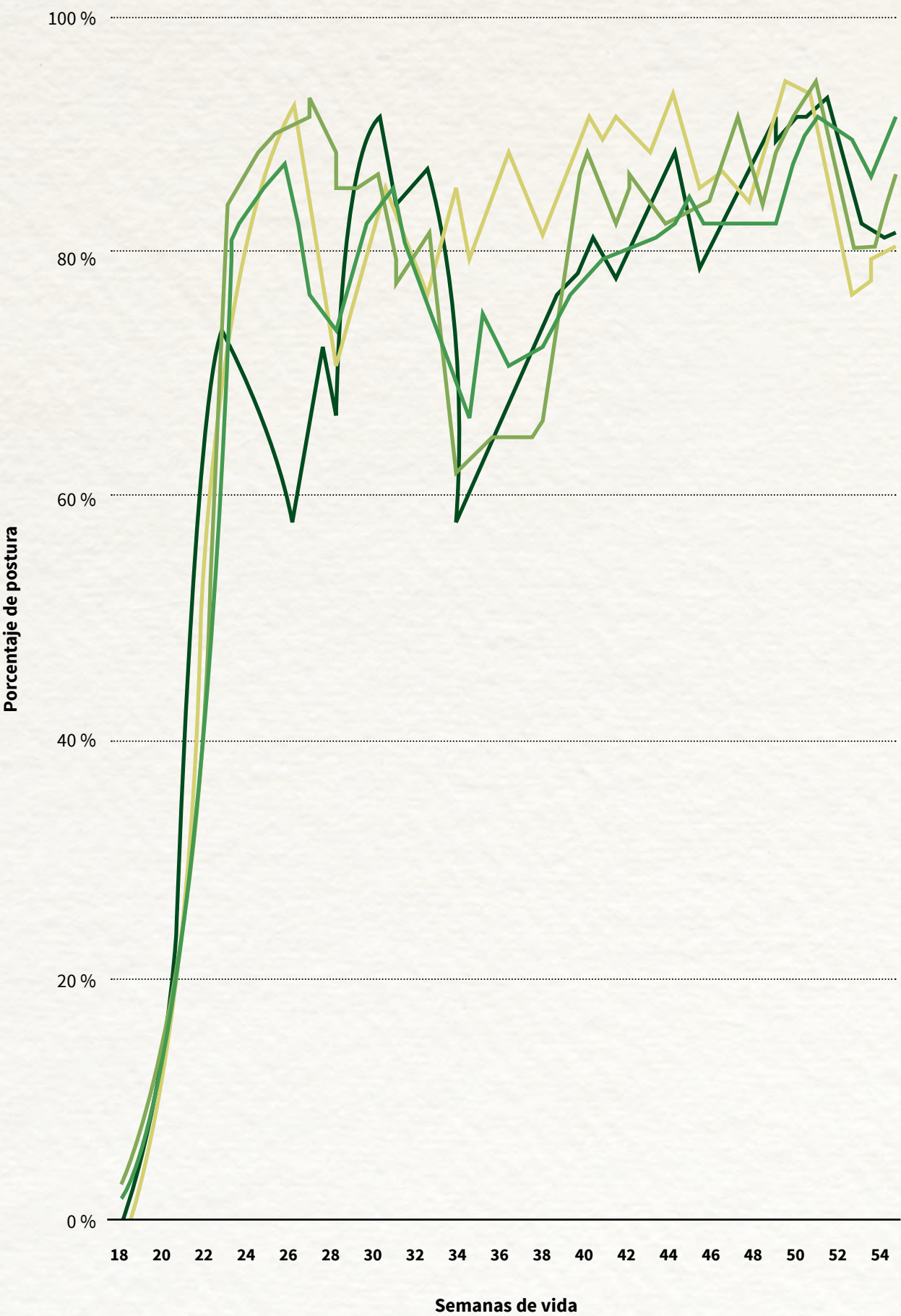


*Letras similares no representan cambio estadísticamente significativo ($p > 0,05$).

A
B
C
D



Figura 43. Desarrollo productivo según el porcentaje de postura estimado de acuerdo con la semana de vida para las gallinas evaluadas



Evaluación sanitaria de aves de postura con y sin consumo directo de agua tratada de producción en el ASA

Estudio y examen de los órganos y tejidos

En el proceso de evaluación del estado sanitario de las aves estudiadas, se realizaron tres sacrificios de cinco aves por grupo en las semanas de vida 10, 33 y 51. El objetivo era evaluar macroscópicamente la integridad general de los órganos (hígado, pulmón, intestino, oviducto, molleja y músculo) y tomar muestras de los diferentes para su evaluación microscópica.

A nivel microscópico, las evaluaciones realizadas postsacrificio a las aves de los diferentes grupos estudiados no mostraron cambios que indicaran alteraciones diferenciales con respecto al grupo control (A) y que se asociaran al consumo de ATAEP. De igual forma, los hallazgos microscópicos reportados por los laboratorios no señalaron cambios relacionados por este suministro de agua.

Evaluación de porcentajes de mortalidad

Otro indicador importante estudiado para el diagnóstico del comportamiento de la salud

durante el estudio y que también es representativo en la productividad fue el porcentaje de mortalidad, expresado en ave/año. Así, en el desarrollo de la investigación se observó en el grupo A, o control, un porcentaje de mortalidad del 0,5% (ave/año), mientras que para los grupos que consumieron ATAEP en diferentes concentraciones, esto es, B, C, y D, el indicador fue de 0,58%, 0,60% y 0,60% respectivamente. Estos resultados se encuentran muy por debajo de lo esperado en el manual de la línea Lohmann Brown.



Conclusiones

Los estudios realizados en el CI La Libertad de Agro-savia y en el ASA sobre el efecto de las ATAEP en la producción, la reproducción y la salud de especies bovinas y de aves de corral (gallinas) no señalan cambios determinantes que evidencien efectos adversos de este tipo de agua. Por otra parte, los promedios obtenidos en las variables utilizadas en este estudio para evaluar el desempeño en los diferentes eventos productivos, reproductivos y sanitarios se encontraron dentro de los rangos que se reportan para la región.



Figura 44. Necropsia en ave de postura

A photograph of a dense forest with many tall, slender trees and green foliage. A horizontal bar with three segments of different shades of green (light, medium, and dark) spans the top of the image.

03

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

Édgar F. Almansa Manrique*
Gloria E. Pastrana Aguirre
Julián A. Peláez Montoya
Jenniffer Zulay Tafur Sanabria

*Autor de correspondencia



parte del documento se describe el comportamiento de las características químicas, físicas y microbiológicas del suelo, así como los factores climáticos, las cantidades de agua aplicada y el manejo agronómico realizado. Particularmente, los análisis efectuados a los suelos en las diferentes coberturas no reflejan efectos adversos asociados a la calidad de las ATAEP utilizadas para riego.

Cabe anotar que este estudio ha permitido registrar permanentemente las tasas de crecimiento, desarrollo y acumulación de biomasa de los diferentes cultivos y obtener información para las diferentes especies respecto al efecto del riego que no se encuentra reportada para las condiciones de sabanas húmedas tropicales. En ese sentido, se obtuvo evidencia de un efecto positivo del riego aplicado a las especies evaluadas.

En este capítulo se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas durante cuatro años y medio relacionadas con el desarrollo y producción de seis especies forestales establecidas en el ASA del municipio de Acacías, Meta, y que fueron sometidas a un manejo de agricultura bajo riego con ATAEP provenientes del STAP del bloque de explotación petrolera Cubarral, que cubre los municipios de Castilla La Nueva y Acacías. Dichas especies son: acacia (*Acacia mangium*), melina (*Gmelina arborea*), caucho (*Hevea brasiliensis*), eucalipto (*Eucalyptus pellita*), yopo (*Anadenanthera peregrina*) y pino (*Pinus caribaea*).

Con el objetivo de contextualizar las condiciones en las cuales se realizó la investigación, en esta



Se puede afirmar entonces que las ATAEP que cumplen con la normatividad legal vigente (Resolución 1207 de 2014, Resolución 0631 de 2015 y Decreto 1594 de 1984) surgen como una valiosa alternativa para el riego en la producción de especies forestales establecidas en suelos con limitaciones de fertilidad y que están sometidos periódicamente a intensos periodos de sequía.



Materiales y métodos

Ubicación

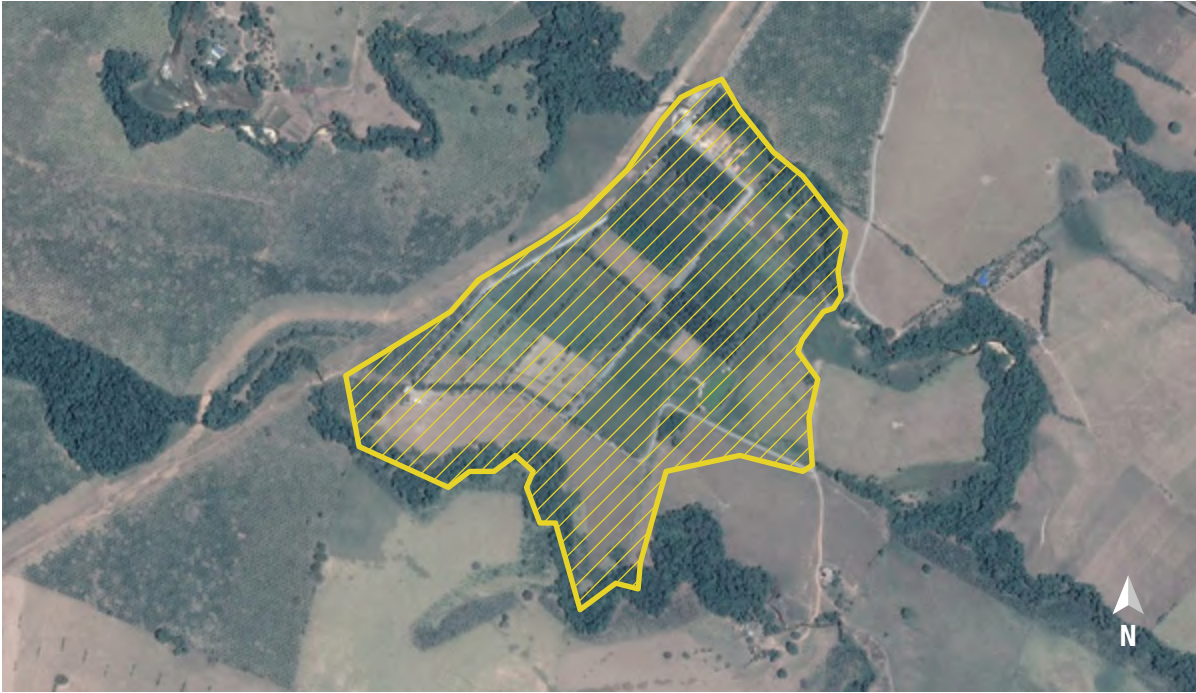
El ASA se encuentra localizado en la cuenca del río Orotoy, en la vereda La Primavera, del municipio de Acacías, en el departamento del Meta. Sus coordenadas geográficas son 04° 35' 56,57" latitud norte y 74° 04' 51,30" latitud oeste (figura 45). Esta área se ubica en un paisaje de piedemonte sobre terrazas medias con predominio de suelos clase VI, según la clasificación de Klingebiel y Montgomery adoptada por el IGAC (2004). Esta clasificación comprende ocho clases, en las que a medida que aumentan el número y el tipo de limitaciones se incrementa el valor numérico. Así, los suelos clase I no presentarán restricciones de uso, mientras que los suelos de clase VIII cuentan con la mayor limitación de uso. En general, las clases I a IV poseen aptitud agropecuaria, la clase V está limitada por factores diferentes al grado de pendiente, las clases VI y VII tienen limitaciones severas, por lo que se destinan a protección, y la clase VIII

corresponde a suelos cuyo uso es meramente paisajístico y de recreación. Particularmente en el caso de los suelos clase VI, estas limitaciones los hacen inadecuados para la explotación de muchos cultivos, por lo que su uso debe orientarse hacia la elección de cultivos perennes, semiperennes y actividades de agroforestería, incluyendo especies nativas maderables, así como a la recuperación de la cobertura del bosque natural (IGAC, 2004).

Por otra parte, el clima característico de la zona es cálido húmedo, con régimen de lluvia monomodal (cerca de 2.500 mm.año⁻¹ de lluvia total), donde la mayor precipitación se registra entre los meses de abril y junio, con la particularidad de ser eventos de alta intensidad y corta duración. La temperatura promedio es mayor de 24 °C, y la evapotranspiración se ubica alrededor de los 3,5-4,0 mm.día⁻¹.

Especies evaluadas

Las especies vegetales establecidas se seleccionaron con base en dos criterios: por un lado, el potencial de cada una en la generación de bioenergía y, por otro lado, su adaptabilidad al ecosistema de la zona. De esta manera se eligieron seis especies vegetales que fueron previamente evaluadas bajo riego en condiciones de invernadero, y de las cuales cinco presentan potencial de producción de biomasa, y una industrial (látex).



Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

Figura 45. Ubicación geográfica del ASA

Una vez hecha esta selección, en el campo experimental se establecieron seis parcelas correspondientes a cada especie:



Acacia mangium: de la familia Mimosaceae, presenta un ciclo vegetativo de tipo perenne. Es originaria de Australia, Papúa, Nueva Guinea e Indonesia.



Uso múltiple: puede emplearse como cerca viva y para proveer sombra, forraje, carbón, leña y madera para postes, así como para ebanistería (puertas y ventanas).



Ciclo de desarrollo: abarca un total de 1.723 días después de siembra (24 de septiembre de 2010), y el cultivo tuvo como cobertura asociada *Bracharia humidicola*.



Gmelina arborea: de la familia Verbenaceae presenta un ciclo vegetativo de tipo perenne. Su origen se remonta a la India, Tailandia, Camboya, Sumatra e Indonesia



Uso múltiple: puede emplearse como cerca viva, como melífera y para proveer forraje, leña, maderas para construcción y pulpa de papel.



Ciclo de desarrollo: 1.722 días después de siembra (25 de septiembre de 2010), y el cultivo tiene como cobertura asociada¹ *Bracharia humidicola*



Hevea brasiliensis: pertenece a la familia Euphorbiaceae y presenta un ciclo vegetativo de tipo perenne. Es originario de la cuenca hidrográfica del río Amazonas.



Uso múltiple: puede emplearse como cerca viva y en la producción de látex, así como para obtener madera laminada encolada, tableros de fibras, tableros de partículas y carpintería en general.



Ciclo de desarrollo: abarca un lapso de 1.722 días después de siembra, y al cultivo se le estableció una cobertura asociada de *Arachis pinto* (maní forrajero).



Eucalyptus pellita pertenece a la familia Myrtaceae y presenta un ciclo vegetativo de tipo perenne. Su origen se establece en Australia.



Uso múltiple: rompevientos y proveedor de postes para cerca, madera para construcción, leña y pulpa de papel, entre otros.



Ciclo de desarrollo: se reporta un periodo de crecimiento de 1.725 días después de siembra, y la cobertura asociada fue pasto *Bracharia humidicola*.



Anadenanthera peregrina es un cultivo de ciclo vegetativo tipo perenne perteneciente a la familia Mimosaceae. Es originario del Caribe y América del Sur.



Uso múltiple: desde rompevientos hasta para obtener postes para cerca, madera para construcción, leña, vigas, plataformas y pisos. Como especie dendroenergética, es muy apreciada en los llanos orientales y está muy ligada a la gastronomía de la región.



Ciclo de desarrollo: es de 1.724 días después de siembra, y el cultivo tuvo como cobertura asociada pastura de *Bracharia humidicola*.



Pinus caribaea var. Caribaea: pertenece a la familia Pinaceae y su ciclo vegetativo es del tipo perenne. Su origen es ubicado en Centro América y Cuba.



Uso múltiple: puede emplearse como rompevientos y para estabilizar suelos degradados, así como para extraer postes para cerca y madera para construcción, leña, tableros de fibras y tableros de partículas.



Ciclo de desarrollo: abarca un tiempo de 1.667 días después de siembra, y el cultivo tuvo como cobertura asociada pastura de *Bracharia humidicola*.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales



Tabla 22. Cultivos forestales evaluados en el ASA

1. La cobertura asociada a los cultivos es importante para facilitar la penetración del agua al suelo y para evitar la erosión debida al tipo de riego establecido y a los caudales que inicialmente se manejaron antes de la vigencia de la norma legal que reglamentó el reúso de las aguas residuales.

Diseño experimental

Las unidades experimentales utilizadas en esta investigación abarcaron una hectárea de terreno. Cada unidad se dividió en tres subunidades iguales, y en cada una de estas se tomaron los muestreos correspondientes, de manera que se obtuvieran tres repeticiones de cada época de muestreo. El diseño experimental que se aplicó fue el de parcelas divididas en el tiempo (Correa-Londoño, 2004; Martínez-Becerra y Martínez-Rueda, 1997), y para el tratamiento estadístico se empleó un paquete SAS®, el software JMP® de SAS y algoritmo en ambiente Excel, al tiempo que se realizaron pruebas de comparación de medias por Tukey.

Sistema de riego

En el ASA se estableció un sistema de riego por gravedad superficial de melgas rectangulares, en el cual se aprovecha la pendiente del terreno para distribuir el agua y mojar la mayor cantidad de área posible. El caudal de diseño fue de 129 l.s⁻¹,

lo que permite una capacidad de manejar 70.000 barriles de agua por día.

Los componentes del sistema de riego fueron los siguientes:

- 1 Dos módulos o bloques de riego.
- 2 Un canal de riego principal y canales de riego secundario (los cuales distribuían el agua a cada parcela para su posterior aplicación) en cada módulo de riego.
- 3 Trinchos (conformados por paredes de cemento y tablas de plástico), ubicados sobre cada canal de riego secundario en función de las curvas de nivel. El objetivo de estas estructuras era dar la altura necesaria al agua para que esta ingresara por los sifones, los cuales tenían por su parte la función de direccionar el líquido dentro de las melgas ubicadas a lo largo de la línea de árboles.



Figura 46. Canal de riego principal para distribución de agua en las parcelas evaluadas en el ASA

Variables y frecuencia de monitoreo

Se contemplaron dos componentes de evaluación con interés agronómico para todas las áreas de monitoreo: uno de suelo y otro forestal. El primero incluyó el muestreo y análisis de características químicas, físicas, microbiológicas y ambientales para cada parcela, mientras que para el segundo se establecieron parcelas permanentes de monitoreo donde se muestreó la altura total del árbol y el diámetro a la altura del pecho (DAP=1,30 m), información con base en la cual se estimaron indirectamente el volumen de madera, la biomasa y la captura de carbono por hectárea para cada especie. Asimismo, se determinó tanto el incremento corriente anual (ICA) como el incremento medio anual (IMA) para algunas de las variables estudiadas.

La frecuencia de monitoreo se estableció de conformidad con la dinámica de la variable que se pretendía a medir. Así, las del componente suelo se evaluaron una vez cada seis meses, de manera que una fecha correspondiera a la época húmeda o de alta presencia de lluvias, y la otra, a la época seca o de falta de lluvias. Por otro lado, las del componente forestal se evaluaron inicialmente de manera mensual durante el primer año de desarrollo, y posteriormente se realizaron mediciones cada seis meses hasta la finalización del tiempo de evaluación.

La calidad del agua de riego, por su parte, se monitoreó semanalmente con análisis de lectura rápida como pH, temperatura, salinidad, conductividad y resistividad. Trimestralmente, Ecope-trol, a través del ICP, realizó monitoreos exhaustivos de calidad a estas aguas.

Metodologías de medición

1 Diámetro y altura total

Se tomó la altura total a cada árbol ubicado dentro de la zona de muestreo en cada parcela utilizando una pértiga o hipsómetro Vértex Láser. Posteriormente, con el total de las mediciones registradas se estimó la altura total promedio de cada especie forestal correspondiente a cada fecha de monitoreo.

De manera conjunta, los diámetros se midieron con cinta diamétrica, ubicándola a los 1,30 m de altura en el caso de árboles que superaran los 2 m, mientras que para árboles más pequeños se estableció la medición a la mitad de la altura total del árbol. Para el caso de las especies con bifurcación como el yopo, se tomó el diámetro de cada uno de ellos y se utilizó la fórmula de diámetro cuadrático medio (DCM), que es el área resultante de la suma de los troncos medios:

$$DCM = \sqrt{\sum_{i=1}^n DAP^2}$$



Figura 47. Medición del DAP en árboles de yopo bifurcados

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

2 Volumen de madera, biomasa y captura de carbono aéreo por hectárea

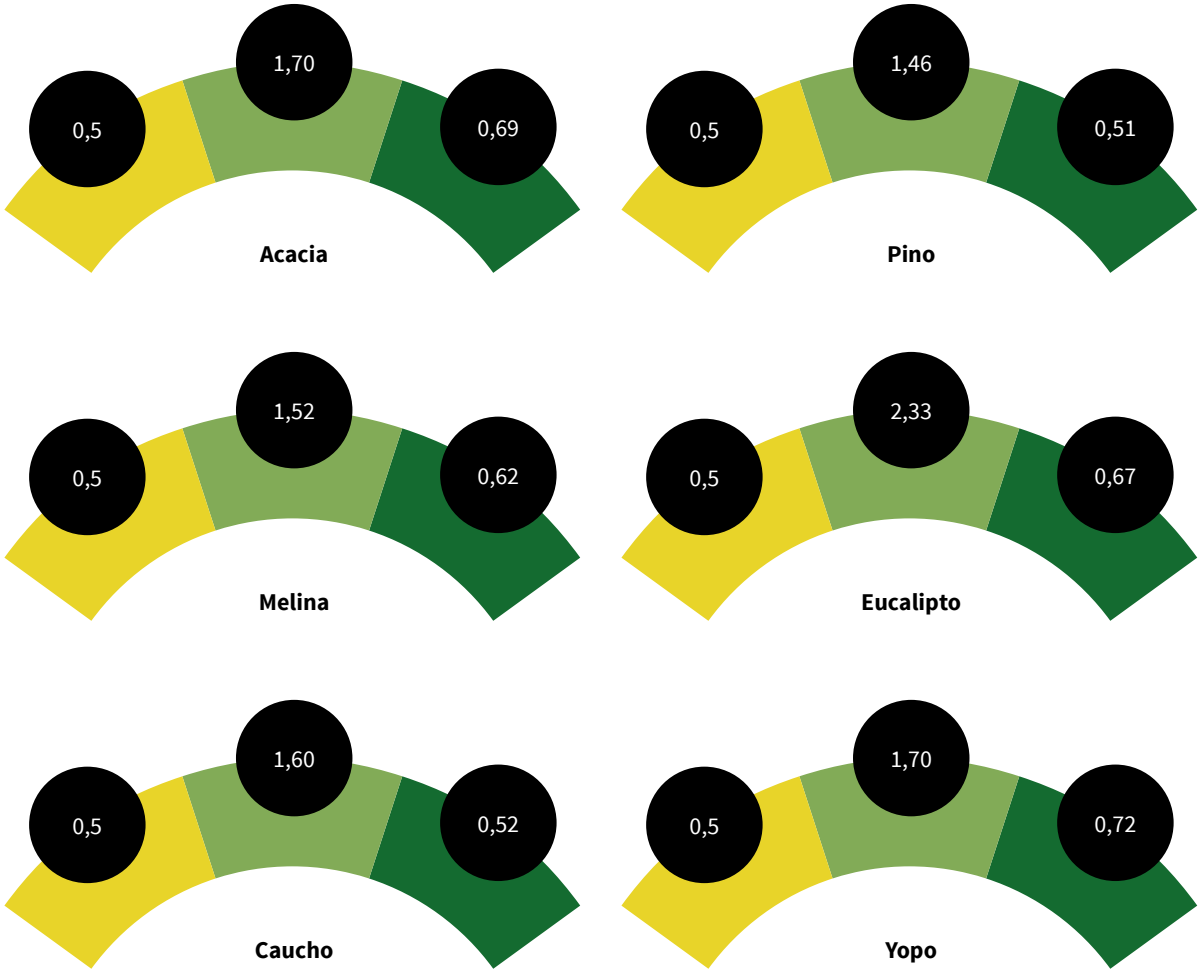
A partir de la medición del DAP y de la altura, y utilizando ecuaciones alométricas, fue posible determinar el volumen de madera, biomasa y captura de carbono aéreo. Además, se calcularon el ICA y el IMA para cada una de las variables: el primero corresponde al incremento producido por año, y el segundo enseña el promedio de crecimiento en un lapso para cada una de las especies. El volumen de madera de los árboles en pie por hectárea, para cada especie forestal, se calculó relacionando la altura total de árbol (HT), el área basal (AB) y el factor de forma (f) o de corrección de fuste por ahusamiento (figura 48):

Vol = AB x HT x f

Donde: **AB**: área basal. **HT**: altura total. **f**: factor de corrección.

- Factor de forma
- Factor de expansión de biomasa
- Densidad básica

Figura 48. Valores de factor de forma de copa, factor de expansión de la madera y densidad básica de la madera utilizados para estimar volumen y biomasa Fuente: FAO. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento.



Además,

AB = (π / 4) x DAP²

Para calcular la biomasa aérea (Bat) por especie, se relacionó el volumen de madera previamente estimado con el factor de expansión de la madera (FEB) (extraído de fuentes bibliográficas) y con la densidad básica de la madera o gravedad específica (Ge) (extraída de tablas elaboradas por el IPCC). La metodología utilizada para la estimación de los tres parámetros fue la indicada por la FAO² (figura 48). Así pues, se aplicó la fórmula:

Bat = Vol x FEB x Ge

Finalmente, para determinar la cantidad de carbono acumulada por especie, se multiplica el valor resultante de la biomasa por 0,5.

3 Calidad del agua

Los cultivos fueron regados con ATAEP provenientes de Castilla La Nueva y Acacias. En la tabla 23 se muestra que la calidad del agua cumple con todos los parámetros y la normatividad legal establecida para su uso en actividades agropecuarias.

4 Volúmenes de riego

Hace referencia tanto a la cantidad de agua a la entrada del sistema como a la aplicada a las parcelas agrícolas durante cada jornada de riego:

- Volúmenes de entrada:** Se estimaron gracias al sensor de caudal dispuesto en la zona de

entrada del sistema de riego, el cual realiza una medición de manera constante durante las 24 horas del día, de las cuales ocho correspondieron al riego del área agrícola.

- Volúmenes de aplicación:** Hace referencia al volumen de agua aplicada a cada una de las parcelas durante cada jornada de riego, la cual fue de ocho horas:

Vapli. = Q parcela x T avance

Donde: **Q parcela**: caudal que ingresa a la parcela durante la jornada de riego. **T avance**: tiempo que dura la aplicación del riego por parcela.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

Variable	Unidad de medida	ATAEP ASA	Fuente	Decreto 1594 / 1984	
				Artículo 38	Artículo 40
Aluminio	mg.l ⁻¹	< 3,508	ICP	NR	5,0
Arsénico	mg.l ⁻¹	< 0,00013	ICP	0,05	0,1
Berilio	mg.l ⁻¹	< 0,00042	ICP	NR	0,1
Cadmio	mg.l ⁻¹	< 0,000026	ICP	0,01	0,01
Zinc	mg.l ⁻¹	0,003756	ICP	1,5	2,0
Cobalto	mg.l ⁻¹	< 0,000322	ICP	NR	0,05
Cobre	mg.l ⁻¹	< 0,002102	ICP	1,0	0,2
Cromo	mg.l ⁻¹	0,000238	ICP	60,05	60,1
Hierro	mg.l ⁻¹	52,83	ICP	NR	5,0
Litio	mg.l ⁻¹	0,1975	ICP	NR	2,5
Manganeso	mg.l ⁻¹	0,10896	ICP	NR	0,2
Molibdeno	mg.l ⁻¹	< 0,000099	ICP	NR	0,01
Níquel	mg.l ⁻¹	0,000662	ICP	NR	0,2
Plomo	mg.l ⁻¹	< 0,000284	ICP	0,05	5,0
Selenio	mg.l ⁻¹	< 0,000860	ICP	0,01	0,02
Vandanio	mg.l ⁻¹	0,001115	ICP	NR	0,1
Boro	mg.l ⁻¹	0,1235	ICP	NR	0,3 - 4,0
Cloruros Cl-	mg.l ⁻¹	122	Antek	250	NR
Sodio Na	mg.l ⁻¹	41,2	Antek	NR	NR
Manganeso Mn	mg.l ⁻¹	0,092	Antek	NR	0,2
Bario Ba	mg.l ⁻¹	0,575	Antek	1,0	NR
Mercurio Hg	mg.l ⁻¹	< 0,002	Antek	0,002	NR
Hidrocarburos Totales	mg.l ⁻¹	2,4	Antek	NR	NR
Conductividad	µS.cm ⁻¹	601	Antek	NR	NR
RAS		3,33	Antek	NR	NR

*Para muestras ICP, el valor representa el promedio de cuatro años. Valores Antek indican promedios de dos muestreos.

Tabla 23. Parámetros de calidad del agua de riego utilizada en el ASA



Resultados y discusión

Componente agua

Con el objeto de supervisar la calidad del agua utilizada para el riego, semanalmente se realizaron muestreos para monitorear los siguientes parámetros de interés: conductividad eléctrica, temperatura, resistividad, pH y total de sólidos disueltos. La conductividad, en particular, permite evaluar la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica y es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente, cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio); asimismo, es generalmente útil como indicador de la calidad de aguas dulces, donde este parámetro, se encuentra primariamente determinado por la geología del área a través de la cual fluye el recurso (cuenca). Cada cuerpo de agua tiene un rango relativamente constante de conductividad que, una vez conocido, puede ser utilizado como línea de base para comparaciones con otras determinaciones puntuales. De manera que cambios significativos pueden dar cuenta de eventos puntuales de contaminación.

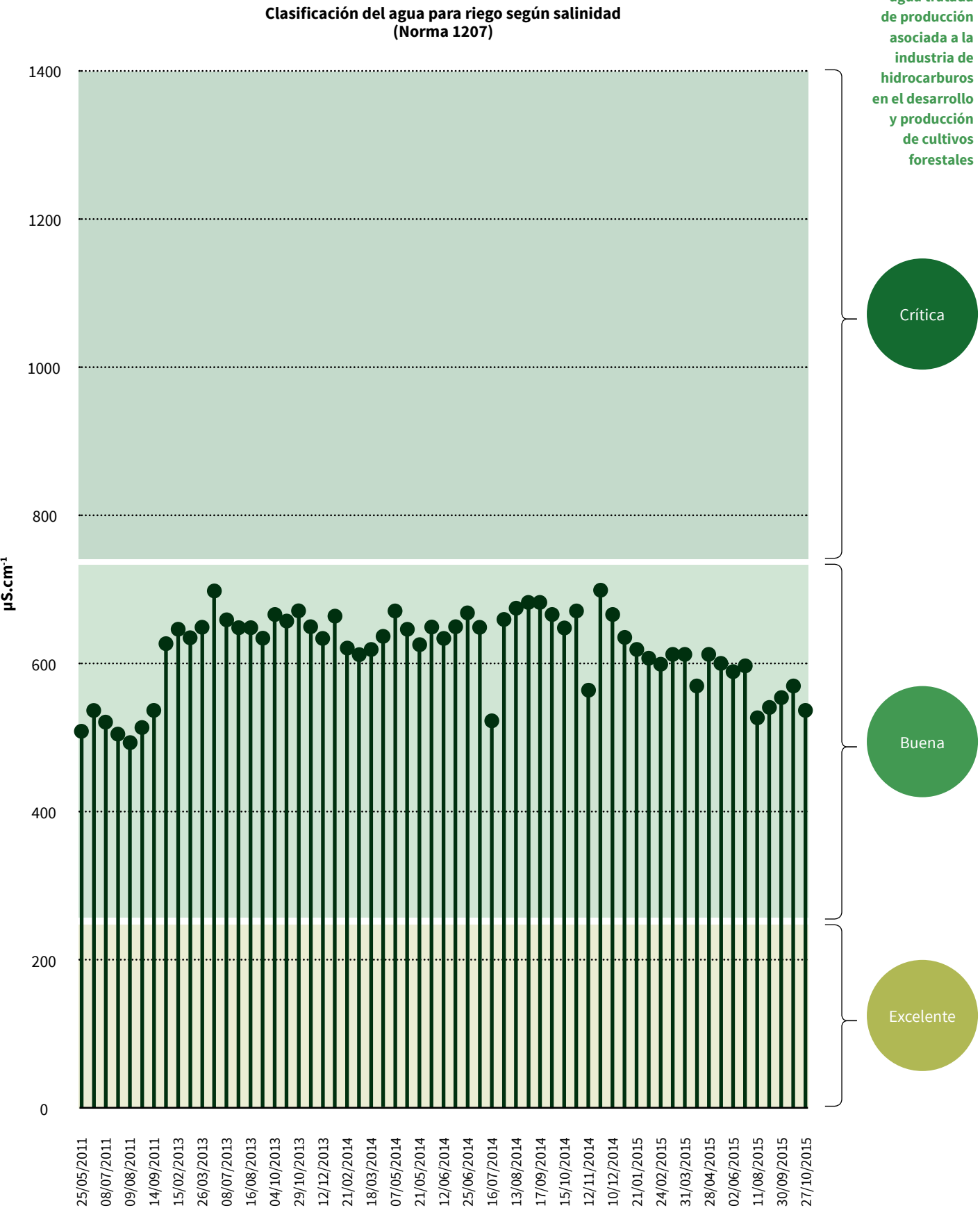
Descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de cloruros, nitratos, fosfatos u otros iones. Por otra parte, los hidrocarburos y compuestos orgánicos como aceites, fenol, alcohol, azúcar y otros compuestos no ionizables (aunque contaminantes) no modifican mayormente la conductividad.

Según la legislación colombiana (Resolución 1207 de 2014, sobre reúso de agua), se aceptan como aguas aptas para riego aquellas que presenten conductividad eléctrica menor a $1.500 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. En sistemas dulceacuícolas, conductividades que superen este nivel pueden indicar que el agua no es adecuada para el normal desarrollo de la vida de ciertas especies.

En la figura 49 se muestra el comportamiento temporal de la conductividad eléctrica, a 25°C de temperatura, de las ATAEP utilizadas para el riego de cultivos en el ASA. Como se observa, durante todo el tiempo en que se registró este parámetro, estas aguas se conservaron en el rango de “Buena” para riego según el criterio de salinidad (James, Hanks y Jurinak, 1982). Ayers y Westcot (1994) indican además que aguas con conductividad menor de $0,7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ no presentan ninguna restricción para su uso en riego. En la tabla 23, mencionada anteriormente, se presenta un resumen de los contenidos medios de los elementos presentes en las ATAEP utilizadas para el riego de árboles.



Figura 49. Comportamiento temporal de la calidad del agua de riego en el ASA



Componente suelo

En la tabla 24 se presentan los valores medios multitemporales de los elementos mayores del suelo registrados en cada parcela de investigación. Como se puede observar, si bien el valor medio inicial de pH del suelo era de 4,5, en todos los casos esta variable aumentó, sobre todo en el pino y en el caucho, y en menor proporción en acacia y yopo (el aumento del pH en suelos ácidos naturales permite aumentar la disponibilidad de los nutrientes por las plantas). Según la norma NOM-021-Semarnat-2000 de la República Mexicana (2002), se pasó de un suelo fuertemente ácido (<5) a uno moderadamente ácido (>5,1<6,5).

Las tierras sobre las que se dispuso el ensayo de coberturas forestales inicialmente estaban siendo usadas en un sistema de ganadería semiintensiva con pasturas de *Brachiaria*, y la materia orgánica inicial encontrada tenía un valor medio de 4,5%. Luego, con el establecimiento de los cultivos forestales, esta variable disminuyó, y actualmente se encuentran diferencias significativas entre los cultivos de yopo, acacia y eucalipto con valores que oscilan entre 2,30% y 2,86%.

Según la clasificación reportada por Rioja Molina (2002) para materia orgánica calculada con el método de Walkley-Black, los contenidos hallados en el ASA se

encuentran entre los niveles normal (2,0-2,5) y alto (2,6-3,5). La norma NOM-021-Semarnat-2000, por su parte, califica los valores entre 1,6-3,5% de materia orgánica como clase media en suelos no volcánicos.

El valor medio de calcio inicial fue de 0,53 cmol.kg⁻¹, y actualmente este valor oscila entre 1,86-1,54 cmol.kg⁻¹ en las diferentes parcelas, sin que se encuentren diferencias significativas entre ellas. El valor ideal de calcio para estos suelos, según Amézquita (2004), debe ser igual o superior a 1,5 cmol.kg⁻¹. La norma mexicana NOM-021-Semarnat-2000 califica como nivel muy bajo valores de Ca menores de 2 cmol.kg⁻¹, mientras que Rioja Molina (2002) consideran que el contenido de este elemento en el suelo es muy bajo entre 0-3,5 cmol.100 g⁻¹ de suelo.

En la parcela sembrada con pino, el contenido de magnesio en suelo resultó mayor, con diferencia significativa, respecto a los contenidos encontrados en las otras parcelas. El nivel de este elemento osciló entre 0,48-0,33 cmol.kg⁻¹, cuando el nivel medio registrado inicialmente en estos suelos había sido de 0,10 cmol.kg⁻¹ (la norma NOM-021-Semarnat-2000 califica como muy bajos valores de magnesio inferiores a 0,5 cmol.kg⁻¹).

El potasio registró un contenido medio de 0,09 cmol.kg⁻¹ inicialmente, antes de que se establecieran los

cultivos forestales. Actualmente, se encuentran valores que oscilan entre 0,08-0,18 cmol.kg⁻¹, con diferencias significativas en la parcela sembrada con el cultivo de yopo. Para Amézquita et al. (2004), un nivel de 0,15 cmol.kg⁻¹ sería el adecuado para este tipo de suelos (la norma NOM-021-Semarnat califica como muy bajos valores inferiores a 0,2 cmol.kg⁻¹).

El sodio no presentó diferencias significativas entre las parcelas evaluadas, con valores registrados entre 0,15-0,21 cmol.kg⁻¹. En este sentido, Rioja Molina (2002) y Moldenhauer (1999) indican que valores menores a 0,3 cmol.kg⁻¹ se consideran muy bajos.

Por su parte, la conductividad eléctrica registrada presentó diferencia significativa entre las parcelas de caucho y eucalipto, con valores que oscilaron entre 0,11-0,15 dS.m⁻¹. Rioja (2002) considera que valores menores de 0,30 dS.m⁻¹ tienen una influencia inapreciable sobre los cultivos, todos los cuales soportan este nivel de salinidad. La norma NOM-021-Semarnat, a su vez, interpreta que la conductividad eléctrica menor de 1 dS.m⁻¹ tiene efectos despreciables de salinidad.

Los elementos menores desempeñan una importante función en la nutrición y producción de cultivos debido a su participación y su acción en muchos de los principales procesos fisiológicos de las plantas. Al respecto,

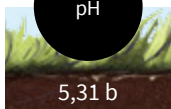
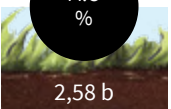
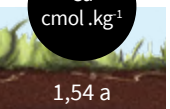
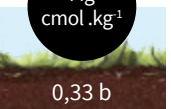
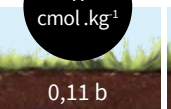
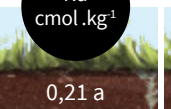
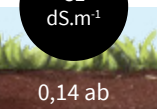
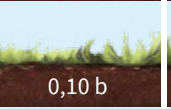
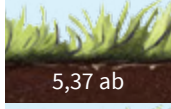
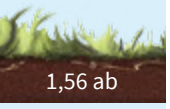
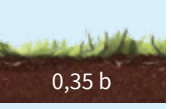
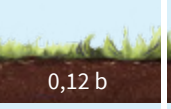
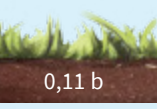
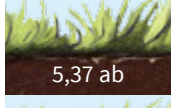
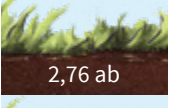
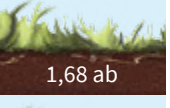
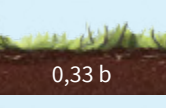
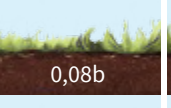
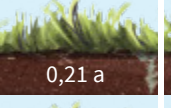
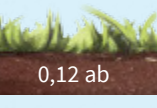
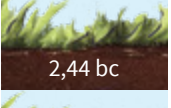
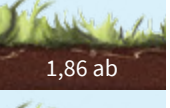
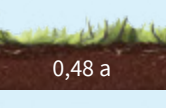
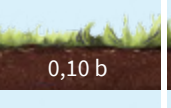
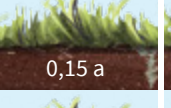
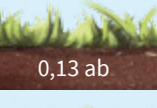
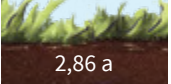
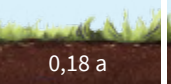
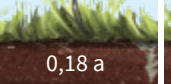
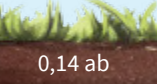
Guerrero (2009) comenta que, a pesar de la poca información disponible, los resultados obtenidos en investigaciones locales o regionales por diferentes entidades e instituciones, sumados a algunos principios básicos universales y elementales ampliamente conocidos en suelos, permiten establecer algunas conclusiones preliminares sobre el comportamiento de los microelementos en distintos suelos ácidos de la Orinoquia. Estos se han caracterizado así por un predominio de alta precipitación, pH bajos y extrema acidez, con deficiencias de materia orgánica y, probablemente, toxicidad de algunos elementos, cuya solubilidad aumenta en forma reducida, o deficiencia de formas oxidadas de algunos elementos que no son frecuentes en pH bajos.

Según los contenidos de los elementos menores estudiados (tabla 25) en las diferentes parcelas, y relacionando estos registros con las tablas de clasificación reportadas por varios autores (Catie, Colinagro, Díaz y Hunter), se encontró que el hierro se encuentra en niveles altos (entre 70,3-83,2 ppm), y el cobre, en nivel medio (0,8-1,2 ppm), así como el manganeso (5,6-12,3 ppm), mientras que el zinc y el boro presentaron niveles bajos (entre 0,5-1,4 ppm y entre 0,1-0,2 respectivamente). Entretanto, según la NOM-021-Semarnat (2002), el hierro (>4,5 mg.kg⁻¹), el cobre (>0,2), el zinc (>1,0) y el manganeso (>1) se encuentran en niveles adecuados en el suelo.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales



Tabla 24. Valores medios multitemporales de los elementos mayores del suelo

Química de suelos							
							
Acacia	 5,31 b	 2,58 b	 1,54 a	 0,33 b	 0,11 b	 0,21 a	 0,14 ab
Caucho	 5,50 a	 2,40 bc	 1,74 ab	 0,35 b	 0,10 b	 0,20 a	 0,15 a
Eucalipto	 5,37 ab	 2,30 c	 1,56 ab	 0,35 b	 0,12 b	 0,18 a	 0,11 b
Melina	 5,37 ab	 2,76 ab	 1,68 ab	 0,33 b	 0,08b	 0,21 a	 0,12 ab
Pino	 5,61 a	 2,44 bc	 1,86 ab	 0,48 a	 0,10 b	 0,15 a	 0,13 ab
Yopo	 5,24 b	 2,86 a	 1,66 ab	 0,39 b	 0,18 a	 0,18 a	 0,14 ab

*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Química de suelos

Fe mg.kg ⁻¹	Cu mg.kg ⁻¹	Mn mg.kg ⁻¹	Zn mg.kg ⁻¹	B mg.kg ⁻¹
70,3	0,8	5,6	0,7	0,2
83,2	1,0	12,3	0,6	0,1
70,8	1,1	10,8	0,5	0,2
72,9	1,2	10,7	1,4	0,1
77,8	0,8	11,3	0,6	0,2
74,8	1,1	11,4	0,6	0,2



Tabla 25. Valores medios multitemporales de los elementos menores del suelo

En cuanto a las propiedades físicas del suelo, la densidad aparente, la porosidad total y conductividad hidráulica no presentaron diferencias significativas entre las diferentes parcelas. Por otra parte, la estabilidad estructural, concepto que introdujo Van Bavel (1949), expresado en términos de diámetro medio ponderado (mm), presentó diferencias entre las parcelas, siendo las de mejor agregación las de melina, pino y eucalipto, y la de menor agregación, la de acacia (tabla 26). Montenegro (2003) manifiesta que valores de DPM entre 1,5-3,0 mm se interpretan como suelos moderadamente estables,

y valores entre 3,0-5,0 mm corresponden a suelos estables. En la tabla 26 se presenta además el análisis estadístico multitemporal realizado a los parámetros microbiológicos del suelo en cada una de las parcelas experimentales. Como se observa, no se dieron diferencias significativas en este parámetro y, con relación a los valores de poblaciones propuestos por Osorio (2012), los contenidos de bacterias y de hongos en el suelo hallados se encuentran en rangos aceptables, mientras que las unidades formadoras de colonias de actinomicetos se encuentran en niveles bajos.

Otro parámetro analizado en el marco de la presente investigación fueron los hidrocarburos totales de petróleo (TPH), los cuales resultan útiles para evaluar sitios contaminados por hidrocarburos. Ahora bien, debido al gran número de hidrocarburos involucrados en esta clase de contaminación, generalmente no es práctico medir cada uno de ellos; por ello se recurre a medir la cantidad total del conjunto de hidrocarburos que se encuentran en una muestra de suelo, agua o aire. Así, la cantidad de TPH que se encuentra en dicha muestra sirve como indicador general del tipo de afectación que existe en el sitio del cual fue tomada.

Sin embargo, la cantidad de TPH que se mide suministra poca información acerca de cómo hidrocarburos de petróleo específicos pueden afectar a la gente, a los animales y a las plantas. En la tabla 26 se muestran los resultados obtenidos de la valoración multitemporal de los TPH realizada en las diferentes parcelas experimentales. De este modo se puede observar que los niveles obtenidos en la valoración de los hidrocarburos totales en las parcelas experimentales, en todos los casos, se encuentran por debajo del rango detectable (<0,00625% por el método de extracción por ultrasonido/infrarrojo del laboratorio Antek S. A.).

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

Acacia		 Da (g.cm⁻³) 1,53 a	 Poros totales (%) 41,29 a	 Estabilidad estructural (mm) 1,91 c	 Conductividad hidráulica K (cm.h) 1,18 a	 Bacterias 15,48 a	 Hongos 8,77 a	 Actinomicetos 9,78 a	 Hidrocarburos totales (%) < 0,00625
Caucho		 Da (g.cm⁻³) 1,50 a	 Poros totales (%) 42,95 a	 Estabilidad estructural (mm) 2,72 bc	 Conductividad hidráulica K (cm.h) 0,76 a	 Bacterias 15,15 a	 Hongos 9,34 a	 Actinomicetos 10,56 a	 Hidrocarburos totales (%) < 0,00625
Eucalipto		 Da (g.cm⁻³) 1,56 a	 Poros totales (%) 40,43 a	 Estabilidad estructural (mm) 2,92 ab	 Conductividad hidráulica K (cm.h) 0,82 a	 Bacterias 15,25 a	 Hongos 8,56 a	 Actinomicetos 10,34 a	 Hidrocarburos totales (%) < 0,00625
Melina		 Da (g.cm⁻³) 1,50 a	 Poros totales (%) 43,38 a	 Estabilidad estructural (mm) 3,75 a	 Conductividad hidráulica K (cm.h) 0,89 a	 Bacterias 15,32 a	 Hongos 8,45 a	 Actinomicetos 9,31 a	 Hidrocarburos totales (%) < 0,00625
Pino		 Da (g.cm⁻³) 1,54 a	 Poros totales (%) 41,62 a	 Estabilidad estructural (mm) 3,33 ab	 Conductividad hidráulica K (cm.h) 1,13 a	 Bacterias 15,92 a	 Hongos 8,87 a	 Actinomicetos 8,94 a	 Hidrocarburos totales (%) < 0,00625
Yopo		 Da (g.cm⁻³) 1,50 a	 Poros totales (%) 42,81 a	 Estabilidad estructural (mm) 2,83 b	 Conductividad hidráulica K (cm.h) 1,60 a	 Bacterias 15,37 a	 Hongos 9,05 a	 Actinomicetos 9,11 a	 Hidrocarburos totales (%) < 0,00625

Tabla 26. Valores medios multitemporales de los parámetros físicos, los parámetros microbiológicos y las mediciones de TPH en suelo

*Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

↓
Figura 50.
Límites permisibles en suelos de sustancias peligrosas según la norma canadiense (2007)

Así las cosas, los valores encontrados en todos los casos son inferiores a los estipulados por la norma NOM-138-Semarnat/SSA1-2012, que se tomó como criterio de comparación (valor crítico de 1.200 mg.kg⁻¹ fracción de hidrocarburos media).

Los metales pesados —y en general los elementos traza— están presentes en relativamente bajas concentraciones (<mg.kg⁻¹) en la corteza terrestre, los suelos y las plantas. Ahora bien, cuando dichas concentraciones se vuelven nocivas en los suelos (anomalías), se trata de una degradación especial denominada contaminación. Con esto en mente, en la presente investigación se compararon los niveles permisibles de metales pesados en suelos respecto a lo establecido por la Norma Canadiense para la Protección del Medio Ambiente y la Protección Humana (Canadian Soil Quality Guidelines for the Pro-

tection of Environmental and Human Health). En la figura 50 se presenta un resumen de esta guía con los indicadores seleccionados para este estudio.

La figura 51, por otra parte, refleja el análisis estadístico multitemporal realizado a los metales pesados encontrados en las diferentes parcelas experimentales. En este caso no se observaron diferencias significativas entre parcelas para el bario, el plomo y el cadmio, mientras que en la parcela de pino se halló una diferencia significativa en el metal cromo.

Al comparar los valores mostrados en la figura 51 con los de la guía canadiense de la figura 50, se observa claramente que los niveles máximos permisibles de las sustancias catalogadas peligrosas se encuentran muy por encima de los valores reales encontrados en esta investigación.

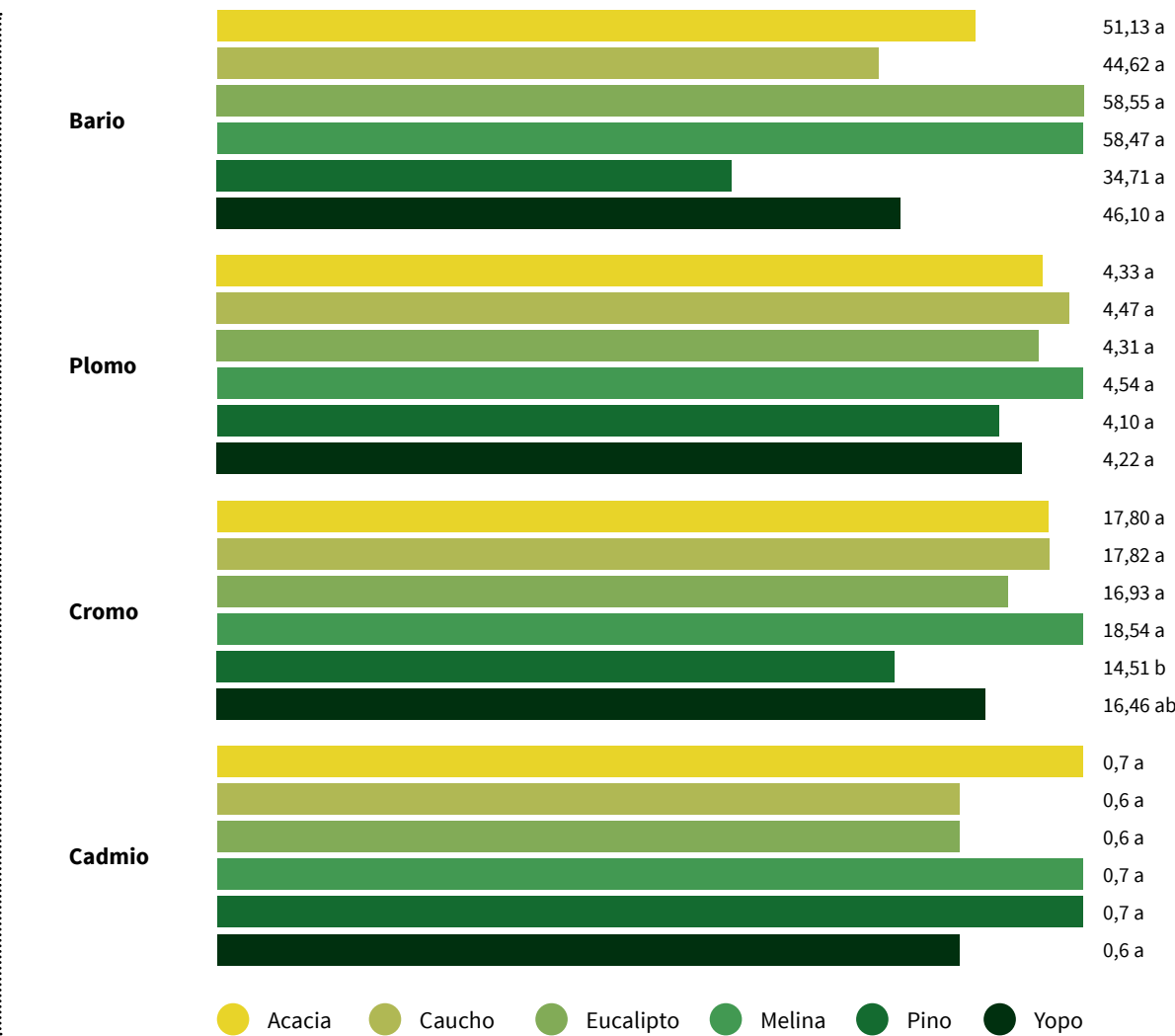
760
mg.kg⁻¹
Año de revisión
2003

70
mg.kg⁻¹
Año de revisión
1999

64
mg.kg⁻¹
Año de revisión
1997

1,4
mg.kg⁻¹
Año de revisión
1999

↗ **Figura 51.** Valores medios multitemporales de los metales pesados del suelo monitoreados (mg.kg⁻¹)



*Letras distintas dentro de cada elemento corresponden a diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0,05).

Componente cultivos

Requerimientos hídricos de los cultivos de acuerdo a la especie

Para determinar la evapotranspiración en este componente, se utilizó el método de Penman-Monteith, tomando como base el cálculo del balance de energía y del balance aerodinámico de cada una de las especies establecidas en el ASA siguiendo la metodología descrita por la FAO (Manual 56) y estableciendo el coeficiente del cultivo Kc en cada etapa de desarrollo. Así pues, con los valores de Kc correspondientes a cada etapa de desarrollo del cultivo, se procedió a calcular los valores de evapotranspiración del cultivo para estas mismas épocas.

En la tabla 27, donde se presenta un resumen de los Kc calculados para cada especie evaluada, se puede observar que el yopo presenta el mayor valor de este coeficiente; de hecho, este es el único cultivo que durante toda la investigación ha venido en aumento, lo cual da a entender que aún se encuentra en estado de máximo crecimiento, mientras los otros cultivos ya han superado esta etapa. En la tabla 27 se observa además la dotación de agua de riego empleada durante la investigación para cada cultivo. Aquel al que se le dio un mayor suministro de agua fue el de yopo, mientras que al que menos se le aportó fue al caucho. Claramente, esta tabla refleja, para el año 2015, los efectos de la aplicación de la norma legal 1207 de 2014 en las dotaciones de agua empleadas.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

↓ **Tabla 27.** Valores de Kc calculados y de lámina del riego (mm) suministrado

2013 2014 2015

Acacia	Melina	Caucho	Pino	Eucalipto	Yopo
1 Kc calculado 0,75 0,70 Lámina del riego 2.343 mm	1 Kc calculado 0,73 0,71 Lámina del riego 1.896 mm	1 Kc calculado 0,68 0,75 Lámina del riego 1.019 mm	1 Kc calculado 0,61 0,68 Lámina del riego 2.641 mm	1 Kc calculado 0,75 0,72 Lámina del riego 2.555 mm	1 Kc calculado 0,75 0,79 Lámina del riego 3.091 mm
2 Kc calculado 0,70 0,65 Lámina del riego 2.800 mm	2 Kc calculado 0,71 0,66 Lámina del riego 1.899 mm	2 Kc calculado 0,75 0,62 Lámina del riego 1.199 mm	2 Kc calculado 0,68 0,59 Lámina del riego 2.669 mm	2 Kc calculado 0,72 0,67 Lámina del riego 3.278 mm	2 Kc calculado 0,79 0,82 Lámina del riego 5.407 mm
3 Kc calculado 0,65 0,60 Lámina del riego 697 mm	3 Kc calculado 0,66 0,64 Lámina del riego 310 mm	3 Kc calculado 0,62 0,51 Lámina del riego 294 mm	3 Kc calculado 0,59 0,51 Lámina del riego 685 mm	3 Kc calculado 0,67 0,65 Lámina del riego 539 mm	3 Kc calculado 0,82 0,83 Lámina del riego 927 mm
Lámina del riego total (mm) 5.840	Lámina del riego total (mm) 4.105	Lámina del riego total (mm) 2.512	Lámina del riego total (mm) 5.995	Lámina del riego total (mm) 6.372	Lámina del riego total (mm) 9.425

*Kc: coeficiente de cultivo

A continuación se resume el manejo agronómico realizado a las parcelas experimentales, que fue el mismo para todos los casos:

- 1

Enmiendas, correctivos y fertilización inicial: Se aplicaron correctivos para pH (cal dolomita y roca fosfórica), y se hizo una fertilización inicial para aporte de nutrientes mayores y menores (urea, cloruro de potasio, DAP, borocinco y sulfocobre).
- 2

Fertilización anual: Se realizó fertilización edáfica con fuentes de rápida y moderada asimilación para aportar elementos mayores y menores. La dosis aplicada por planta durante
- 3

Podas y plateos: Se implementaron podas de crecimiento para incentivar desarrollo y podas de mantenimiento para evitar resquebrajamiento de los árboles. Los plateos se realizaron previo a cada jornada de fertilización con el objetivo de disminuir la competencia por nutrientes de la cobertura asociada a la parcela.
- 4

Pesticidas: Se aplicó insecticida (clorpirifos al 2,5%) para control de hormigueros de manera puntual con insufladora

los cuatro años fue la misma (aplicaciones de urea, cloruro de potasio, DAP, sulphomag, sulfozinc y sulfocobre).

Altura	 19,08 m	 13,60 m	 19,81 m
DAP	 0,20 m	 0,11 m	 0,18 m
Volumen de madera	 198,24 (m³.ha⁻¹)	 35,32 (m³.ha⁻¹)	 182,85 (m³.ha⁻¹)
Biomasa	 239,2 (t.ha⁻¹)	 29,3(t.ha⁻¹)	 284,5 (t.ha⁻¹)
Carbono	 119,6 (t.ha⁻¹)	 14,7(t.ha⁻¹)	 142,3 (t.ha⁻¹)
			
	Acacia	Caucho	Eucalipto

Medición de altura total y diámetro a la altura del pecho

El crecimiento es el aumento gradual en el tamaño de un árbol en un periodo considerado de tiempo. El ritmo de este proceso está determinado por factores internos (genéticos) y externos (sitio), así como por el tiempo. Para los 4,5 años de muestreo de la presente investigación, se obtuvieron los resultados que se observan en la figura 52.

Como se puede observar, las especies que alcanzaron mayor altura son las reconocidas

foráneas de rápido crecimiento. Tal es el caso del eucalipto *pellita*, que obtuvo un crecimiento longitudinal de 19,81 m, seguido por la melina (19,74 m) y la acacia (19,08 m). El segundo grupo está conformado por las nativas de lento crecimiento, como caucho (13,60 m) y yopo (12,02 m). Finalmente, la especie con menor desarrollo fue el pino, con 8,59 m.

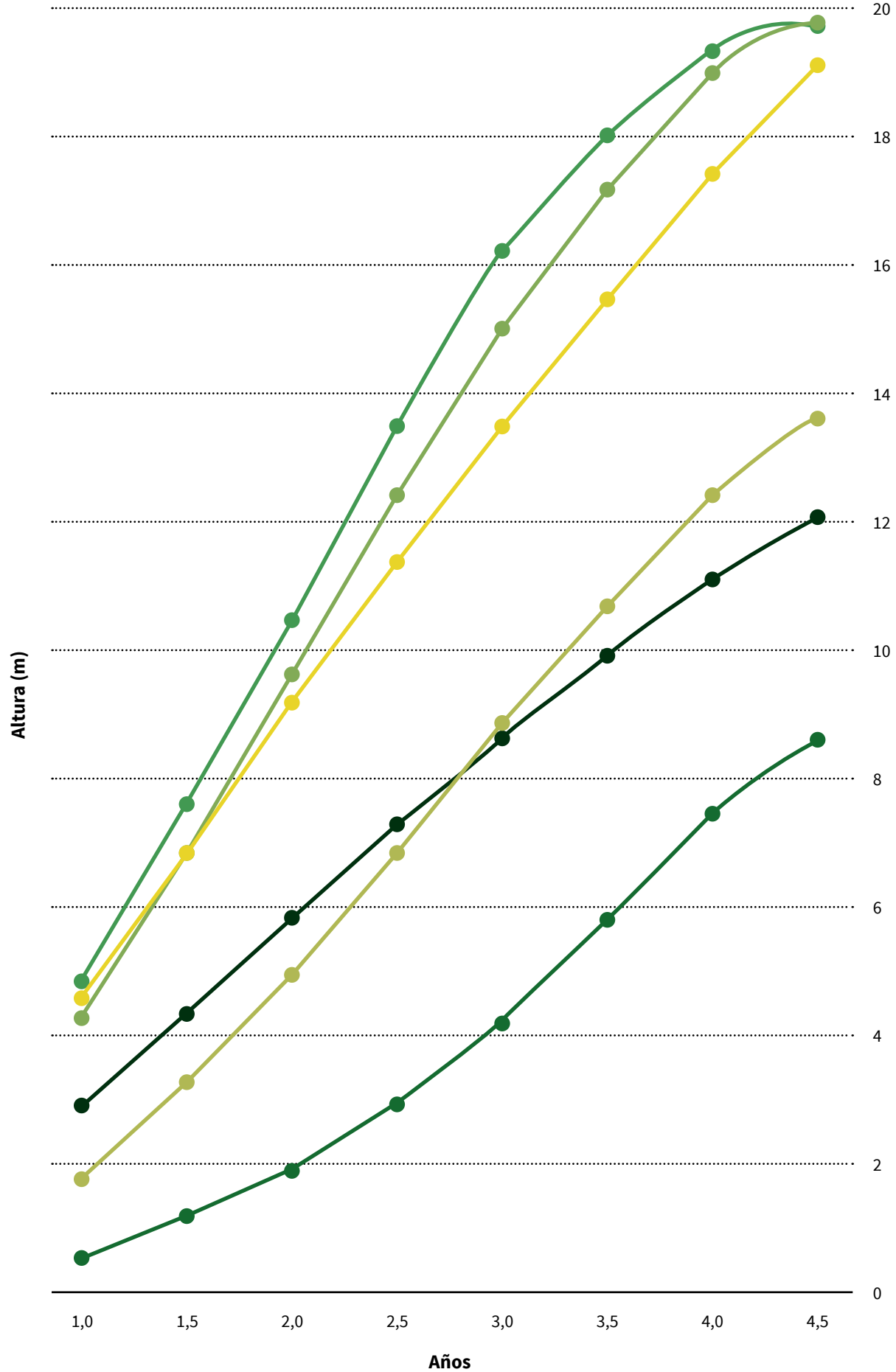
En la tabla 28 se presentan los valores de altura total (m) y DAP (m) para las especies evaluadas a los 4,5 años, además de los resultados de volumen de madera, biomasa y carbono, los cuales serán discutidos más adelante.

 19,74 m	 8,59 m	 12,02 m
 0,19 m	 0,14 m	 0,17 m
 212,20 (m³.ha⁻¹)	 33,51 (m³.ha⁻¹)	 69,56 (m³.ha⁻¹)
 199,3 (t.ha⁻¹)	 24,9 (t.ha⁻¹)	 85,3 (t.ha⁻¹)
 99,6 (t.ha⁻¹)	 12,5 (t.ha⁻¹)	 42,7 (t.ha⁻¹)
		
Melina	Pino	Yopo

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

Tabla 28. Resultados de valores dasométricos de las especies evaluadas a la edad de 4,5 años después de siembra

- Acacia
- Caucho
- Eucalipto
- Melina
- Pino
- Yopo



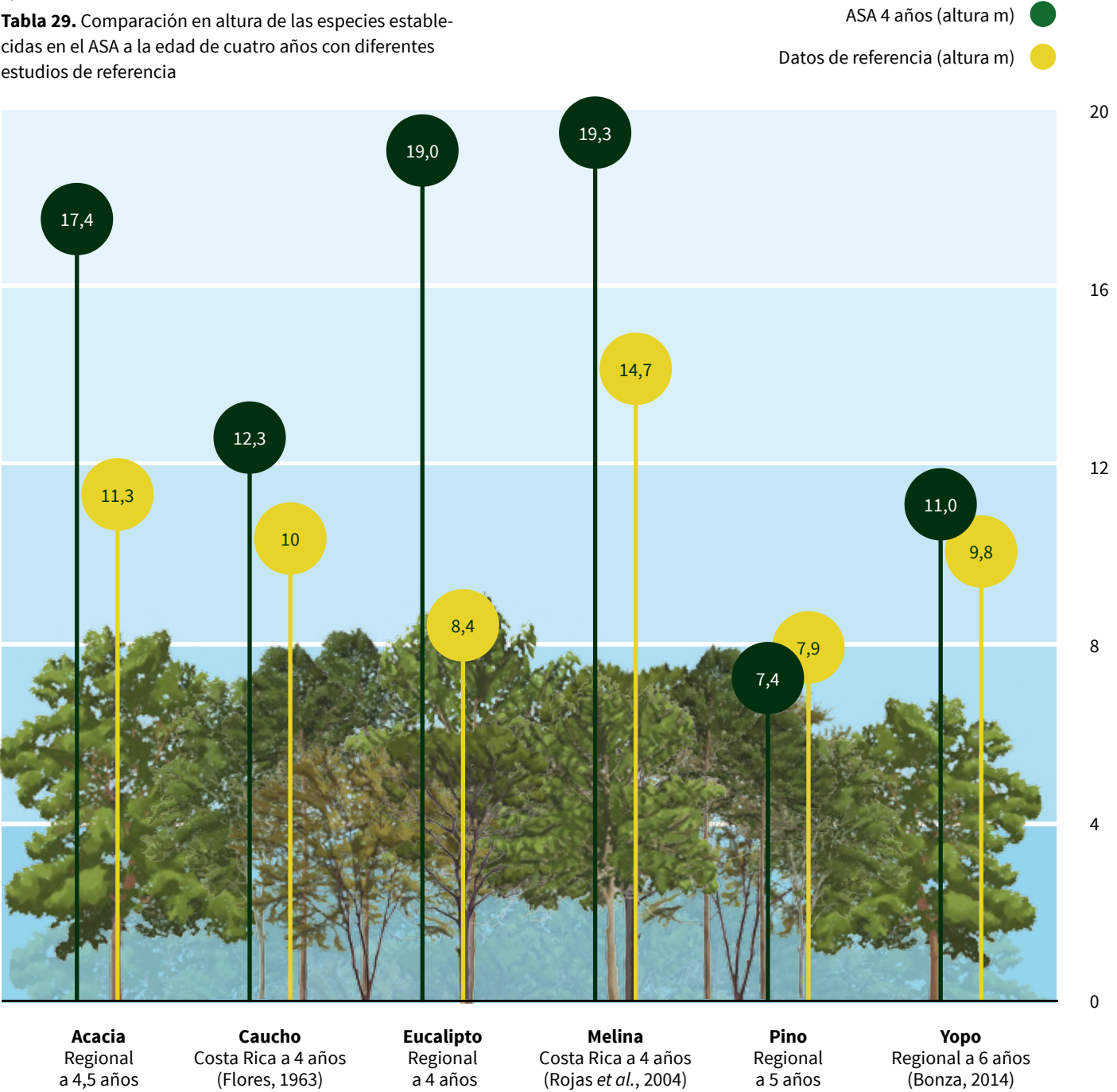
→ **Figura 52.** Comportamiento temporal del crecimiento anual de los árboles en altura de las especies evaluadas en el ASA

Los árboles de lento desarrollo han mantenido una tasa anual de crecimiento sostenida en el tiempo, lo cual indica que se mantienen en la etapa juvenil de desarrollo, mientras que los de crecimiento rápido han disminuido esta tasa, lo que sugiere que están llegando a una etapa de plenitud de desarrollo.

Por otra parte, en la tabla 29 se presenta un comparativo del crecimiento en altura y del DAP de las especies evaluadas en el ASA a los cuatro años, en suelos clase VI del piedemonte llanero, con algunos estudios de referencia encontrados de otros investi-



Tabla 29. Comparación en altura de las especies establecidas en el ASA a la edad de cuatro años con diferentes estudios de referencia



gadores. Así, para acacia, eucalipto y pino se referenció el estudio realizado por CONIF (López, 2013); para melina, se consideró el *Manual para productores de melina* de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto tecnológico de Costa Rica (Rojas *et al.*, 2004); en el caso del caucho, se tomó como referencia información del IICA (Flores, 1963), y para comparar el crecimiento y desarrollo del yopo se revisó el trabajo realizado por Bonza (2014). Comparativamente, todas las especies establecidas en el ASA, incluyendo el pino, presentaron alturas mayores que las reportadas por los diferentes autores consultados.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

En la figura 53 se relacionan los diámetros alcanzados por las diferentes especies establecidas en el ASA, donde se encontraron incrementos superiores de este parámetro en cinco de las seis especies evaluadas. Sin embargo, es importante notar que los cultivos de las referencias de Costa Rica están establecidos en suelos volcánicos de mayor fertilidad que los del ASA (oxisoles) y con mejoramiento genético más desarrollado.

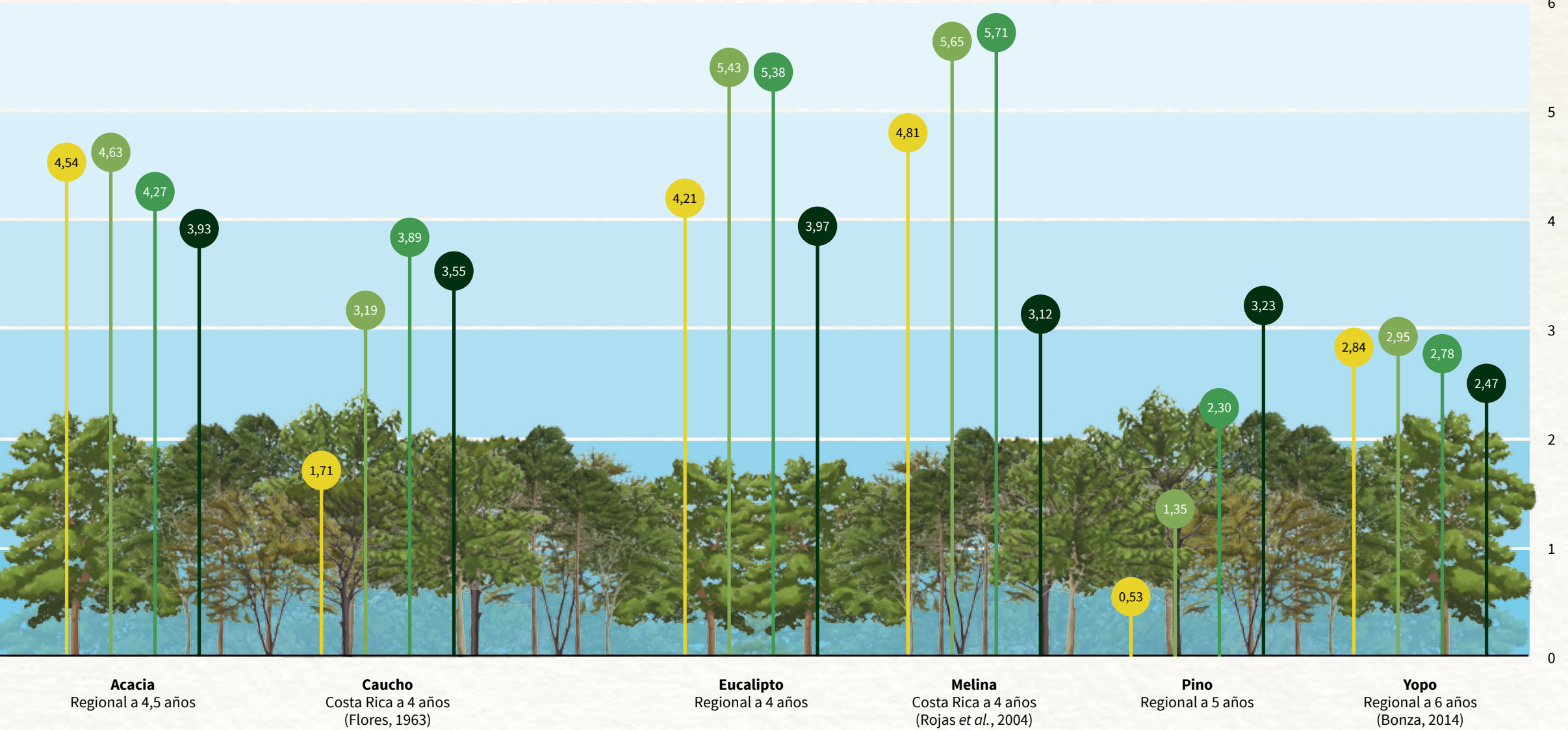
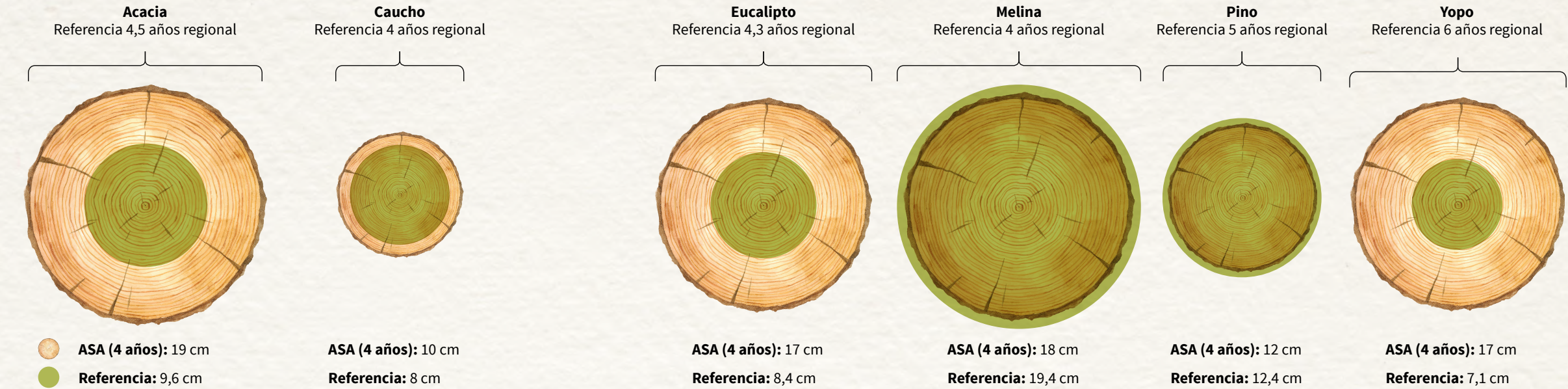
Con relación a los DAP, se encontró que la melina referenciada en el *Manual para productores de melina* (2004), a una edad de cuatro años, presentó un mayor diámetro que la establecida en el ASA (19,4 cm vs. 18,0 cm). En cambio, en las otras especies consideradas en el presente estudio se encontraron valores superiores que van desde el 9,9 cm para el yopo hasta 2 cm para el caucho, a pesar de que los árboles establecidos en el ASA son más jóvenes (cuatro años).

En la tabla 30 se presentan el ICA y el IMA para la altura y para el DAP de las especies establecidas en el ASA en un periodo de monitoreo de cuatro años (el incremento consiste en la diferencia de tamaño entre el comienzo y el final de un periodo de crecimiento). El IMA y el ICA son valores que están directamente relacionados con los resultados de las variables sujetas al análisis. Así, en la tabla 30 se refleja un IMA de 4,82 m de altura en melina, que fue la especie con mayor desarrollo longitudinal, y de 4,75 cm en la acacia, superando a las demás especies en crecimiento perimetral del fuste.

- Año 1
- Año 2
- Año 3
- Año 4

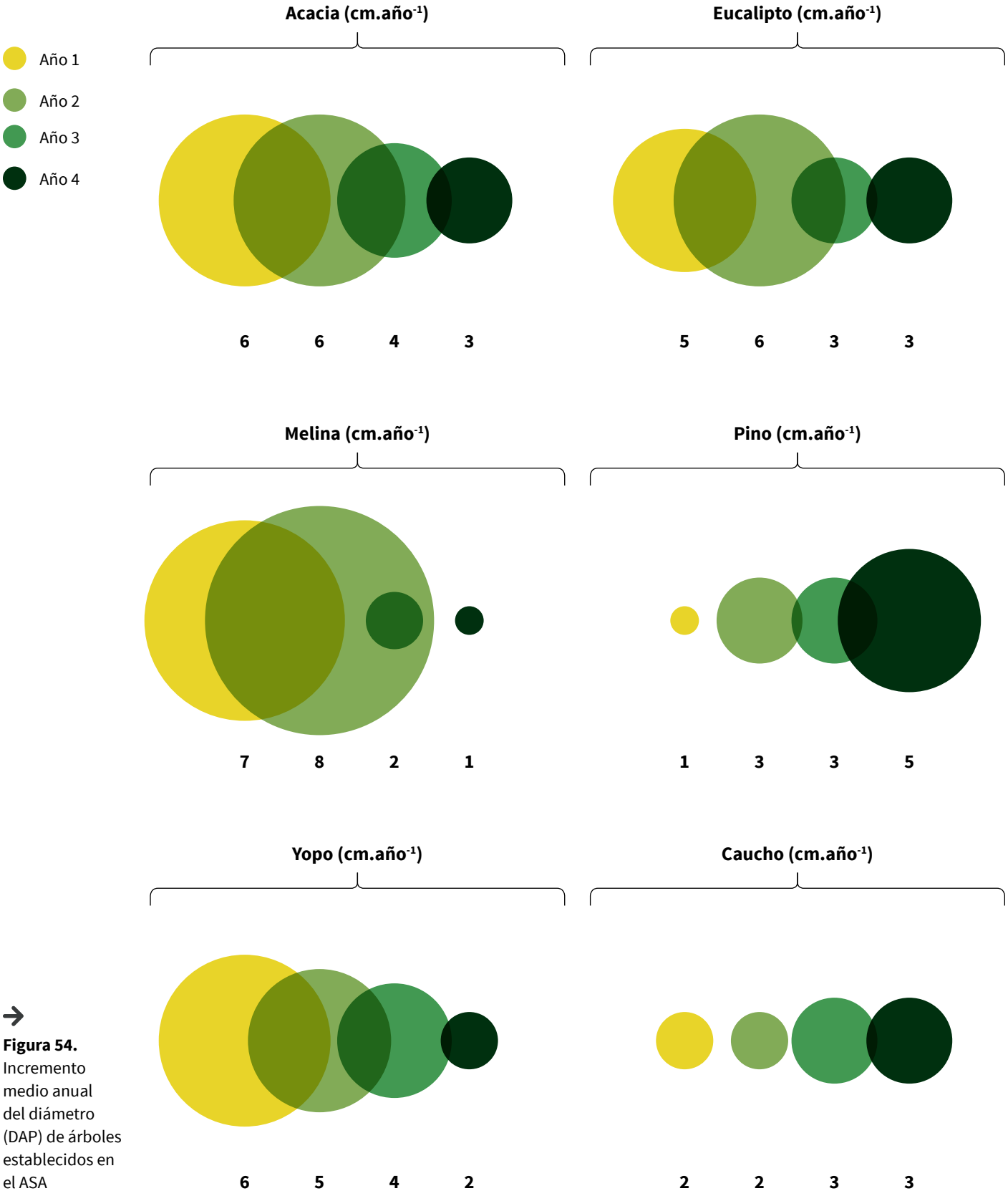
→ **Tabla 30.** Incremento medio anual (IMA) de la altura de árboles establecidos en el ASA (m)

↓ **Figura 53.** Comparación en diámetro (DAP) de las especies establecidas en el ASA con algunos estudios de referencia



Con relación a los IMA del DAP, se observó que cuatro especies en el ASA, esto es, la acacia, la melina, el yopo y el eucalipto, presentaron incrementos superiores a 4 cm por año en la etapa de

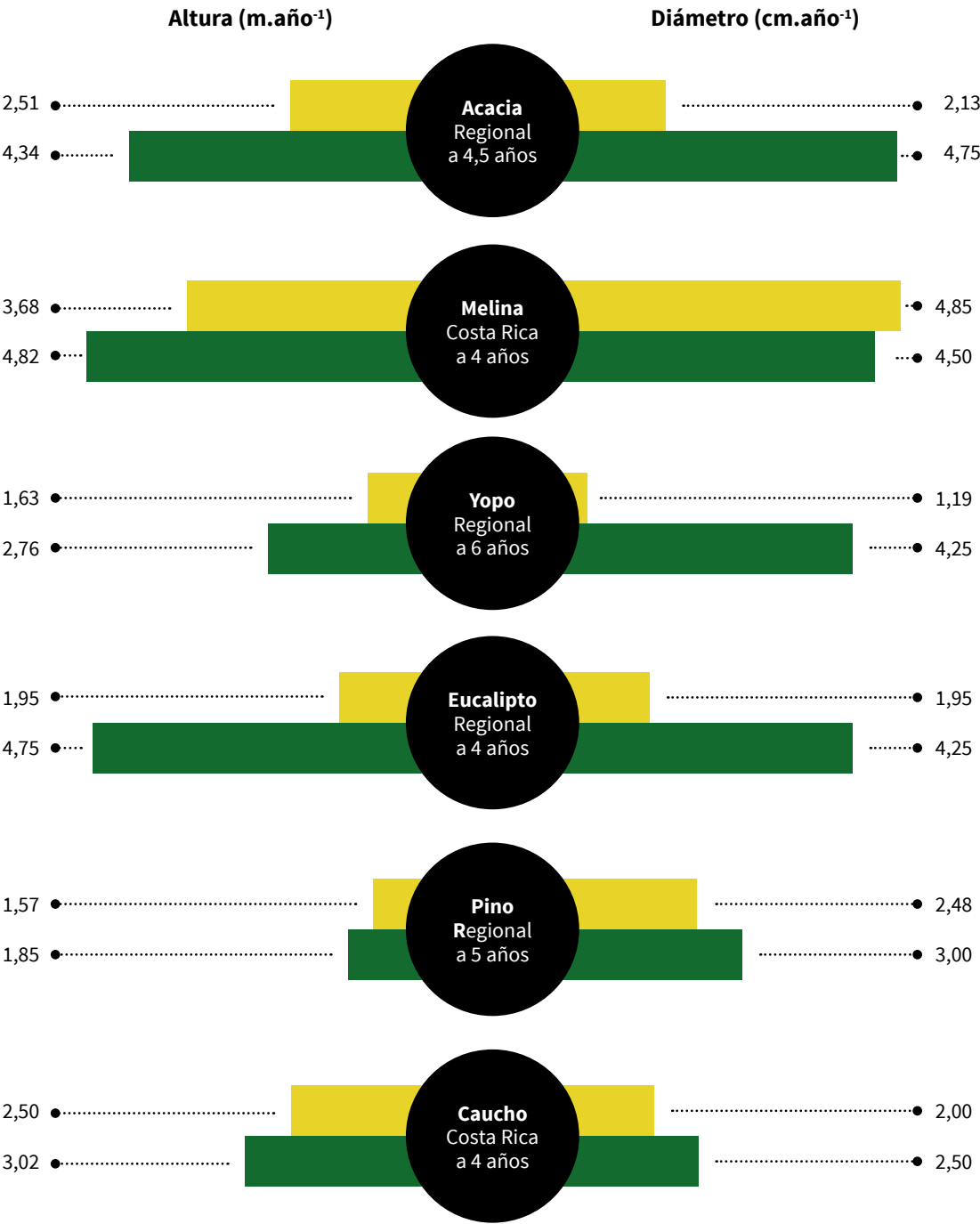
vida considerada (cuatro años). El pino, por otra parte, obtuvo un incremento anual de 3 cm, y el menor incremento se registró para el caucho, con 2,5 cm.año⁻¹.



→ **Figura 54.** Incremento medio anual del diámetro (DAP) de árboles establecidos en el ASA

Los IMA en altura encontrados en el ASA indican que todas las especies evaluadas bajo un sistema de riego con ATAEP presentan valores superiores a los encontrados en los estudios de referencia. Como se puede observar en la figura 55, la melina, el eucalipto y la acacia tienen IMA promedios superiores a 4 m.año⁻¹; en el caucho dicho promedio es superior a 3 m.año⁻¹, comparado con los 2,5 m.año⁻¹ reportados por referencia; el yopo muestra un IMA de 2,76 m.año⁻¹, en contraste con los 1,63 m.año⁻¹ registrados por la literatura, y el IMA del pino es de 1,85 m.año⁻¹, mientras que el valor de

referencia es de 1,57 m.año⁻¹. Retomando la figura 55, se puede apreciar que todas las especies mostraron IMA en DAP superiores a los reportados en los estudios de referencia, a excepción de la melina (de 4,50 cm.año⁻¹ en el ASA vs. 4,85 cm.año⁻¹ de referencia). Temporalmente, las cuatro especies que más incremento mostraron en los dos primeros años son las que presentan actualmente menor IMA anual, y el caucho y el pino manifiestan un comportamiento distinto, con mayores tasas de incremento en los dos últimos años.



Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

IMA Referencia
IMA ASA (4 años)
*IMA: incremento medio anual.

← **Figura 55.** Incremento medio anual multianual de altura y diámetro (DAP) de las especies establecidas en el ASA vs. referencias bibliográficas consultadas

Estimación de volumen de madera de árboles en pie

En la tabla 31 se muestra el cálculo de los volúmenes de madera en pie de las especies establecidas en el ASA. En este sentido, las especies melina, acacia y eucalipto presentaron los mayores registros, mientras que el pino y el caucho tuvieron los menores valores. La mayor producción de madera corresponde a las especies con mayor crecimiento. Así como con la altura y el DAP, en este caso se calcularon los ICA y los IMA para cada especie. Como resultado, se obtuvieron los valores presentados en la figura 56 (a-f).

Según las leyes de crecimiento, mientras el ICA vaya en aumento, se mantendrá mayor que el IMA, el cual también será creciente. Además, el IMA alcanza su máximo cuando corta la curva de ICA, punto que determina la edad de rotación técnica, cuando los incrementos corresponden a volumen. En la figura 56 (a-f) se presentan las gráficas de las funciones de producción IMA e ICA en volumen para las especies evaluadas en este trabajo.

Según lo descrito anteriormente y visualizando la información de la figura56 (a-f), la melina y el yopo están cerca de alcanzar la edad de rotación técnica en cuanto a incrementos de volumen se refiere.



Año 1	7,31
Año 2	40,56
Año 3	99,14
Año 4	167,75
Año 4,5	198,24



Año 1	14,67
Año 2	72,19
Año 3	142,35
Año 4	195,02
Año 4,5	212,20



Año 1	0,21
Año 2	1,92
Año 3	11,00
Año 4	27,92
Año 4,5	35,32



Año 1	0,00
Año 2	1,20
Año 3	9,53
Año 4	26,85
Año 4,5	33,51

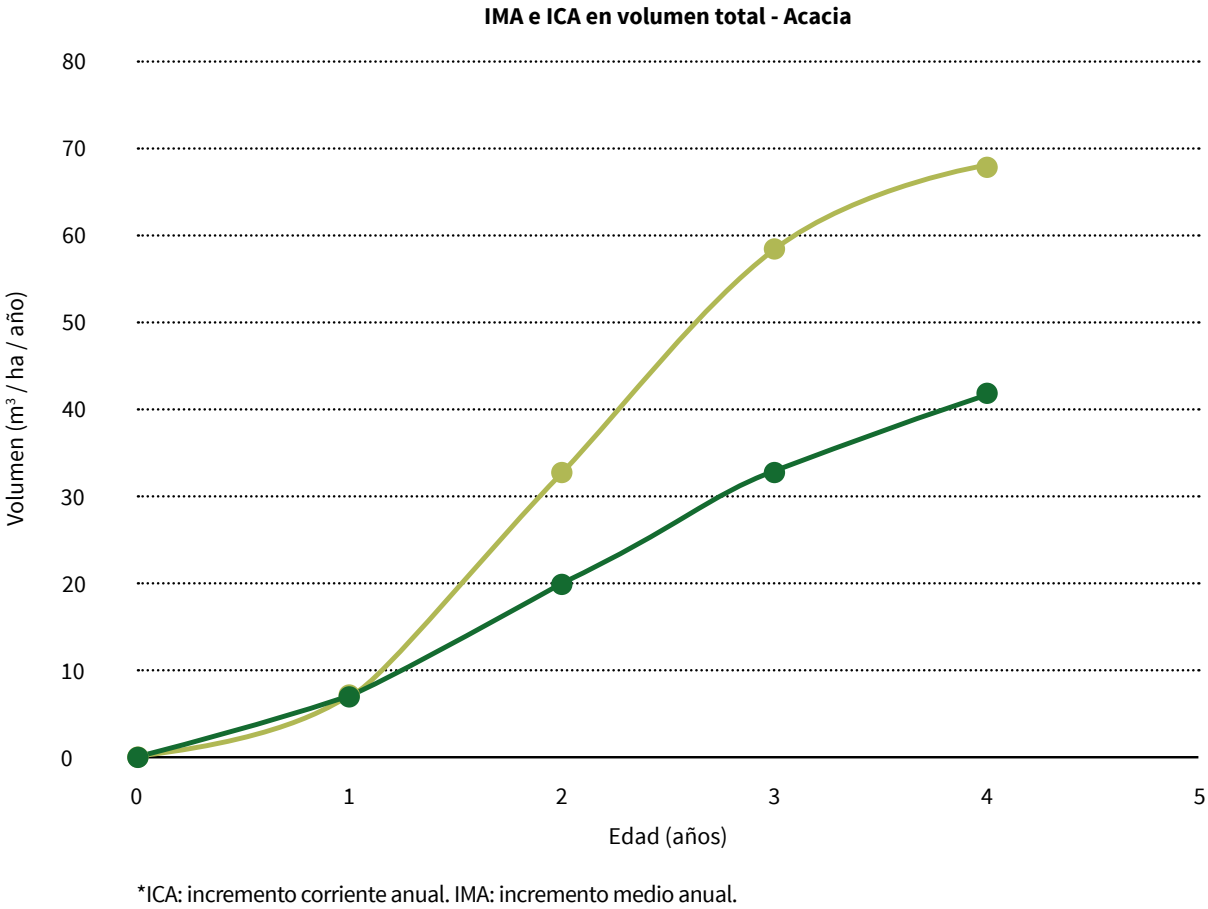


Año 1	4,27
Año 2	31,05
Año 3	86,28
Año 4	153,44
Año 4,5	182,85



Año 1	5,63
Año 2	23,40
Año 3	45,67
Año 4	64,37
Año 4,5	69,56

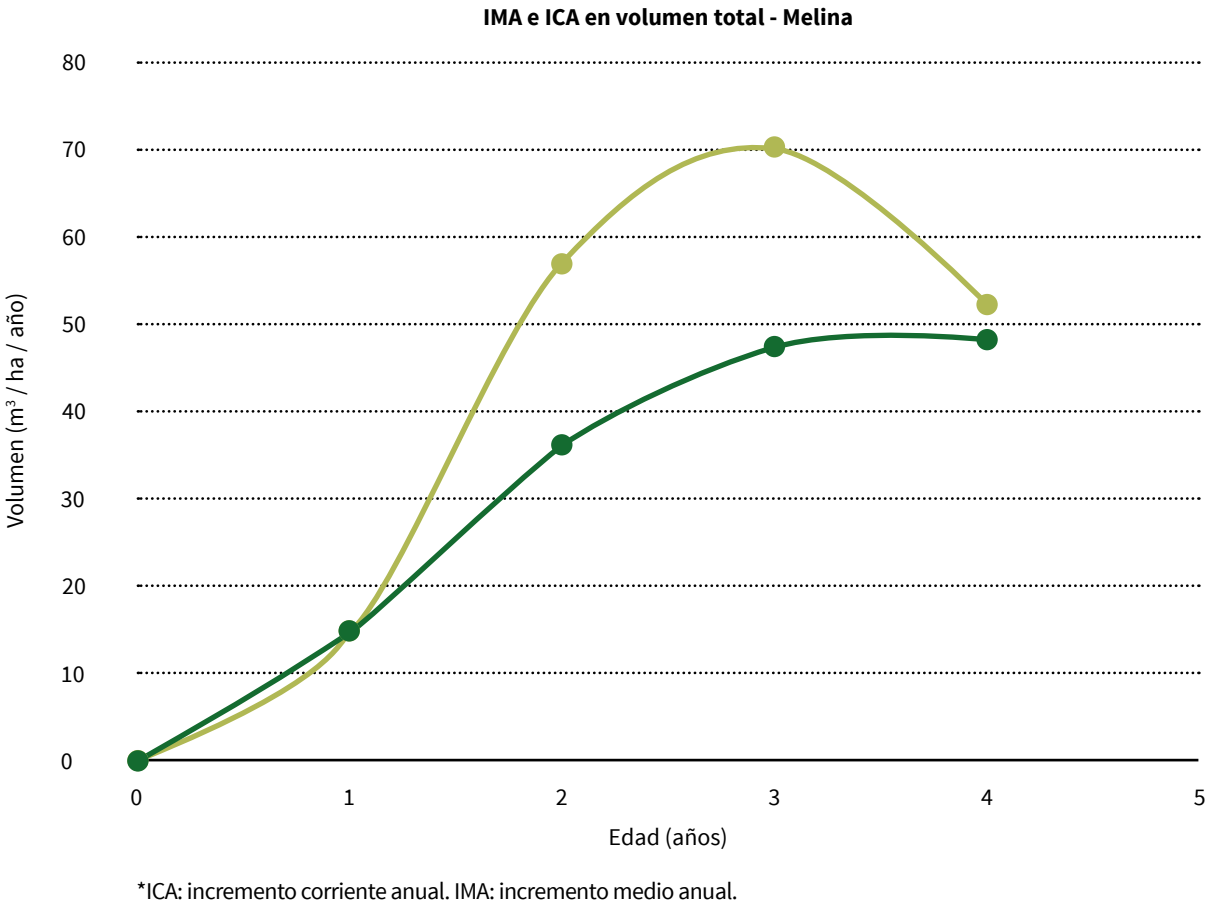
→ **Tabla 31.** Volúmenes calculados de madera en pie de las especies forestales establecidas en el ASA



Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

ICA
IMA

← **Figura 56a.** Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Acacia)



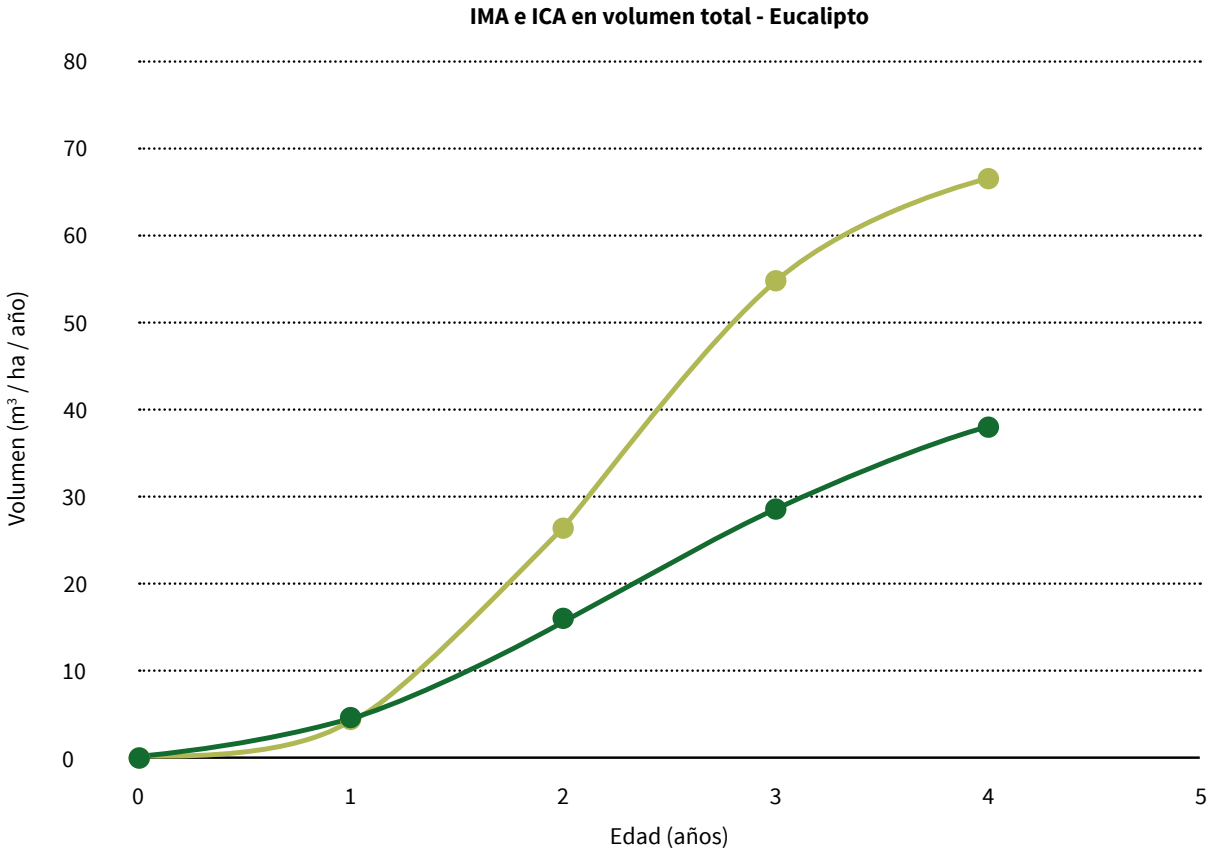
ICA
IMA

← **Figura 56b.** Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Melina)

ICA
IMA



Figura 56c.
Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Eucalipto)

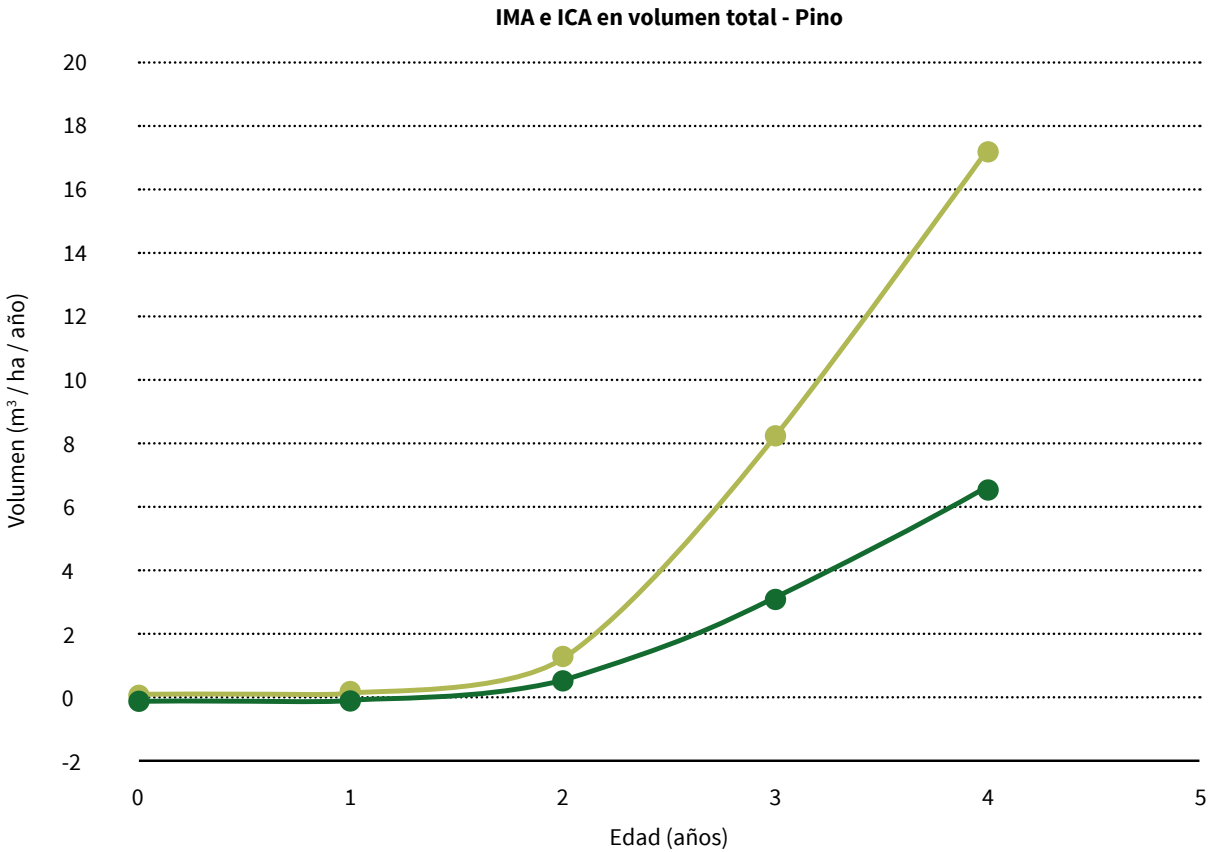


*ICA: incremento corriente anual. IMA: incremento medio anual.

ICA
IMA

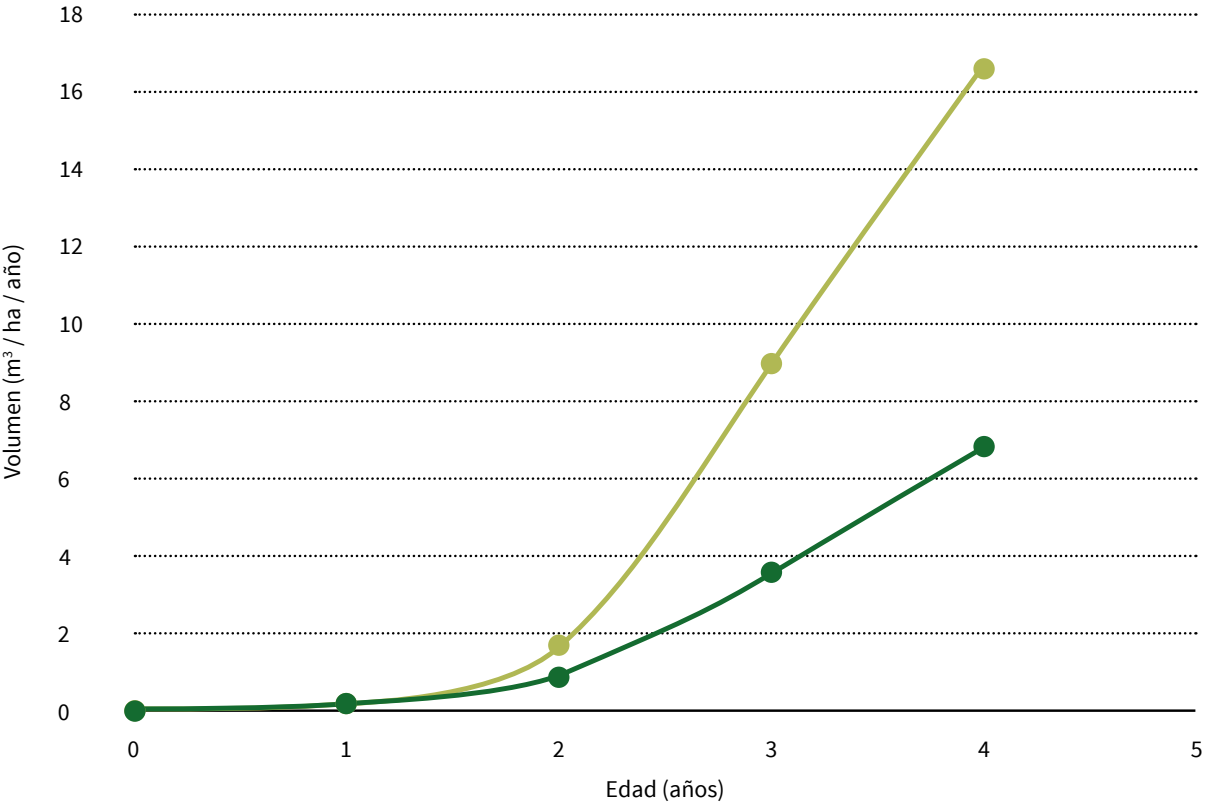


Figura 56d.
Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Pino)



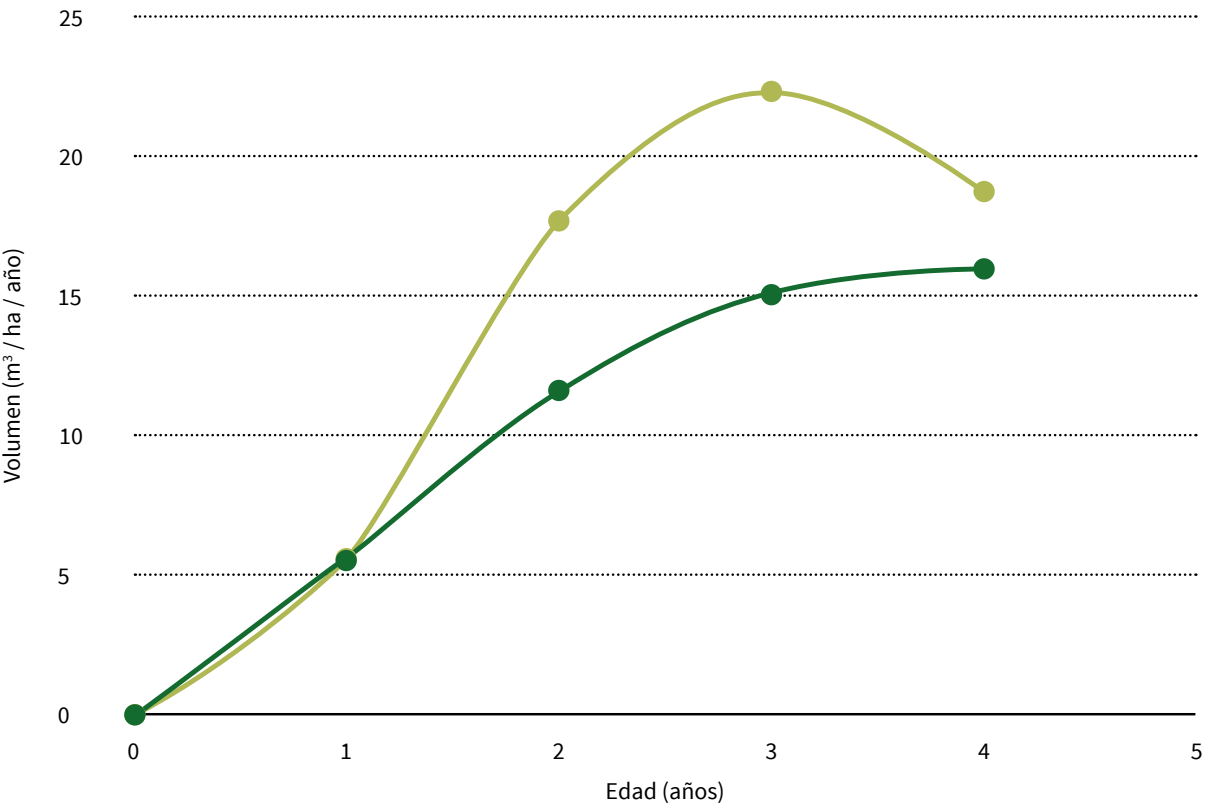
*ICA: incremento corriente anual. IMA: incremento medio anual.

IMA e ICA en volumen total - Caucho



*ICA: incremento corriente anual. IMA: incremento medio anual.

IMA e ICA en volumen total - Yopo



*ICA: incremento corriente anual. IMA: incremento medio anual.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

ICA
IMA



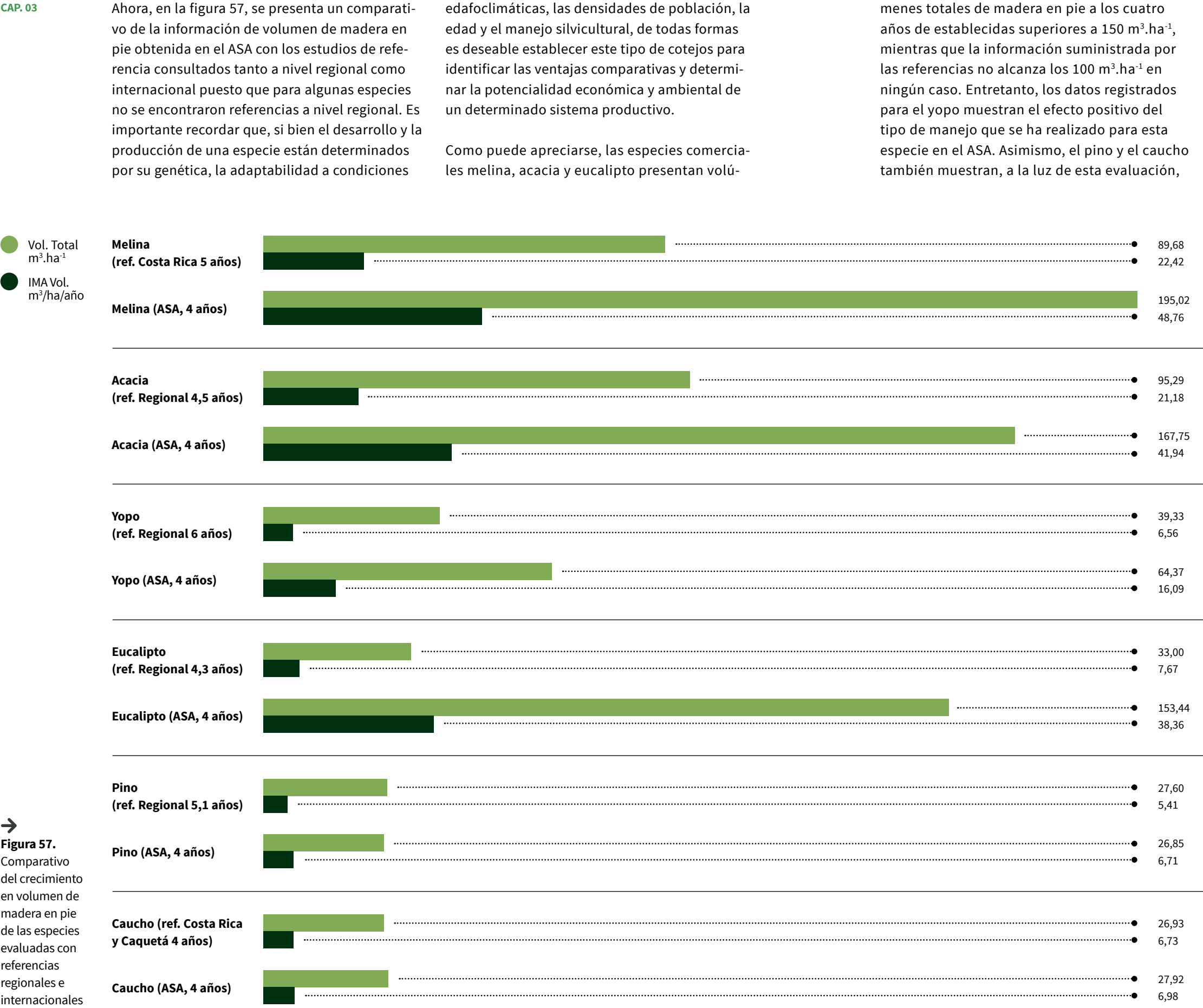
Figura 56e.
Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Caucho)

ICA
IMA

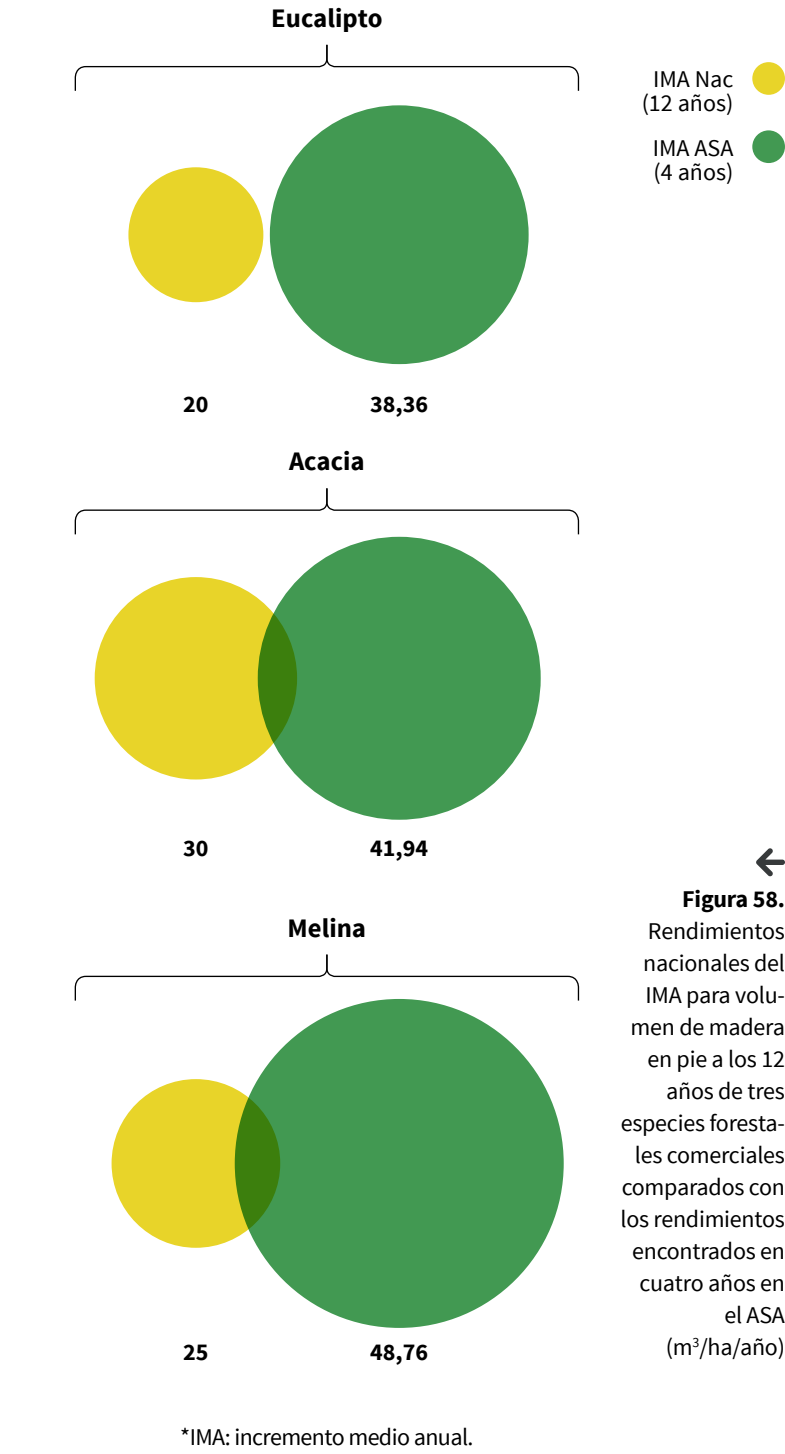


Figura 56f.
Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Yopo)

→ **Figura 57.**
Comparativo del crecimiento en volumen de madera en pie de las especies evaluadas con referencias regionales e internacionales



el efecto trascendente del manejo con ATAEP. Finalmente, la figura 58 refleja una compara-ción entre los IMA máximos registrados a nivel nacional por Proexport (2012) con la informa-ción del ASA para las tres especies comerciales más representativas. De este modo se observan claramente las bondades del sistema de manejo agronómico y de suministro de agua dado a las especies forestales en el ASA.



Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

Cálculo de biomasa

La biomasa se define como la suma total de la materia viva que se encuentra en un ecosistema en un momento determinado y se puede expresar en términos de peso seco, masa o volumen. Esta medida puede utilizarse para estimar las cantidades potenciales de varios productos y combustibles, así como para determinar la eficiencia del rodal y para relacionar los recursos biofísicos involucrados y la productividad de un sitio en particular.

En la tabla 54 se pueden observar las cantidades de biomasa acumulada durante los 4,5 años de muestreo.

Entre ellas, el eucalipto sobresale como la especie con los mayores valores de biomasa, con 284,5 t.ha⁻¹, seguido por la acacia (239,2 t.ha⁻¹) y la melina, con 199,3 t.ha⁻¹.

El pino y el caucho cuentan con los menores valores de biomasa acumulada en pie (24-29 t.ha⁻¹) a los 4,5 años de edad; para el yopo se observan valores cercanos a 85 t.ha⁻¹, y las especies comerciales eucalipto, acacia y melina, con registros superiores a las 199 t.ha⁻¹, están por encima de estudios de referencia. En el caso del eucalipto, por ejemplo, Seppänen (2002) estimó la biomasa y el secuestro de carbono en plantaciones de esta especie ubicadas en

el trópico húmedo a la edad de siete años y encontró que en una hectárea de cultivo el valor máximo de biomasa alcanzó las 232,8 t, lo que sitúa al eucalipto del presente estudio 51,7 t por encima.

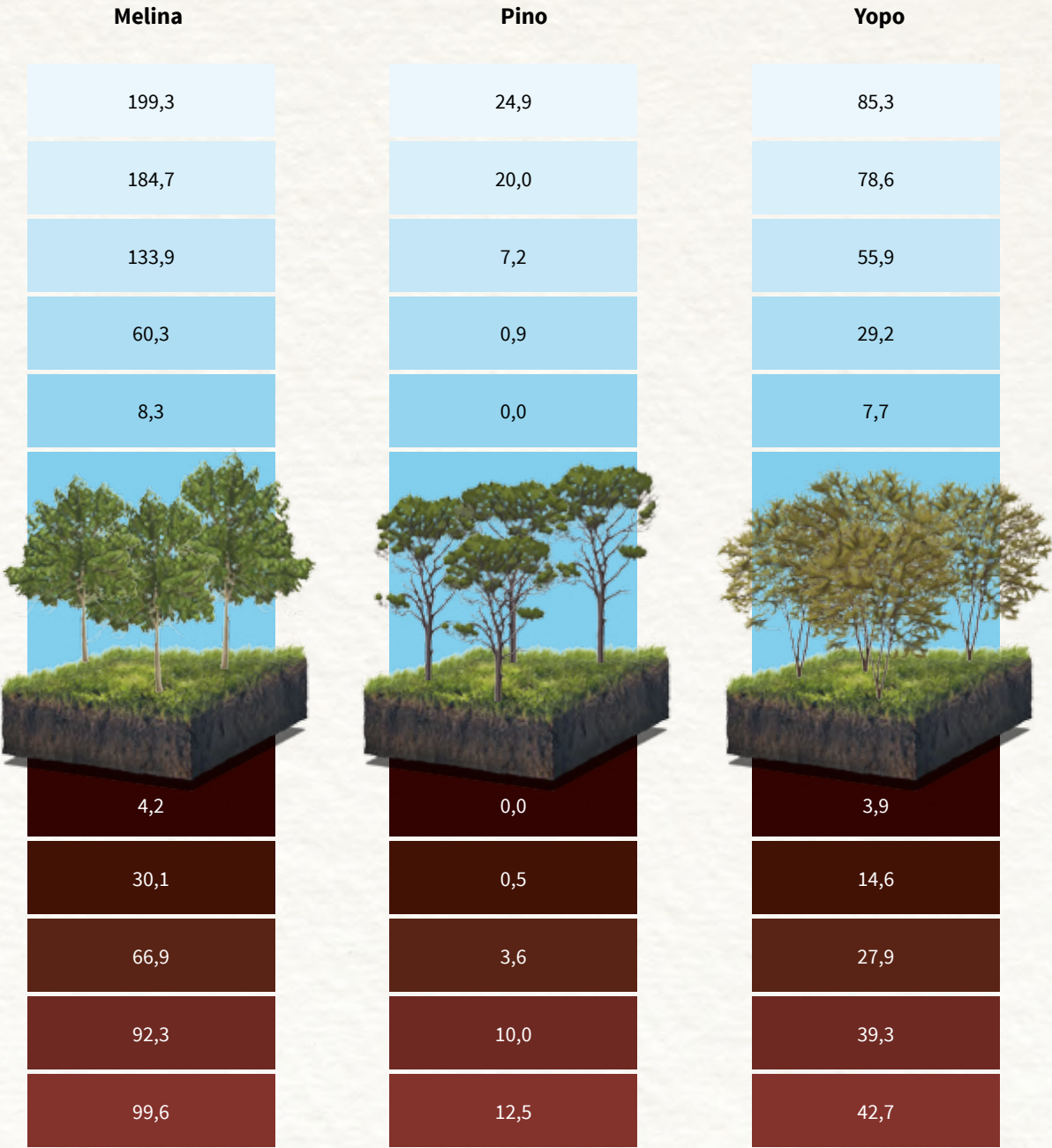
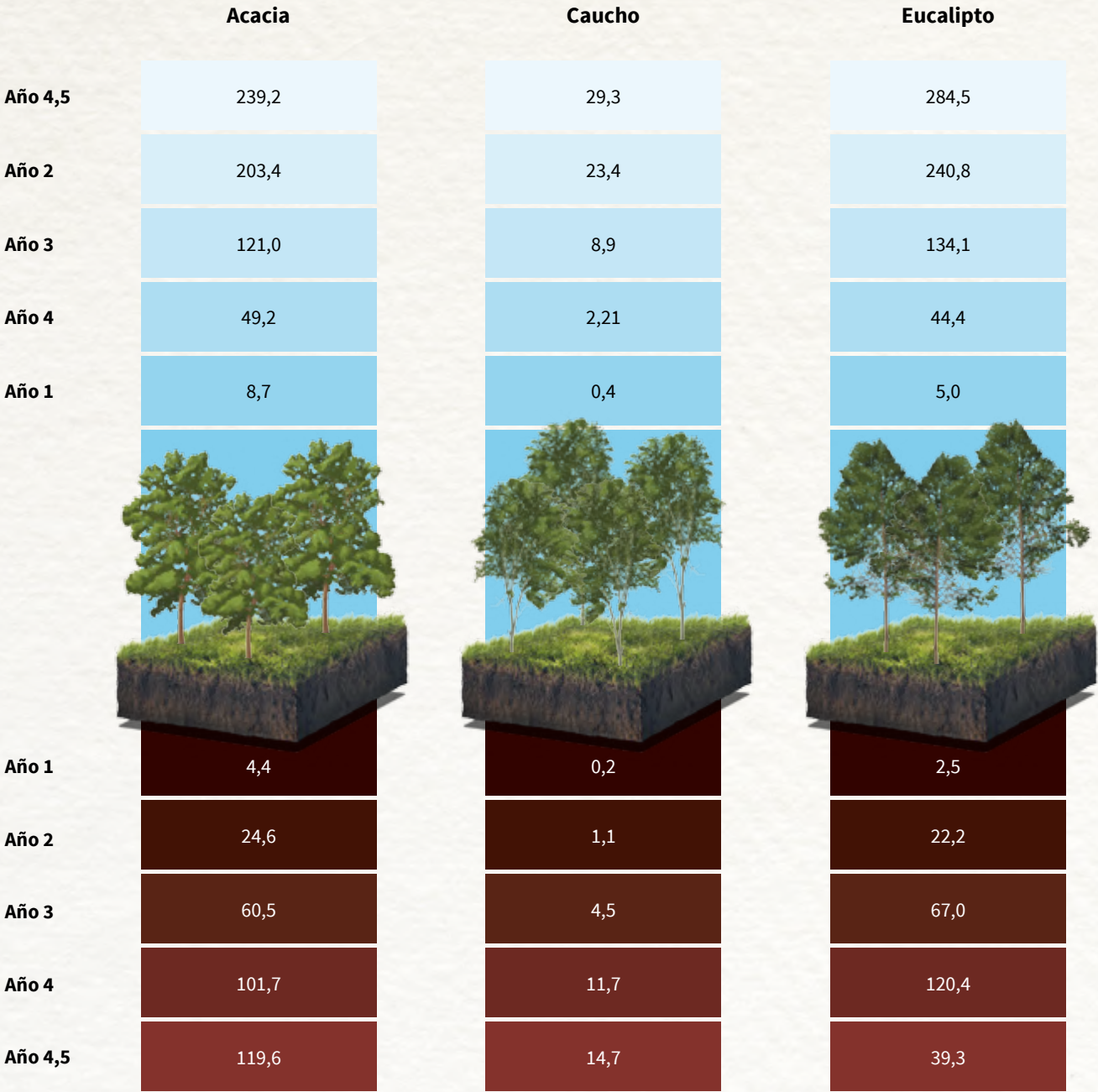
Estimación de almacenamiento de carbono

Los sistemas de producción forestal son un modelo económico que presta un importante servicio ambiental por su potencial para la fijación de carbono. Por lo tanto, evaluar cuantitativamente la distribución del carbono en los árboles y estimar el total almacenado es de fundamen-

tal importancia (Vega y Martianera, 2010). Este cálculo es sencillo luego de tener determinada la cantidad de biomasa. Por otro lado, en la tabla 33, se presentan los resultados de carbono almacenado en 4,5 años para las seis especies sujetas al estudio.

Con estos datos se evidencia un almacenamiento de carbono sobresaliente para la acacia, la melina y el eucalipto en comparación con estudios como el de Patiño, Suárez, Andrade y Segura (2018), quienes evaluaron la captura de carbono para diferentes cultivos forestales en el norte del Tolima, incluyendo la melina.

Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales



←
Tabla 32.
Biomasa calculada en pie de las especies forestales establecidas en el ASA (t.ha⁻¹)

←
Tabla 33.
Carbono almacenado en pie de las especies forestales establecidas en el ASA (t.ha⁻¹)

Dichos autores hallaron un almacenamiento de 41,65 t de carbono por hectárea, es decir, 57,95 t de por debajo de los valores obtenidos para la misma especie en el ASA. Siendo cultivos coetáneos, se intuye entonces que este comportamiento se debe a que la zona de referencia corresponde a bosque seco tropical, donde las precipitaciones son menores y los individuos están sujetos a altos índices de estrés hídrico, mientras que los árboles del ASA no tienen esta condición debido a las precipitaciones y al suministro permanente de riego con ATAEP.

Álvarez *et al.* (2016), en su trabajo sobre modelos de crecimiento diamétrico y de tasas de acumulación de carbono en 200 especies multipropósito de árboles nativos en nueve zonas de vida de Colombia, encontraron que el promedio de acumulación de carbono de las especies estudiadas fue de 67 t de carbono por hectárea en un ciclo de 10 años; por lo tanto, para la edad de 4,5 años el almacenamiento de carbono fue aproximadamente de 30,15 t de carbono por hectárea. Ahora bien, si se observa en la tabla 33, el yopo alcanza a acumular 42,7 t, un valor mayor al de referencia; sin embargo, para la especie de caucho en el ASA se obtuvo un valor menor (14,7 t) frente a la fuente consultada, a pesar

de haber obtenido buenos rendimientos en cuanto a diámetro y altura.

Actualmente, existe un considerable interés en la estimación de la biomasa de los bosques para fines comerciales y estudios científicos sobre la productividad de los ecosistemas, así como para la valoración de los cambios producidos en las tierras forestales, especialmente las tropicales, en el ciclo global del carbono (Vega y Martianeira, 2010). Esta expectativa se ha visto reflejada en el ASA, toda vez que el cambio de cobertura en el uso del suelo, de una ganadería semiintensiva con transición a cultivos forestales, se ha reflejado en beneficios para el ecosistema, como por ejemplo el cambio de temperaturas dentro de los rodales, el aumento de la fauna, la recuperación de suelos, el aprovechamiento de un recurso tan importante como el agua mediante el reúso de la utilizada en la industria de los hidrocarburos y, finalmente, la acumulación de biomasa para captura de carbono, que se erige como una de las alternativas mundiales en la lucha contra el cambio climático y los agentes contaminantes de la atmósfera que repercuten en el bienestar de los humanos y de las diferentes formas de vida.



Conclusiones

En esta investigación se observó el efecto del uso de ATAEP para riego en el desarrollo y la producción de cultivos forestales. Analizando los resultados de la información recopilada, se puede concluir que no se encontró evidencia de efectos adversos en el suelo y en el desarrollo de las plantas por el uso de estas aguas.

El trabajo adelantado permitió monitorear permanentemente tasas de crecimiento, desarrollo y acumulación de biomasa de los diferentes cultivos. Así mismo fue posible registrar información, para las diferentes especies establecidas, del efecto del riego que no se encuentra reportada para las condiciones de sabanas húmedas tropicales. En este sentido, se observa que los parámetros de desarrollo y producción de las especies forestales en el ASA, en suelos clase VI, muestran un efecto positivo del riego permanente bajo las condiciones edafoclimáticas de la zona (paisaje de piedemonte llanero).

Los cultivos establecidos presentaron un potencial productivo notable que se vio reflejado, al compararlo con estudios de referencia nacionales e internacionales, en el incremento de las variables volumen de madera, biomasa y almacenamiento carbono. Las cifras registradas en estos aspectos fueron mayores a las reportadas por diferentes autores en condiciones edáficas y climáticas más favorables a las encontradas en el ASA.

Asimismo, los resultados de los diferentes tipos de análisis realizados al suelo en cada una de las parcelas no revelaron alteraciones asociadas a la calidad del agua de riego. Básicamente, los cambios químicos observados se deben a las estrategias de manejo agronómico utilizadas durante el desarrollo de este trabajo y al cambio del uso del suelo. Además, las características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo se encontraron dentro de los parámetros normales para la zona.



Se encontró que las ATAEP son un recurso importante para maximizar la productividad en sistemas forestales que puede ser aprovechado, ya que está disponible en la región. También se evidenció que es posible la coexistencia entre dos tipos de producción diferentes. Finalmente, la calidad del agua de riego utilizada durante el periodo de evaluación cumplió con los requerimientos de calidad exigidos por la normatividad legal vigente (Resolución 1207 de 2014, Resolución 0631 de 2015 y Decreto 1594 de 1984).

A woodpecker with a bright red crest and black and white plumage is perched on a tree trunk. The bird is facing left, and its long, pointed beak is visible. The background shows green leaves and a clear blue sky. A green horizontal bar is at the top of the page, and a green square with the number 04 is in the top left corner.

04

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)

Viviana Irene Romero Ramírez
Víctor Fabio Luna-Mora
Édgar Fernando Almansa Manrique*

*Autor de correspondencia



La conservación de la biodiversidad se ha convertido en un tema de gran importancia dentro del desarrollo productivo de la sociedad. En ese sentido, Colombia presenta una prioridad ambiental, ante la cual ha venido desarrollando estudios sobre programas de conservación, recuperación y manejo sostenible, con el fin de mitigar los efectos negativos de las actividades humanas sobre los ecosistemas naturales y sus recursos biológicos.

En las últimas décadas, la biodiversidad se ha convertido en una herramienta fundamental dentro de los planes de manejo ambiental, los cuales son necesarios para la prevención, el seguimiento y la compensación de los efectos generados por las actividades industriales sobre recursos naturales.



Así, el uso diferente del suelo ha permitido diferenciar estructuras para sitios de nidificación, alimentación, refugio, percha o descanso, entre otras, que facilitaron el flujo de fauna hacia esta pequeña área y dieron lugar a un aumento importante en la composición de aves, mamíferos, anfibios y reptiles en esta zona de influencia.

Con este fin se han desarrollado metodologías que permiten definir a lo largo del tiempo el estado de conservación de un sitio predeterminado o el estado del ecosistema. Una de ellas son los levantamientos de inventarios biológicos, mediante los cuales se elabora un estudio faunístico que permite determinar el estado de conservación de un lugar, actuando como indicador biológico del ecosistema.

En este orden de ideas, se realizaron inventarios de fauna silvestre en el ASA durante cinco periodos, con el fin de determinar el efecto generado por el cambio del uso de suelo sobre la composición faunística de cuatro grupos taxonómicos (aves, mamíferos, anfibios y reptiles) en esta área determinada.

En una etapa inicial, en la zona predominaba un sistema de ganadería de uso intensivo, con una cobertura vegetal introducida de *Braquiaria* típica de la región. Sobre este paisaje se realizó una línea base con miras a identificar el estado de conservación de la zona de estudio y caracterizar la fauna asociada a este sistema generado antrópicamente. Posterior a la adecuación del área y a la modificación del uso de suelos, se realizó un constante seguimiento de los grupos taxonómicos de estudio para determinar el impacto generado en el área sobre la composición de estos indicadores biológicos.

Con el seguimiento realizado se ha demostrado que los sistemas productivos que se han establecidos en el territorio del ASA son espacios importantes para la supervivencia y la proliferación de fauna silvestre típica del piedemonte llanero.



Antecedentes

Hasta mediados del siglo XX, el piedemonte llanero era una continuación de selvas andinas en la vertiente baja de la cordillera Oriental, prolongación que permitió el flujo de fauna desde la Amazonia y la Orinoquia hasta la región del Caribe. Después de los años 50, la colonización y el crecimiento poblacional aumentaron considerablemente en esta región, desencadenando impactos sobre estos sistemas boscosos. La ampliación de la frontera agropecuaria e industrial, junto con los procesos de colonización de nuevas áreas, aumentó la tasa de cambio en el uso del suelo y la adopción de diferentes prácticas que intensificaban y modificaban el suelo a una mayor escala local y regional, generando fragmentación en bosques naturales, deteriorando los ecosistemas y disminuyendo hábitats indispensables para la fauna silvestre de la región (Falcucci, Maiorano y Boitani, 2007; Foley *et al.*, 2005; Marczak *et al.*, 2010; McNish, 2007; Orozco, Menjivar y Rubiano, 2015; Ramírez *et al.*, 2011; Smith, 1997; Tilman *et al.*, 2001; Veneklass, Fajardo, Obregón y Lozano, 2005).

Sin embargo, en los últimos años la conservación y el uso de la biodiversidad han sido una prioridad

para el mantenimiento y sostenimiento de los recursos naturales y de los ecosistemas (Gómez, 2008). Por esta razón se han establecido estrategias para el manejo y aprovechamiento de estos recursos de una manera sostenible, que garantice el bienestar de las especies silvestres, de los ambientes naturales y de la humanidad (Gasca y Torres, 2013; Villarreal *et al.*, 2006). Uno de los primeros pasos para conocer el estado actual de un área determinada es el monitoreo de biodiversidad, el cual permite hacer un seguimiento de la composición y estructura de los diferentes elementos de un área e identifica el tipo de acciones que deben ser tenidas en cuenta para el mantenimiento, la protección y el uso sostenible de ellos (Sayre *et al.*, 2002; Villareal *et al.*, 2006).

Teniendo en cuenta que el cambio en el uso del suelo puede generar impactos sobre la biodiversidad en los ecosistemas, en esta investigación se desarrolló un seguimiento entre los años 2010 y 2014 en cuatro grupos de vertebrados: anfibios, aves, mamíferos y reptiles. El objetivo principal de esta labor fue determinar la variación composicional de las especies de vertebrados debido al cambio de uso del suelo y evaluar cómo el cambio de las coberturas vegetales influye sobre la composición de la fauna silvestre. De esta manera se esperaba generar alternativas que permitieran implementar un manejo sostenible de los recursos naturales en el paisaje de terrazas aluviales del municipio de Acacias.

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)





Aspectos metodológicos

Área de estudio

El centro experimental ASA se encuentra ubicado en el municipio de Acacías, entre las veredas La Primavera y La Unión, aproximadamente en el kilómetro 19 en la vía que de Acacías conduce hacia el municipio de San Carlos de Guaroa, en el departamento del Meta, entre las coordenadas: 03° 53' 6,74"-03° 53' 04,21" latitud norte y 73° 35' 04,23"-73° 35' 89" longitud oeste (figura 59). Está localizado en el paisaje fisiográfico del piedemonte llanero, que es una zona de transición entre la vertiente de la cordillera Oriental y la sabana.

Este paisaje se caracteriza por estar entre los 400 y 1.000 m sobre el nivel del mar, abarcando el 12% de la superficie del departamento del Meta. La zona, además, registra una precipitación promedio anual superior a los 2.500 mm, con un periodo de lluvias que se extiende de abril a noviembre, y una época seca, de diciembre a marzo.

La temperatura predominante es mayor a los 24 °C y presenta un promedio de humedad relativa que va de 70,7% en los meses secos a 82% en los meses lluviosos (IDEAM, 2005; IGAC, 2004).



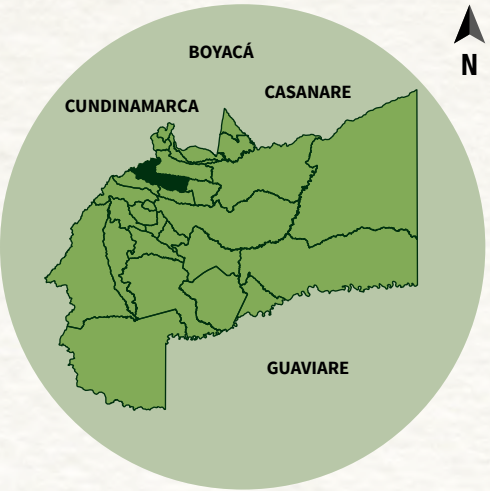
Figura 59. Pastura degradada de *Brachiaria* en ASA en 2010



Figura 60. Ubicación geográfica del Área de Sostenibilidad en Agroenergía. **Fuente.** Autores



Colombia



Departamento del Meta



Municipio de Acacías

Con respecto a la aptitud del uso de suelo, en esta zona se encuentra la subclase agrológica VI s-1 según la clasificación del IGAC (2004). Dicha subclase se asocia a sistemas ganaderos semiintensivos, con pastos introducidos y actividades de agroforestería como el aprovechamiento del caucho y de especies maderables. Por lo demás, estas tierras tienen grandes limitaciones que las hacen inadecuadas para la explotación de muchos cultivos, por lo que se debe orientar al establecimiento de especies perennes

y semiperennes, así como a la recuperación de la cobertura boscosa natural.

La zona de estudio cuenta con un área de 46 ha aproximadamente. En un principio, esta zona presentó una cobertura vegetal dominante de pastos introducidos de *Braquiaria* (figura 59), pero luego se realizó una adecuación de tierras (figura 61) para formar parcelas de uso silvopastoril y para un sistema agroforestal (figura 62).



- ① La laguna
- ② Las parcelas forestales
- ③ El sistema silvopastoril
- ④ El caño Danta (a) y el caño Bijao (b) (límites de la zona de influencia) para la recuperación por reforestación ecológica de las zonas de ribera.

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)



Figura 61. Adecuación del área que se intervino: A. División de parcelas y preparación del terreno (2011); B. Establecimiento de parcelas forestales, arreglos silvopastoriles y lagunas artificiales.

Dentro del ASA se registran los siguientes tipos de coberturas:



Cuerpos de agua

Corresponden a los caños Danta y Bijao (zonas que limitan con el ASA), asociados a los bosques de ribera en estado de deforestación. También se incluyen aquí canales de riego que pasan por potreros del sistema ganadero y del sistema agroforestal, así como lagunas de amortiguación de la escorrentía, que se asocian a pastos y plantas herbáceas. Algunas especies faunísticas pueden ocupar estos hábitats o constituirlos como zonas de descanso y paso temporal.



Pastizales

Corresponden a la vegetación compuesta de gramíneas que ha sido introducida para uso pecuario. Adicionalmente, se encontraron pastizales con espacios abiertos y algunos árboles que dividían las parcelas.



Sistema agroforestal

El área para la actividad agroforestal está compuesta por nueve parcelas, cada una de 1 ha (aproximadamente), con especies forestales (*Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Hevea brasiliensis*, *Anadenanthera peregrina*, *Eucalyptus pellita*, *Jatropha* - especies amazónicas, *Pinus caribaea*, *Guadua* sp.).



Bosque de ribera

Constituido por coberturas de vegetación arbórea que se ubican en las márgenes de los cursos de aguas como caños y ríos. Estas zonas se encuentran en los límites del ASA y se caracterizan por no superar los 5 m de ancho, así como por que las especies vegetales funcionan como cercas vivas.

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)



Figura 62.
Parcelas agroforestales

Métodos de campo

Dentro de las estrategias para evaluar el impacto generado por los cambios en el uso del suelo en el área de interés (predio ASA), se implementaron dife-

rentes metodologías de investigación para cuatro grupos taxonómicos, que han sido tradicionalmente usadas para suministrar información sobre el estado de conservación de hábitats modificados antrópicamente (Villarreal *et al.*, 2006).



Anfibios y reptiles

El estudio de estos dos grupos de vertebrados se efectuó mediante observación directa utilizando la metodología VES (*Visual Encounter Surveying*) (Heyer *et al.*, 1994; Ángulo *et al.*, 2006), la cual consiste en la búsqueda de individuos en un área delimitada. Los recorridos se programaron diariamente desde las 8:00 hasta las 12:00 y desde las 19:00 hasta las 23:00, dentro de los diferentes tipos de cobertura anteriormente mencionados. Las especies observadas se registraron fotográficamente en cada uno de sus hábitats.



Avifauna

Para el estudio de este grupo de vertebrados se realizaron caminatas dentro de la zona de influencia del proyecto, con dos horarios de observación: uno entre las 06:00 y las 11:00, y otro entre las 16:30 y las 18:30. En cada recorrido se tomaron notas de todas las aves observadas visual y auditivamente en un área y un tiempo determinados (Ralph *et al.*, 1996; Bibby *et al.*, 1998). Estos recorridos se realizaron en pastizales, parcelas del sistema agroforestal y bordes de bosque de los caños Danta y Bijao. Por sus características biológicas, taxonomía e historia natural conocida y estable, así como por su fácil observación y su amplia distribución, este se tomó como grupo indicador para estimar el efecto del cambio en el uso del suelo sobre el estado de conservación del ASA (Villarreal *et al.*, 2006). Todas las especies observadas se registraron fotográficamente y, luego, fueron identificadas con el uso de guías taxonómicas y con consultas a ornitólogos de la región.



Mastofauna

En este grupo de vertebrados el estudio se realizó a través de la observación directa de los especímenes en las caminatas de observación en el predio, o a través de métodos indirectos y de carácter no invasivo como la búsqueda de rastros, zonas de alimentación, huellas, bañaderos y madrigueras, por medio de los cuales se puede llegar a determinar la presencia de algunas especies (figura 63).



Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)

←
Figura 63. Metodologías VES y caminatas de observación, diurnas y nocturnas, para el registro de fauna silvestre



Resultados

Para la primera fase del proyecto ASA, en el año 2010, se caracterizó a la fauna silvestre registrando las especies observadas en el área de estudio. En sus inicios, esta zona presentaba principalmente una cobertura vegetal de pastizales introducidos de *Brachiaria humidicola* y *B. decumbens*, especies típicas para el engorde de ganado en la región. Además, contaba con fragmentos de bosque ripario de los caños Bijao y Danta, los cuales tenían pocas especies vegetales y no superaban los cinco metros de ancho como consecuencia de la deforestación para la ampliación del sistema pecuario.

En este escenario, se realizó un levantamiento de la línea base de las especies de fauna silvestres asociadas a este sistema. Así, un total de 35 especies, 34 géneros y 25 familias se registró mediante observación directa. En su mayoría, estas fueron especies con una gran asociación a hábitats antrópicos o de hábitos alimenticios de tipo generalistas, como la garza del ganado (*Bubulcus ibis*), el sirirí (*Tyrannus melancholicus*), el sapo común (*Rhinella marina*) y la rana platanera (*Boana xerophylla*). Otras especies fueron registradas en los fragmentos de bosques riparios y en la zona de transición entre el borde de los bosques y el potrero; entre estas se encuentran el mico tití (*Saimiri cassiquiarensis*), el mico soldado (*Sapajus apella*) y el aguilucho (*Rupornis magnirostris*).

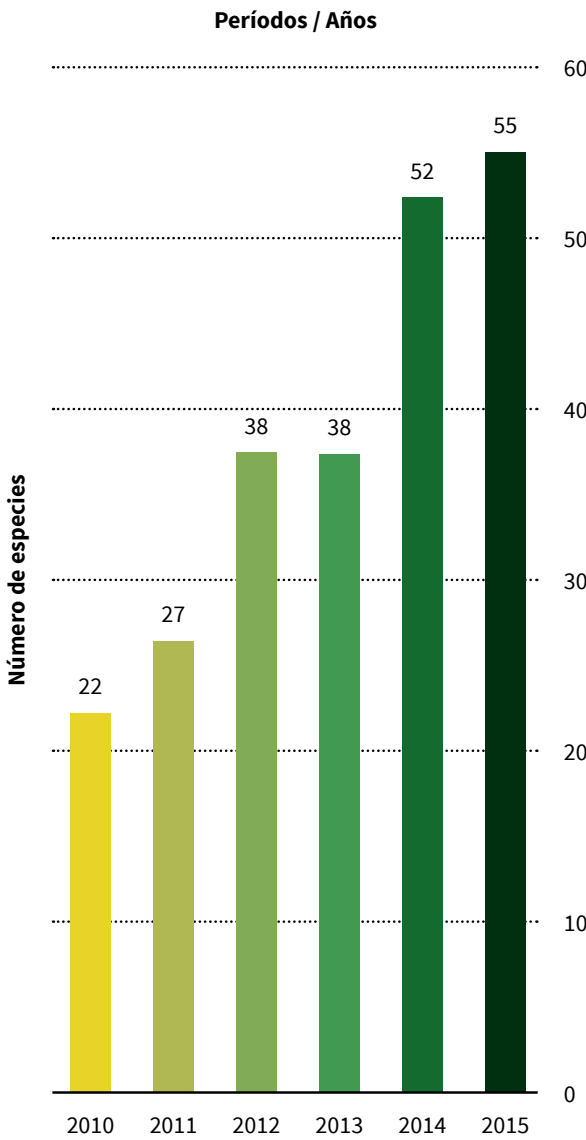
Para la fase siguiente, en los años 2012-2013, en el ASA se delimitaron cuatro zonas que tuvieron manejos particulares: a) laguna para búfalos, b) parcelas forestales, c) sistema silvopastoril, y d) la rehabilitación ecológica de las zonas de ribera de los caños Danta y Bijao. A través de este cambio en el uso del suelo se ha evidenciado el incremento en el número de especies de cada uno de los grupos de vertebrados en las diferentes coberturas vegetales objeto de estudio. A continuación se describen los resultados encontrados para cada uno de dichos grupos.

Avifauna

En la avifauna se observó un incremento en el número de especies de aves durante los cinco periodos de monitoreo (figura 64). El cambio en el uso y en la cobertura del suelo generó alternativas para las diferentes actividades de estas especies (desplazamiento entre fragmentos boscosos de la zona, espacios para la construcción de nidos, alternativas de recursos para su alimentación, entre otras). Cada componente del paisaje permite que haya una diversidad de especies con requerimientos ecológicos particulares, de manera que es posible observar especies que habitan cerca de cuerpos de agua, que nidifican en las pasturas o que interactúan en las diferentes parcelas forestales.



Figura 64. Número de especies de aves registradas en el ASA



Dentro del conjunto de aves observadas en el ASA, se registra que el orden de los Passeriformes (pájaros cantores) tuvo el mayor número de familias y especies (9 y 16, respectivamente). Esta gran variedad se debe a la capacidad que tienen estas especies de colonizar gran parte de hábitats en los diferentes ecosistemas, cumpliendo un papel importante en los procesos ecológicos naturales, ya sea como controladores biológicos, polinizadores o dispersores de semillas (Hilty y Brown, 2009; Kattan, Serrano y Aparicio, 1996).



Caracara
(*Caracara cheriway*)



Pechiamarillo
(*Sturnella magna*)



Periquito
(*Forpus conspicillatus*)

Se registraron grupos taxonómicos de baja representatividad, así como órdenes con una familia y una especie que, por lo general, corresponde a individuos que pueden presentar una mayor restricción ecológica, de difícil observación o de comportamientos crepusculares, lo que dificulta su observación. Tal es el caso de la garza del sol (*Eurypyga helias*), el colibrí buchiblanco (*Amazilia fimbriata*) y el chilaco (*Aramides cajaneus*).



Canario
(*Sicalis flaveola*)



Azulejo
(*Thraupis episcopus*)



Azulejo golondrina
(*Tersina viridis*)

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)

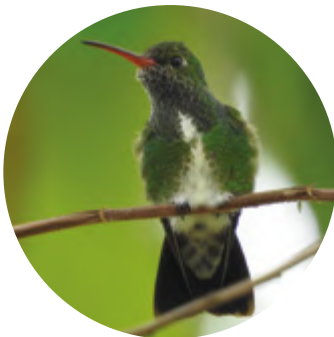


Figura 65. Especies de aves pertenecientes al orden Passeriformes en el ASA

Otras especies registradas, como el caracara (*Caracara cheriway*), el perico carisucio (*Eupsittula pertinax*), el sirirí atrapamoscas (*Tyrannus melancholicus*) y el sinsonte (*Mimus gilvus*), presentan amplio rango de distribución y tolerancia a hábitats antrópicos, lo cual les permite dispersarse por una gran variedad de microhábitats, así como aprovechar diferentes tipos de recursos como nidos abandonados.



Figura 66. Órdenes menos representativas en el ASA



Chilaco colinegra
(*Aramides cajanea*)



Garza del sol
(*Eurypyga helias*)



Figura 67. Especies con amplio rango de distribución



Sinsonte
(*Mimus gilvus*)



Sirirí atrapamoscas
(*Tyrannus melancholicus*)

Un resultado de gran importancia a lo largo de la investigación es la presencia de especies migratorias que suelen observarse por toda la Orinoquia, como es el caso del andarríos manchado (*Actitis macularius*) y el sirirí tijereta (*Tyrannus savana*). Estas especies viajan desde las zonas templadas del norte y del sur de América durante el invierno para pasar el verano en el trópico, aprovechando recursos alimenticios que garantizan la supervivencia de la especie; sin embargo, es frecuente encontrarlas fuera de la época migratoria, ya que sus crías aún no han llegado a la madurez necesaria para enfrentar los procesos de migración (McNish, 2007).



Figura 68. Especies migratorias



Andarríos manchado
(*Actitis macularius*)



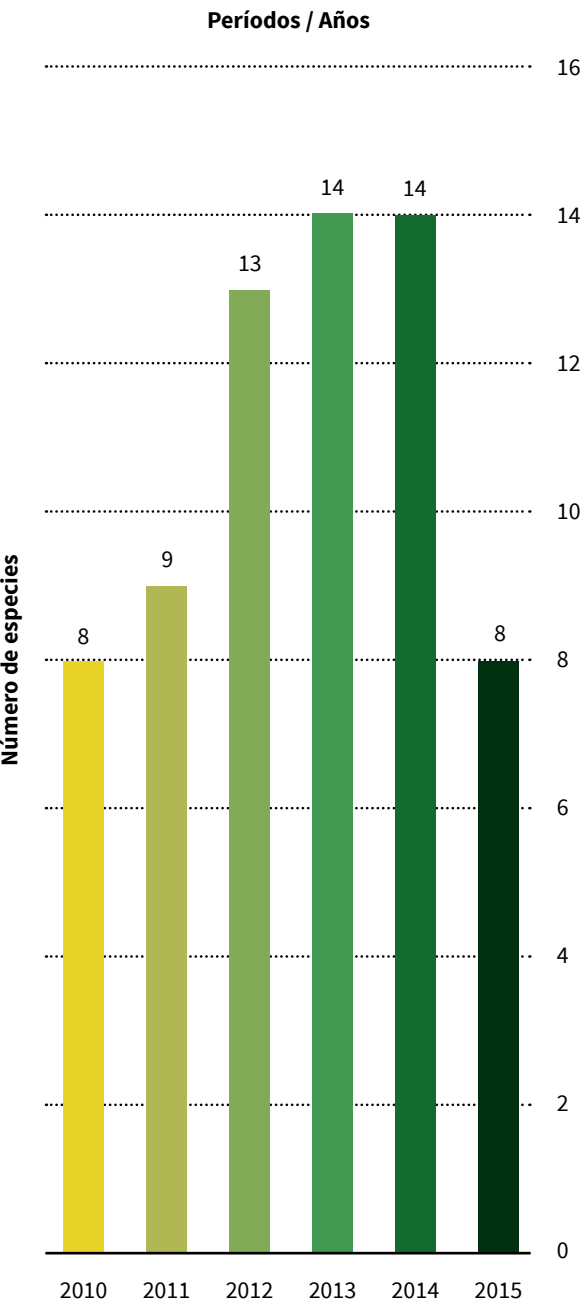
Sirirí tijereta
(*Tyrannus savana*)

Mamíferos

Durante el estudio se observó un incremento en el registro de mamíferos en el área de influencia del ASA. Para el 2010 se había evidenciado un bajo número de especies por causa de la gran deforestación y la destrucción de hábitats para la ampliación de potreros y el establecimiento de las pasturas para la ganadería y las zonas industriales (figura 69), actividades que causan la pérdida de bosques naturales y, como consecuencia, la disminución de especies faunísticas.



Figura 69. Número de especies de mamíferos registradas en el ASA



Chigüiro
(*Hydrochaeris hydrochaeris*)



Araguato
(*Alouatta seniculus*)



Oso hormiguero
(*Myrmecopaga trydactyla*)

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)

Para la fauna en general, este tipo de intervención antrópica genera una disminución de su área y la pérdida de la conexión entre el bosque y hábitats importantes (McNish, 2007; Medellín, Arita y Sánchez, 1997). Sin embargo, durante los recorridos realizados dentro de los bordes de los caños que limitan al ASA se registraron madrigueras de armadillos o cachicamos y semillas roídas por especies de roedores y primates, lo que indica que, pese a su fragmentación, estos bosques aún tenían la capacidad para albergar y sostener especies de animales en la zona.

El posterior cambio en la estructura vegetal permitió un acercamiento entre los corredores de los caños Danta y Bijao. Así, las especies que se desplazan en grandes distancias encontraron una conexión de estos dos corredores, lo que les permitió ampliar su zona de actividad. El hallazgo de especies como el oso palmero (*Myrmecophaga tridactyla*), el mico tití (*Sciurus cassiquiarensis*) y la ardilla de cola roja (*Notosciurus granatensis*) en las parcelas forestales del ASA sugiere que este cambio en el uso de tierras generó un sistema de corredor biológico natural en esta zona.



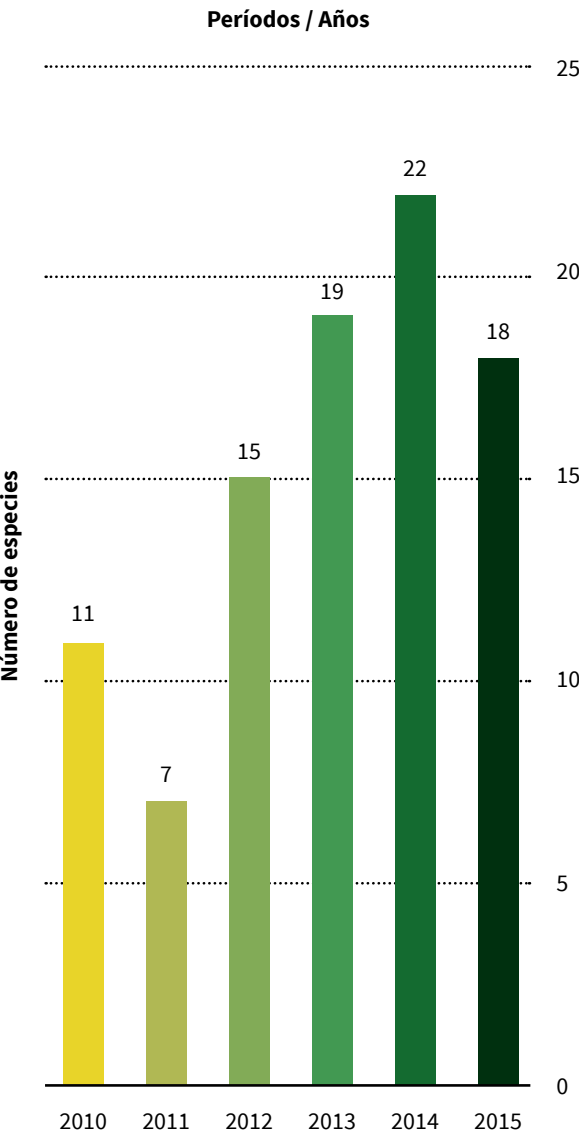
→ **Figura 70.** Mamíferos registrados en la zona de influencia al proyecto: A. Ardilla de cola roja (*Notosciurus granatensis*), B. Mono maicero (*Sapajus apella*)

Herpetofauna

Este grupo taxonómico, que abarca anfibios y reptiles, presenta un incremento en el número de sus especies (figura 71). El orden más representativo son los anuros (sapos y ranas), grupo muy diverso que se encuentra en todos los continentes (excepto en la Antártida) y puede habitar espacios acuáticos y terrestres, lo que le facilita la dispersión de sus especies (Vitt y Caldwell, 2009). Su gran importancia no solo radica en las interacciones en los procesos ecológicos, sino en su vulnerabilidad ante los impactos antrópicos y las transformaciones de los ecosistemas, lo que les permite dar cuenta del estado de conservación de un lugar determinado (Acosta, 2000).



Figura 71. Número de especies de anfibios y reptiles registradas en el ASA



Para el 2010 se registró un bajo número de especies, entre las cuales se destacó la presencia del sapo común (*Rhinella marina*), el cual presenta una amplia distribución en todo el territorio nacional, siendo la especie con la mayor cantidad de dispersión y colonización de hábitats. Las cualidades físicas y fisiológicas de estos sapos les permiten tolerar sitios alterados: su piel gruesa los protege de la pérdida de agua, y la exudación de toxinas por la piel los alejan de animales predadores (Cáceres y Urbina, 2009).



Sapo común
(*Rhinella marina*)

Al generar espacios como la laguna de los Búfalos y la laguna de amortiguación, se crearon microhábitats adecuados para estas especies que generaron un mayor crecimiento poblacional. Adicionalmente, no solo se aumentó su abundancia, sino que se contribuyó con los diferentes procesos naturales de los ecosistemas.

Especies como la rana sabanera (*Dendropsophus mathiassoni*), la rana platanera (*Boana xerophylla*) y la rana verde de pecas rojas (*Boana punctata*) son registradas como comunes en sistemas productivos del piedemonte llanero (Cáceres y Urbina, 2009). Sin embargo, aunque en el ASA se registraron estas tres especies, *Boana xerophylla* es la más común durante los estudios realizados en las parcelas y espacios abiertos de esta área (figura 72).

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)



Figura 72.
Especies de anuros registradas en el área del proyecto



Rana platanera
(*Boana xerophylla*)



Rana sabanera
(*Dendropsophus mathiassoni*)

Finalmente, dentro del grupo de los reptiles, el orden Squamata (serpientes, iguanas, lagartijas, babillas, entre otros) tuvo una destacada representatividad y abundancia durante el estudio desarrollado en el ASA (Vitt y Caldwell, 2009). Uno de los grupos que tuvo una mejor adaptación y colonización de los nuevos hábitats generados por el cambio de uso del suelo fue el de los cocodrilos, quienes se convirtieron en una especie representativa de los humedales antrópicos (laguna de amortiguación) y naturales (morichales, bajos). En el caso de la babilla (*Caiman crocodilus*), se estableció una población que poco a poco fue incrementando su tamaño poblacional al aumentar significativamente el tipo de presas (anfibios, aves, mamíferos) en la zona.

Por otra parte, especies pertenecientes al grupo de las tortugas también se vieron beneficiadas de este tipo de modificaciones a nivel del paisaje. Tal fue el caso de la tortuga terecay (*Podocnemis vogli*), especie que ha disminuido su población a lo largo de los años en algunas zonas de la microcuenca del río Orotoy, principalmente por su cacería para consumo, sobre todo en la temporada de reproducción, a comienzo de año, en la época de sequía, en la cual los pobladores saquean los nidos a lo largo de las playas cerca de los ríos para obtener los huevos y capturas a las hembras luego del desove (Luna-Morra observ. pers. 2019).



Figura 73. Reptiles observados en el ASA



Culebra lomo de machete
(*Chironius carinatus*)



Tortuga terecay
(*Podocnemis vogli*)



Babilla
(*Caiman crocodilus*)



Conclusiones

El cambio en el uso del suelo y en la cobertura vegetal es uno de los principales factores que permitieron el aumento de especies en la zona de influencia del ASA. Los nuevos sistemas productivos, en donde hay una combinación de hábitats, han generado un potencial importante para albergar diferentes especies que cumplen funciones en los procesos ecológicos de los ecosistemas. De la misma manera, estos cambios dan lugar a sistemas productivos sostenibles y amigables que aportan positivamente al mantenimiento de la fauna silvestre de esta zona.

Al mismo tiempo, el crecimiento de las especies arbóreas de los diferentes tratamientos establecidos en el ASA favoreció la conexión entre los fragmentos de bosques de ribera de los caños Danta y Bijao.

De esta manera, especies que solo se observaban en dichos fragmentos han tenido la posibilidad de pasar a las parcelas agroforestales.

En general, los cuatro grupos taxonómicos caracterizados registraron un aumento de especies durante los periodos descritos. Los diferentes espacios generados antrópicamente han permitido que este lugar sea un espacio de amortiguamiento para la fauna silvestre de la zona, y se han creado condiciones adecuadas para que muchas especies tomen este sector como un sitio de descanso, de percha, de nidificación o, en algunos casos, de hábitat natural. Así, al generar esta diversidad, se ha podido contribuir con muchos procesos ecológicos tales como la dispersión de semillas, la polinización de especies vegetales, los controles biológicos naturales, entre otros. Cabe recordar, como cierre, que las especies son dinámicas y, por lo tanto, varían de acuerdo con sus capacidades fisiológicas y morfológicas dentro de las diferentes coberturas vegetales y tiempo climático.



Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de sostenibilidad en agroenergía (ASA)



05

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

Guillermo Alonso Bueno Guzmán*
Luisa Fernanda Posada Velásquez
Oscar Javier Cerinza Murcia
Diego Mauricio Pabón Leal
Otoniel Pérez López
José Henry Velásquez Penagos
Sandra Xiomara Pulido Castro

*Autor de correspondencia

Este capítulo presenta, en primer lugar, lo referente a la implementación de sistemas agrosilvopastoriles (SASP) en fincas de productores con diferentes arreglos forestales (entre otros, cercas vivas, bosquetes, franjas y dispersos), no solo como unidad protectora y reguladora del recurso hídrico, sino como la gran oportunidad de proporcionar confort al animal.

En esta implementación se intervinieron 108 predios, que sumaron un área de 19.890 ha, distribuidos en los municipios de Villavicencio (44,4%), Acacias (30,6%), Castilla La Nueva (22,2%) y Guamal (2,8%). Como resultado se resalta la caracterización del suelo como un oxisol, con densidad aparente de 1,40-1,43 g.cm⁻³ y porosidad entre 46,9-47,7%, corregido a 1,2 g.cm⁻³ y a más del 50%, respectivamente. Asimismo, se establecieron más de 100.000 plántulas entre acacia (*A. mangium*), eucalipto (*E. pellita*), melina (*G. arborea*) y yopo (*A. peregrina*), así como de gualanday, yopa, cañofistola, machaco, orejero, chocho, tambor, patevaca y cratylia en arreglo de cercas vivas (84%) y en bosquetes y otros (16%). De igual manera, se introdujeron bancos forrajeros mixtos en un 60% de los predios seleccionados.

El inventario bovino impactado fue de 24.373 cabezas. Así, se llevaron a cabo 1.267 diagnósticos reproductivos y de evaluación de 132 toros, se congelaron 1.150 pajillas de toros de las fincas, y con este producto se



realizaron inseminaciones. Igualmente, se monitoreó la producción de leche, de 3,5 a 15,7 l/vaca/día, y en calidad composicional de la leche se registraron valores de proteína entre 3,3-3,6%, de grasa entre 3,6-4,0%, y de sólidos totales entre 10,2-12,3%.

Por otra parte, en lo que se refiere a apropiación social del conocimiento, se llevó a cabo un trabajo colaborativo que propendió al fortalecimiento organizativo como estrategia de desarrollo comunitario.



En tal sentido se llevaron a cabo acciones de socialización, capacitación y transferencia de tecnología a través de metodologías participativas con las comunidades para la formación integral de 110 expertos agropecuarios, la creación de 11 empresas agropecuarias de índole asociativo en beneficio de las economías locales y el fortalecimiento de las capacidades de 87 asistentes técnicos agropecuarios del área de influencia.



Experiencias en la implementación (agro) silvopastoril en fincas del piedemonte del Meta

Generalidades del sistema agrosilvopastoril

¿Por qué vincular sistemas agrosilvopastoriles en la región?

Los modelos tradicionales de producción ganadera basados en el manejo de monocultivos de pasturas y potreros sin árboles han contribuido a la destrucción de áreas boscosas, generando problemas ambientales y conflictos con el uso del suelo que conllevan a la pérdida de biodiversidad, la degradación del recurso suelo (mayor vulnerabilidad a la erosión, compactación y lixiviación), reducción en la capacidad productiva, incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como afectaciones sobre los ciclos hidrológicos. En Colombia, particularmente, la tala de bosques pasó de 124.035 ha en 2015 a 178.597 ha en 2016, lo que representa una tasa de deforestación del 44%.

Ante ese panorama, la Orinoquia se viene constituyendo en un escenario para la integración del árbol en diferentes arreglos que han contribuido a reducir los impactos ambientales negativos característicos de los sistemas tradicionales de producción pecuaria y agrícola.



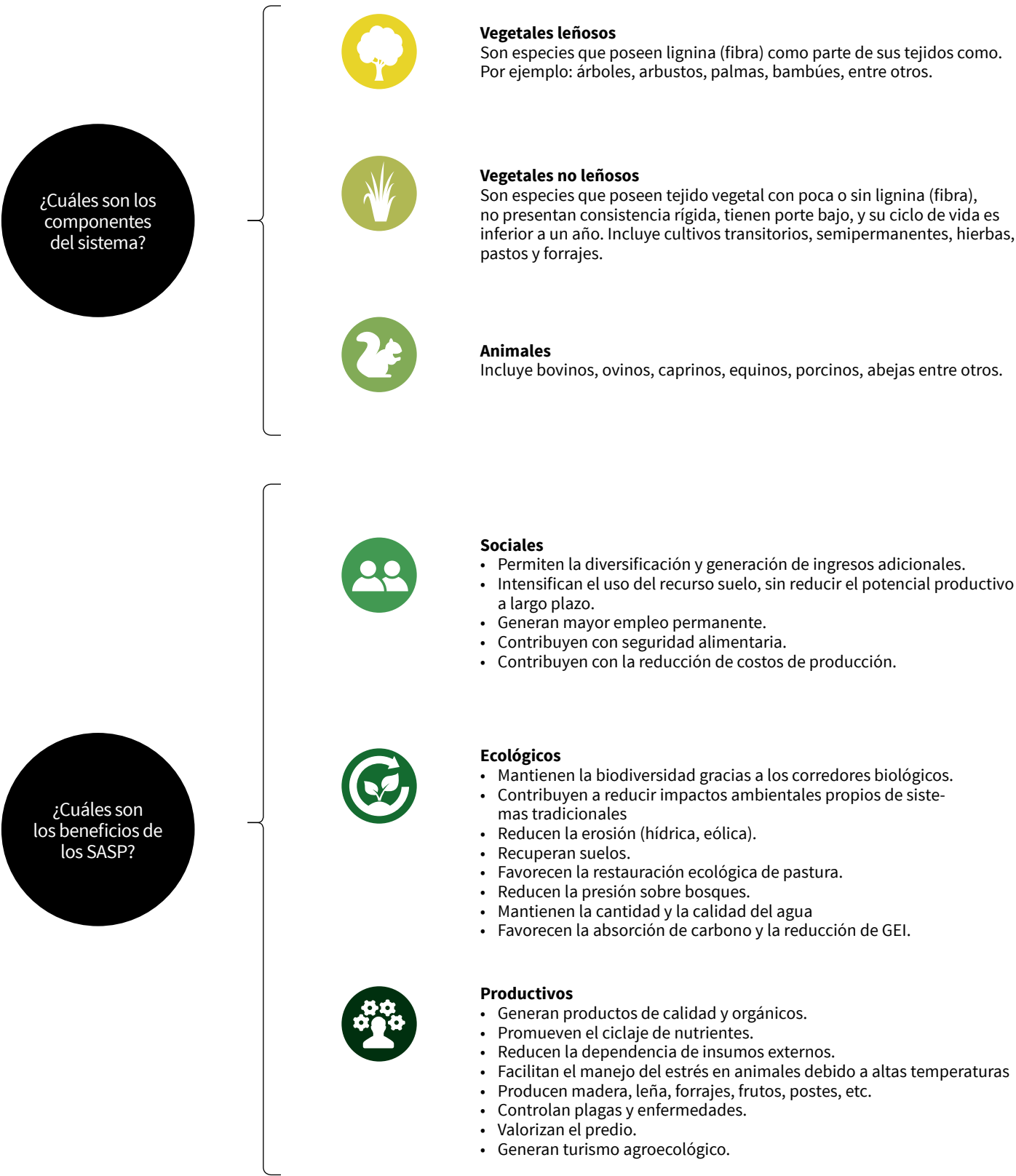
Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

Figura 74.
A. Uso del suelo en sasp
B. Servicios del árbol en el sistema
C. Productos del componente árbol

¿Qué es un sistema agrosilvopastoril?

Dentro de las múltiples definiciones, se puede resumir que un sistema agrosilvopastoril (SASP) es una modalidad de agroforestería que combina en el mismo

espacio plantas forrajeras (gramíneas y leguminosas), rastreras o herbáceas con cultivos forrajeros (maíz, sorgo, soya), así como con árboles, arbustos y animales, bajo un manejo integral orientado a mejorar la productividad del sistema en forma sostenible.



¿Como se implementaron los sistemas agrosilvopastoriles en fincas del piedemonte del Meta?

Los SASP del Meta se implementaron a través de un plan de manejo integral que partió del conocimiento de los componentes del sistema de producción

y de la aplicación práctica, por parte de los productores, de las alternativas tecnológicas (productos y recomendaciones) generadas por la investigación. El objetivo de dicho plan fue conservar, proteger y producir con calidad e inocuidad alimentos para el consumo humano, siendo amigables con el medio ambiente. Adicionalmente, los avances y resultados del manejo integral del sistema fueron transferidos a los diferentes usuarios de la tecnología (figura 75).

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

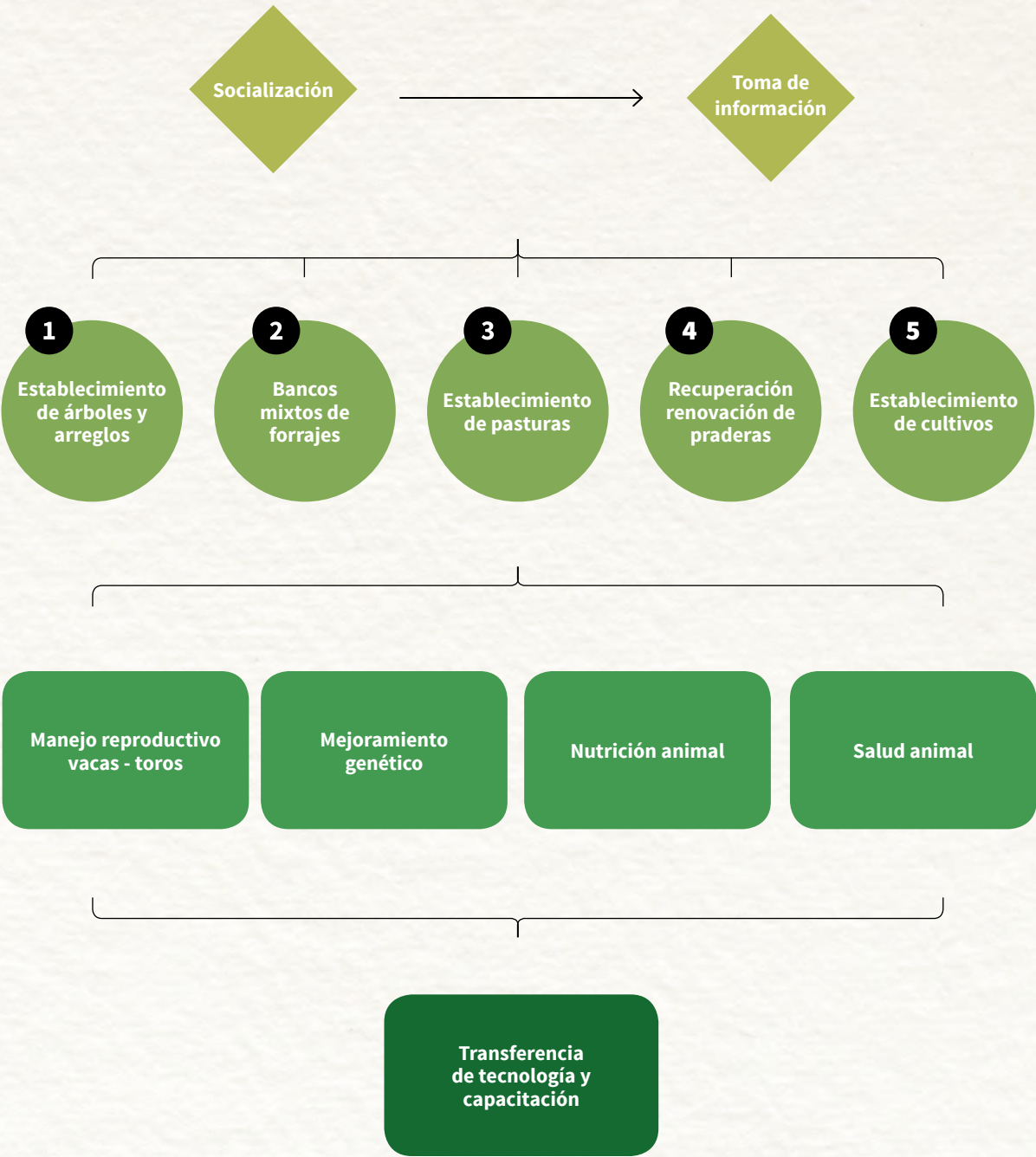


Figura 75. Esquema metodológico del manejo de componentes del sistema

¿Dónde se realizó la implementación de sistemas agrosilvopastoriles?

El proyecto se ejecutó en zonas del piedemonte llanero, con influencia de la Superintendencia de Operaciones Central (SOC) de Ecopetrol, en las microcuencas de los ríos Guamal, Orotoy y Ocoa, en jurisdicción de los municipios de Castilla La Nueva, Acacías, Guamal y Villavicencio, en el departamento del Meta.

Se intervinieron 108 predios, que sumaron un área de 19.890 ha, distribuidos en los municipios de Villavicencio (44,4%), Acacías (30,6%), Castilla La Nueva (22,2%) y Guamal (2,8%). Con base en el inventario bovino, el 67,1% de los predios inscritos en el convenio tenían entre 1 y 50 bovinos (pequeños y medianos productores); el 14,9%, entre 51 y 100 bovinos; el 15,8%, entre 101 y 500 bovinos, y solo el 2,2% contaba con más de 501 bovinos. Entre los sistemas de producción identificados en la zona se destaca el doble propósito (54,2%), seguido por el sistema de cría (22,2%), la ceba (15,7%), la lechería tecnificada (6,5%) y los cultivos (cacao) (0,9%).

¿Qué logros se obtuvieron?

A continuación se describen los resultados obtenidos en el periodo 2007-2015 a partir de la implementación de prácticas integrales de manejo en los sistemas de producción de los 108 predios intervenidos.

Componente suelos: análisis físico, químico y biológico

Los suelos presentaron características químicas propias de los oxisoles de la Orinoquia (IGAC, 2004), con alta acidez (pH de 4,6) y bajo contenido de materia orgánica (2,0-2,2%). Similar tendencia reportó el fósforo, elemento muy deficiente en los oxisoles sin intervención, con valores promedio de 1,8-2,2 ppm para la zona de Villavicencio y Castilla, Acacías, respectivamente. Con respecto a las bases intercambiables, el calcio presentó valores medios de 0,6 a 0,7 me.100g⁻¹ para Villavicencio y Castilla, respectivamente, y el potasio, de 0,1 me.100g⁻¹ de suelo en ambas zonas, mientras que la saturación de bases varió entre 25,4-30,1%. Con respecto a microelementos, se encontró que en las dos zonas los valores son bajos para el cobre y el zinc. Elementos como el fósforo, el azufre, el calcio, el magnesio, el cobre y el zinc presentan amplia variabilidad en los contenidos (CV>30%) como consecuencia de los diversos manejos del suelo en los predios (tabla 34).



Zona de Apiay, Villavicencio



Zona de Acacías, Castilla La Nueva

Parámetro	N	Mín.	Media	Máx.	IC	Mín.	Media	Máx.	IC
 pH	13	4,2	4,6	4,9	4,5 - 4,7	4,4	4,5	4,6	4,4 - 4,7
 Materia orgánica (MO) %	13	1,7	2,3	3,4	2,0 - 2,6	0,8	2,0	1,3	1,4 - 2,5
 Fósforo (P) ppm	13	1,0	1,8	5,0	1,1 - 2,4	1,0	2,2	5,0	-1,3 - 5,6
 Acidez intercambiable	13	1,1	2,8	4,3	2,3 - 3,4	1,8	2,5	3,4	1,3 - 3,7
 CIC efectiva	13	2,0	4,4	5,1	3,2 - 4,3	2,9	3,6	4,5	2,4 - 4,8
 Azufre (S) ppm	13	1,0	4,4	12,0	2,0 - 6,7	2,0	3,2	4,0	1,1 - 5,3
 Calcio (Ca) Me.100g ⁻¹	13	0,3	0,6	1,1	0,4 - 0,7	0,4	0,7	1,2	0,1 - 1,2
 Magnesio (Mg) Me.100g ⁻¹	13	0,1	0,1	0,4	0,1 - 0,2	0,1	0,2	0,2	0,1 - 0,3
 Potasio (K) Me.100g ⁻¹	13	0,1	0,1	0,2	0,1 - 0,1	0,1	0,1	0,2	0,1 - 0,2
 Aluminio (Al) Me.100g ⁻¹	13	0,8	2,0	3,2	1,6 - 2,4	1,3	1,7	2,4	0,9 - 2,6
 Boro (B) ppm	13	0,1	0,2	0,2	0,2 - 0,2	0,2	0,2	0,2	0,1 - 0,3
 Cobre (Cu) ppm	13	0,2	1,2	5,2	0,4 - 2,1	0,8	1,5	2,3	0,4 - 2,5
 Zinc (Zn) ppm	13	0,2	1,1	5,6	0,2 - 2,0	0,3	0,8	1,5	-0,1 - 1,6
 Saturación de bases %	13	13,2	25,4	48,6	18,8 - 31,9	18,2	30,1	43,4	11,6 - 48,6
 Saturación de Al %	13	34,3	53,4	62,5	47,9 - 58,8	36,1	47,4	58,4	33,9 - 61,0

*IC: intervalo de confianza.

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

←
Tabla 34. Características químicas de suelos del área de influencia (piedemonte llanero)

En relación con la física de suelos, los valores promedio de densidad aparente (1,40 y 1,43 g.cm⁻³) y porosidad (47,7 y 46,9%) reflejan problemas de compactación y limitantes para el desarrollo radicular de los cultivos, tanto para la zona de Villavicencio como para la de Castilla, Acacias (tabla 35). En condiciones óptimas, el valor de porosidad debe ser de 50%, mientras que valores inferiores denotan problemas de compactación y adensamiento del suelo.

Asimismo, para la densidad aparente se considera que valores superiores a 1,2 g.cm⁻³ indican problemas de adensamiento y compactación del suelo; valores menores, por otra parte, están relacionados con altos contenidos de materia orgánica. Este comportamiento fue confirmado a través de la medición de la resistencia del suelo a la penetración,

que arrojó valores superiores a 1,0 megapascuales (MPa) en los primeros 10 cm de profundidad del suelo en el 63% de los predios muestreados.

Los resultados después de la intervención (tabla 35) muestran una reducción en la densidad aparente y un incremento en la porosidad de los suelos con respecto a los valores iniciales, lo cual indica una menor compactación del suelo, que garantiza un mejor desarrollo de raíces y, en general, de los cultivos.

En relación con la parte biológica del suelo, el análisis de abundancia de macroinvertebrados reflejó que debajo de los árboles establecidos había mayor número de individuos en comparación con las pasturas adyacentes. Bajo la línea de árboles, en la época de lluvias se colectaron un total de 14.201

individuos, y en época seca, 2.459, mientras que en las pasturas se colectaron 4.491 y 2.262 individuos respectivamente (figura 76). En el análisis de abundancia, las isópteras (termitas) fueron los insectos con mayor población, con 17.502 individuos (74,75%), seguidas por las himenópteras (hormigas), con 3.799 individuos (16,23%).

Componente arbóreo: ¿cómo y cuales especies arbóreas se integraron en los sistemas?

La vinculación del componente arbóreo se inició con la multiplicación en vivero y la entrega de plántulas. De este modo se pudieron establecer, en diferentes arreglos en los predios, más de 100.000 plántulas de acacia (*A. mangium*), eucalipto (*E. pellita*), melina (*G. arborea*) y yopo (*A. peregrina*) en las

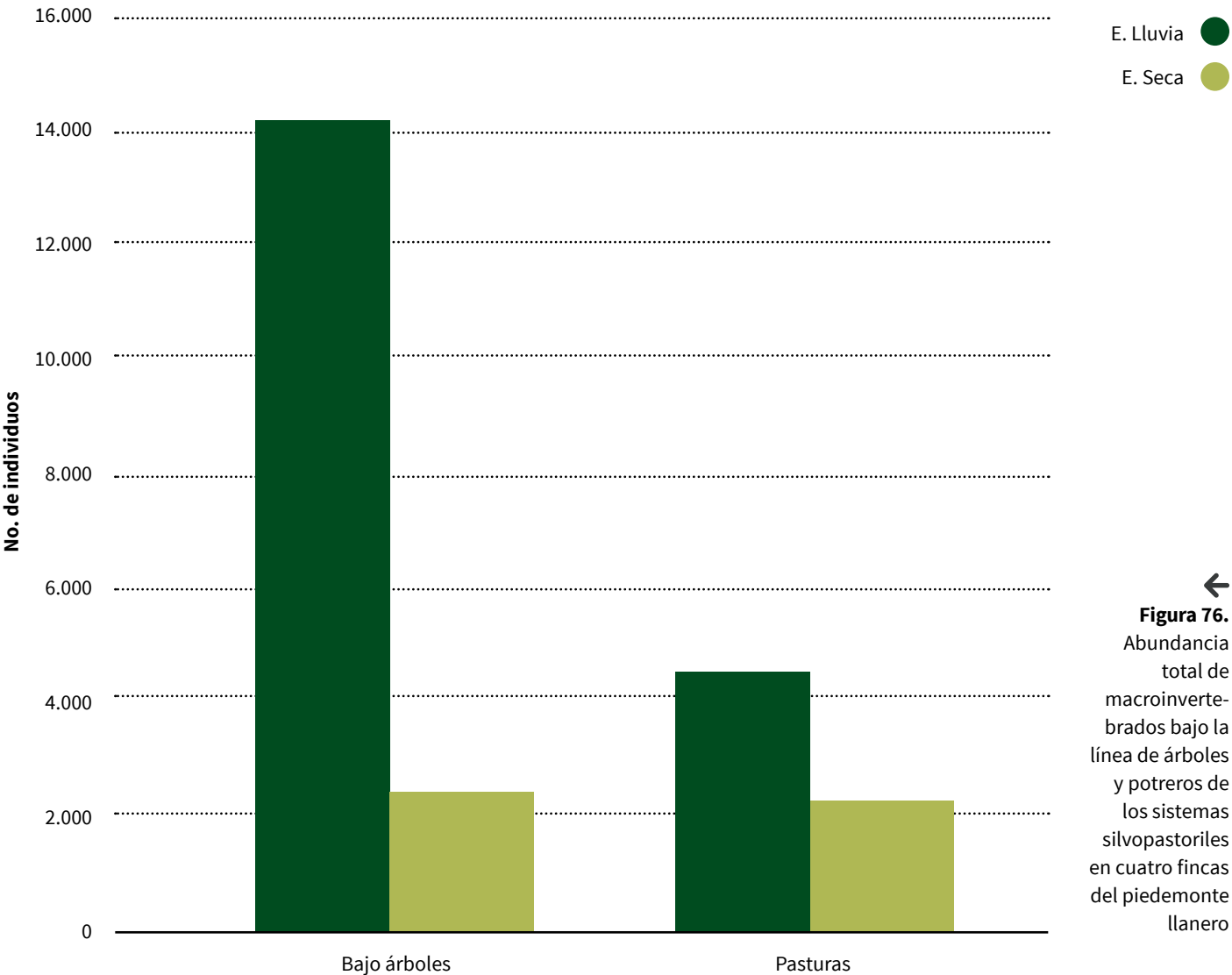
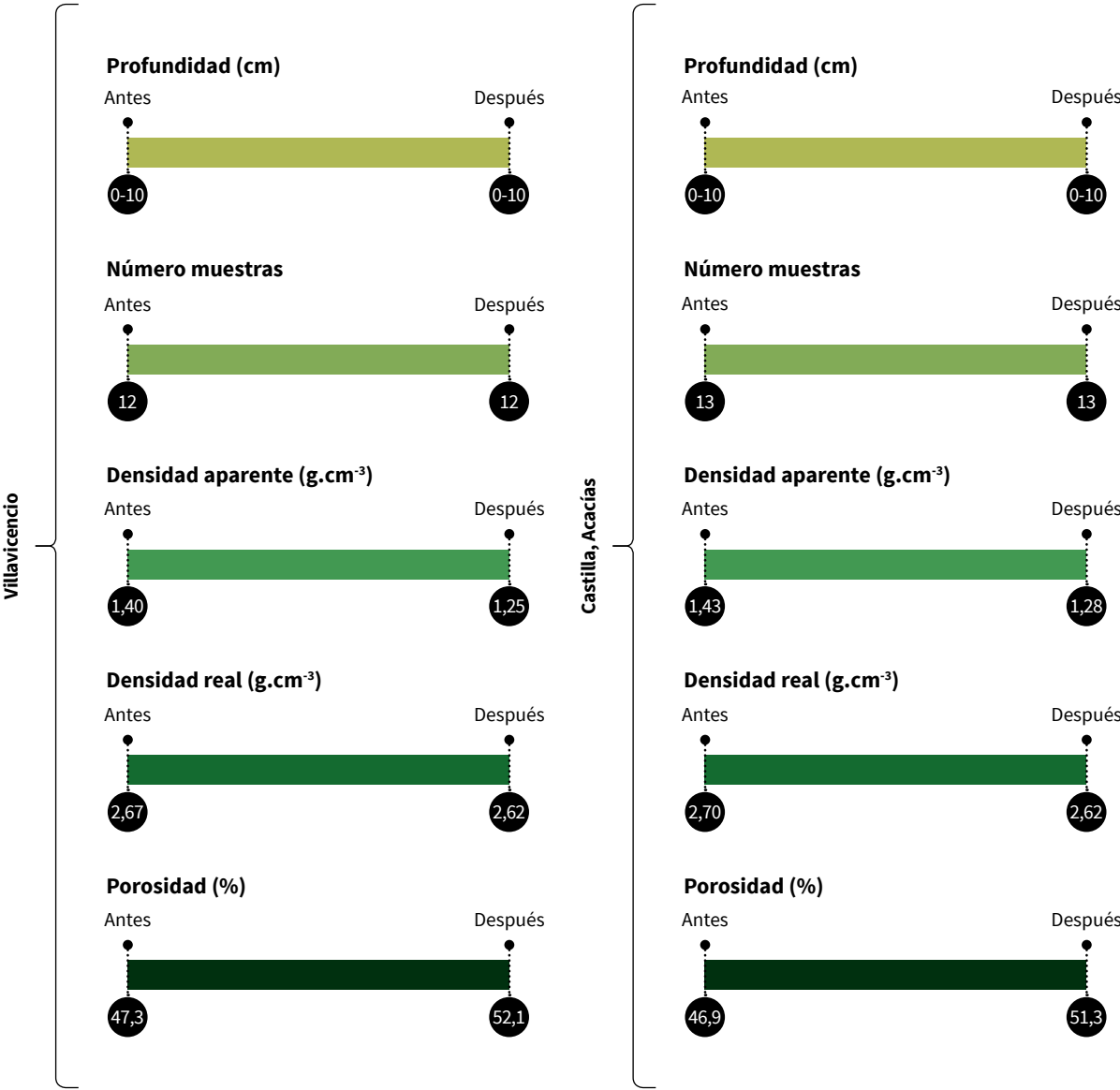
fases iniciales. Posteriormente, por interés de los productores se incluyeron especies como gualanday, yopa, cañofistola, machaco, orejero, chocho, tambor, patevaca y cratyliia, entre otras.

¿Qué arreglos agrosilvopastoriles se establecieron en los predios?

Para la implementación del sistema agrosilvopastoril se utilizaron diferentes arreglos, tales como cercas vivas (figura 77), cercas compuestas (franjales) de corredores ambientales (figura 78), plantaciones forestales (figura 79), árboles dispersos y bosquetes (figura 80), franjas en zonas de protección (figura 81), bancos forrajeros, entre otros. Los arreglos más adoptados en las fincas fueron las cercas vivas, con un 84%, y un 16% en franjas de dos o más hileras y bosquetes en potrero (Bueno, 2010; Bueno *et al.*, 2014).

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

→ **Tabla 35.** Características físicas del suelo antes y después de la intervención con sistemas agrosilvopastoriles en fincas del piedemonte llanero

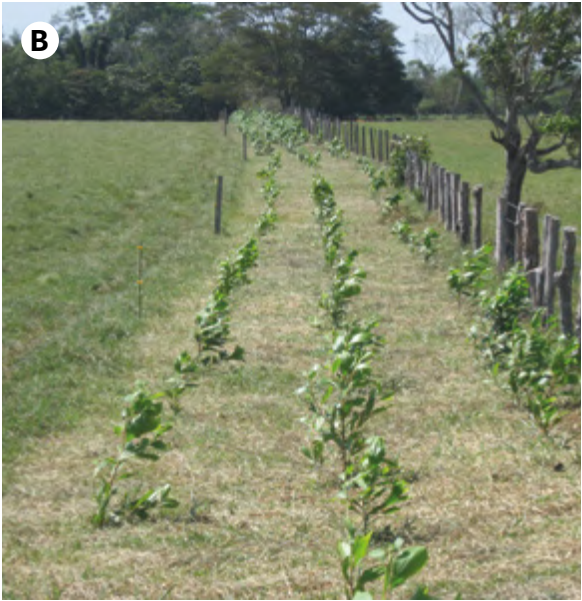


← **Figura 76.** Abundancia total de macroinvertebrados bajo la línea de árboles y potreros de los sistemas silvopastoriles en cuatro fincas del piedemonte llanero

→
Figura 77.
Árboles esta-
blecidos para
sombra en la
finca Bonanza
en Acacias: a.
Cercas vivas
sencillas,
b. Pastoreo
de bovinos
en áreas con
sombrio



→
Figura 78.
Cercas com-
puestas (fran-
jas)-corredor
ambiental



→
Figura 79.
Sistema agrosil-
vopastoril bajo
plantaciones
a. Maderables
b. Palma, en
Acacias



←
Figura 80.
a. Bosquete en
potrero, b. Árbo-
les dispersos en
la finca Santana
en Acacias



←
Figura 81.
Plantaciones
protectoras:
a. Contra la
erosión, b. En
bordes de ríos
en Guamal

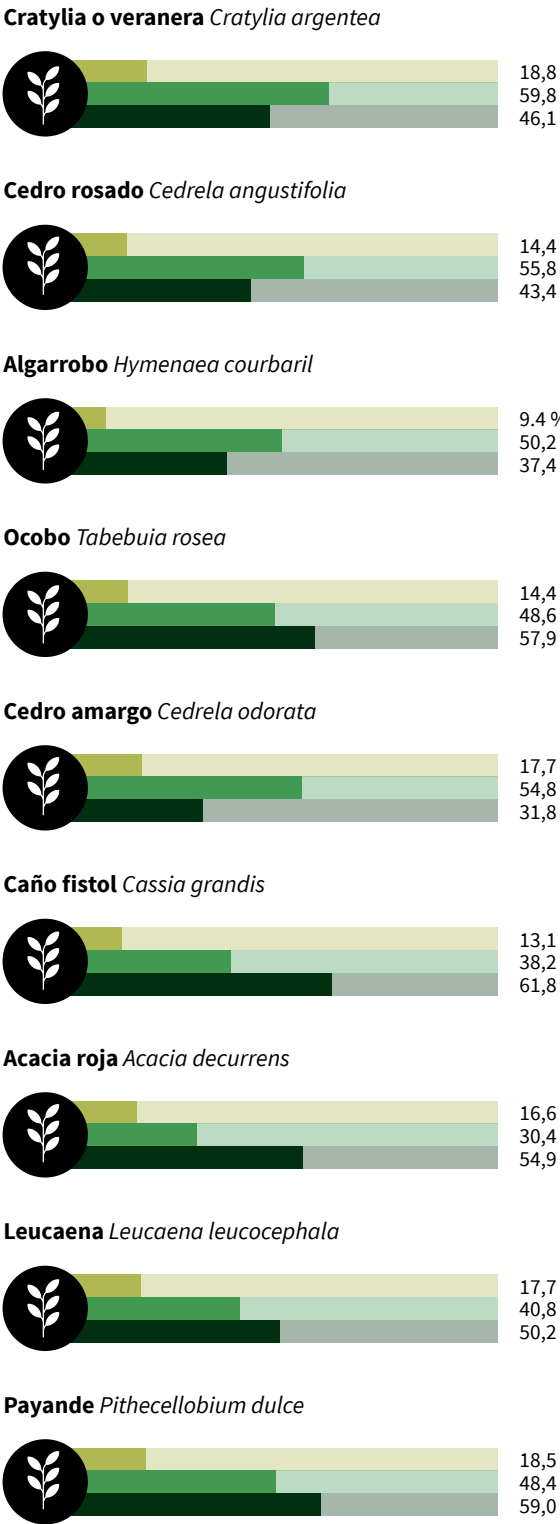
- PC (%)
- FDN (%)
- Degradabilidad (%)



Tabla 36.
Contenido nutricional del forraje de especies arbóreas establecidas en fincas del piedemonte llanero

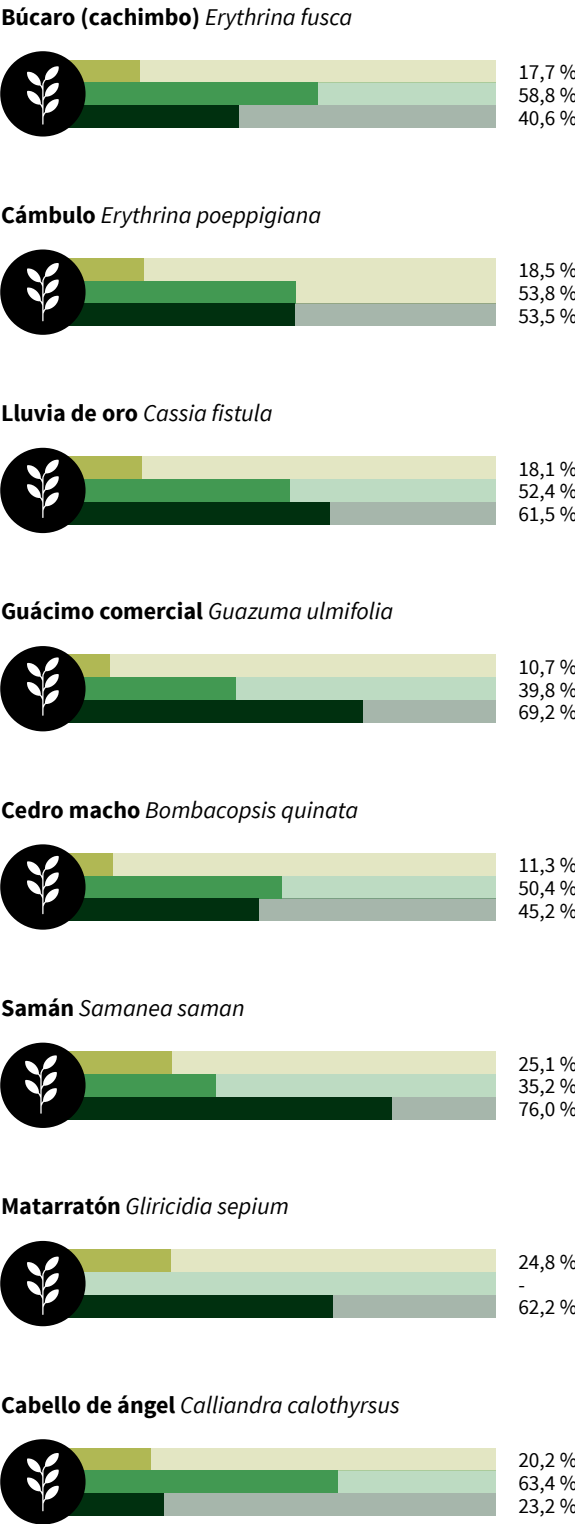
¿Qué árboles se establecieron y por qué su recomendación?

Una de las razones por las que se sugirió intercalar árboles con pastos, forrajes y cultivos es que de este modo se provee más diversidad al paisaje, al tiempo



*PC: Proteína cruda. FDN: Fibra detergente neutro

que se restauran áreas y se provee alimento o sombrío. La tabla 36 presenta una muestra de especies arbóreas y arbustivas que, por su adaptación a condiciones de suelo, clima y usos potenciales, desempeñan un papel importante en el desarrollo de sistemas agropecuarios sostenibles para la región.



Para ilustrar los resultados, se utilizó información de cuatro especies arbóreas establecidas en diferentes predios. La edad de los árboles fluctuó entre 4,1-4,7 años, y la mayor altura de acacia se reportó en la finca Santa Ana, con 15,5 m, seguida por el eucalipto (15,2 m), la melina (14,7 m) y el yopo (11,4 m). En las fincas Canaima I y Quenane, las de mejor crecimiento fueron la acacia y el eucalipto, mientras que para la finca Gran Valle los materiales estuvieron por debajo de los 10 m. Con base en las mediciones, se estimó el número de



Tabla 37. Cálculo del número de árboles para establecer por hectárea para sombra

Ítem	Símbolo o fórmula	Especies			
Factor de oclusión	FO	0,50	0,70	0,75	0,80
Diámetro copa 1 (cm)	D1	8,60	6,50	8,70	7,80
Diámetro copa 2 (cm)	D2	7,90	5,80	6,90	5,20
Diámetro medio copa (cm)	DPC=(D1+D2)/2	8,25	6,15	7,80	6,50
Área copa (m²)	AC=π/4*DPC²	53,46	29,70	47,78	33,18
Área sombra (m²)	AS=AC*Fo	26,73	20,79	35,83	26,54
N.º árboles.ha ⁻¹ *	#A.ha ⁻¹ =(10000*0,3)/AS	112	144	83	113

*La producción de forrajes (pastos) se reduce enormemente cuando la cubierta de la copa (sombra) de los árboles excede 35% (Centro Nacional de Agroforestería *et al.*, 1997).



Yopo



Eucalipto



Melina



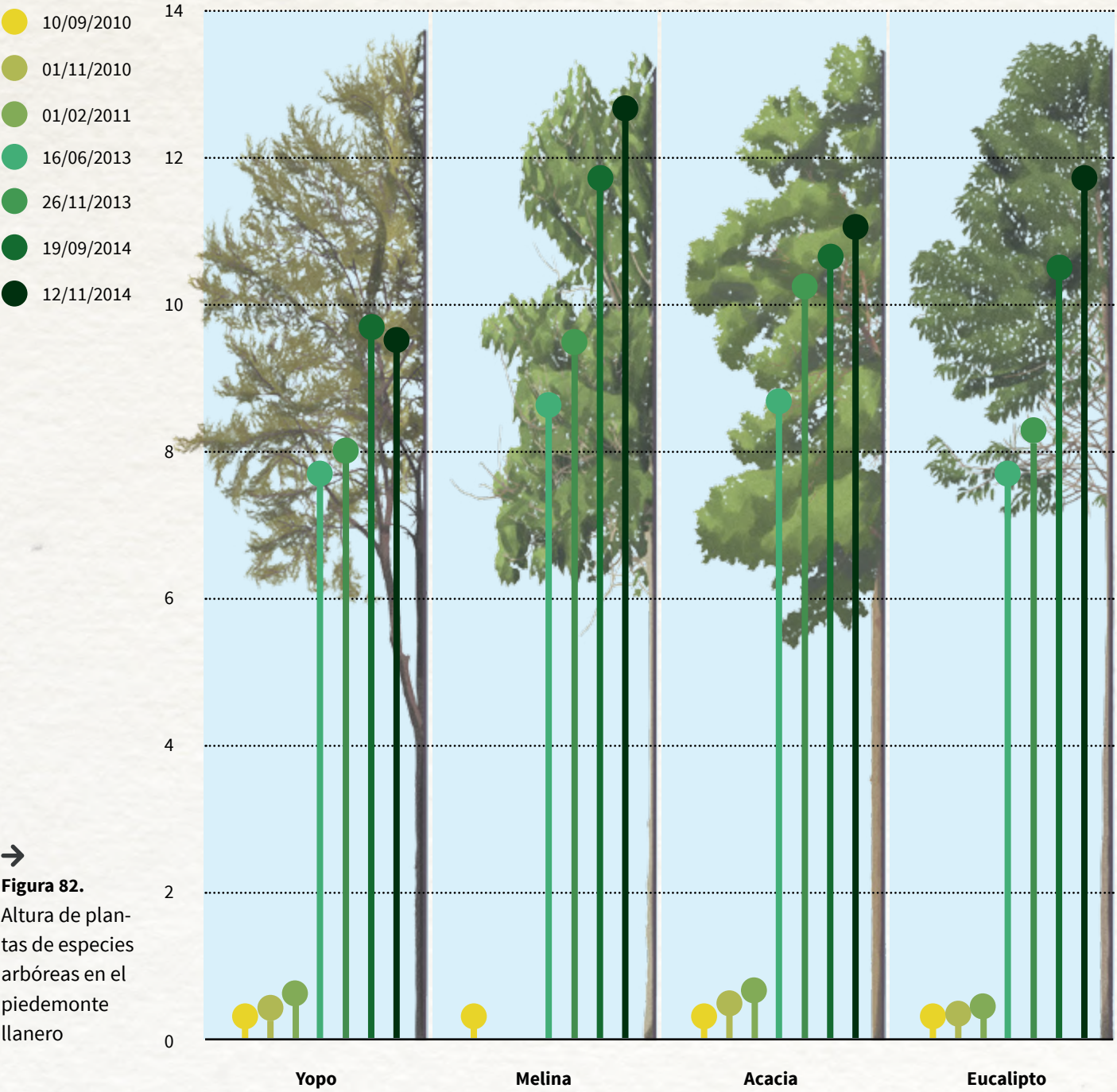
Acacia

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

En el ASA, en la vereda Santa Rosa, se establecieron en arreglo de cerca viva bajo condiciones de riego permanente los perímetros de los potreros y se introdujeron pequeños bosquetes dentro de los potreros que arrojaron un crecimiento estimado para yopo, melina, acacia y eucalipto a los 4,1 años de 0,6, 0,8, 0,72 y 0,74 cm.día⁻¹ respectivamente, con una altura de planta de 9,7, 12,6, 11,1 y 11,3 m y un DAP de 19,5, 28,4, 24,6 y 14,3 cm. En particular, se destaca la melina con una altura de 12,6 m (figura 82).

Componente alimenticio: ¿por qué y para qué los cultivos forrajeros?

Las condiciones extremas tanto en época de lluvias como en la de sequía afectan negativamente la productividad de los sistemas ganaderos. Esto motivó la integración de cultivos forrajeros tales como los de maíz, sorgo JJT-18 y soya forrajera (Taluma 5), los cuales fueron utilizados por los productores como alternativa de alimentación para las épocas críticas y para animales con mayor exigencia



→ **Figura 82.** Altura de plantas de especies arbóreas en el piedemonte llanero

nutricional mediante su conservación como ensilaje (Pérez *et al.*, 2010).

Estas actividades se desarrollaron en 42 predios que sumaron 57,2 ha con rendimientos de forraje verde (FV) entre 17-49 t.ha⁻¹. Este rango amplio se debió a múltiples factores aún por solucionar en la región (clima, equipos agrícolas, costos de los insumos, AT, crédito, entre otros). Como consecuencia, en los cambios en el volumen producido de FV los costos de producción por kilogramo de ensilaje variaron entre COP 98 y COP 292. En forma general, los costos por hectárea para la producción de ensilaje fluctuaron entre COP 4.530.00 y COP 5.150.000, distribuidos en insumos y semillas (maíz-pastos) (62,1%), maquinaria (21,2%), mano de obra (4,1%), otros materiales (melaza, bolsas plásticas) (6,9%) y transporte (5,7%).

La problemática de contar con la maquinaria y los equipos para realizar las diferentes actividades que requiere la elaboración de ensilaje llevó a orientar a algunos productores que contaban con equipos para que prestaran el servicio a otros productores en la zona. En desarrollo del proyecto, por iniciativa e inversiones propias, se establecieron tres prestadoras del servicio, lo que ha llevado a mantener y ampliar la actividad en varios municipios del piedemonte.

Uso de bancos forrajeros mixtos

Los bancos forrajeros mixtos (energético-proteico) fueron otra estrategia desarrollada y aceptada por algunos productores en el marco del convenio Agrosavia-Ecopetrol. El propósito de esta alternativa era suplementar a los animales e intensificar el uso del suelo en las áreas dedicadas al pastoreo mediante la siembra y el aprovechamiento de especies forrajeras en alta densidad, con el objeto de mejorar la oferta de biomasa por unidad de área (Bueno *et al.*, 2015). Los materiales establecidos fueron: pastos de corte del género *Pennisetum* sp., botón de oro (*Tithonia diversifolia*), cratylia (*Cratylia argentea*) y melina (*Gmelina arborea*). Se establecieron 25,2 ha, distribuidas en 50 fincas de Villavicencio (49,7%) y de Acacias, Castilla y Guamal (51,3%). En bancos de proteína, la producción de forraje verde fluctuó entre 30-60 t.ha⁻¹, con contenidos de proteína cruda (PC) entre 12-24%. Para el caso de los energéticos, la producción varió entre 60-86 t de FV.ha⁻¹ con contenidos de PC entre 5-9% (figura 83).



Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

← **Figura 83.** Bancos forrajeros mixtos: arriba melina y pasto King grass, centro picado mecánico, abajo consumo directo de Cratylia por bovinos

¿Cuáles son los beneficios de los bancos forrajeros mixtos?



Económicos

- 1 Aumento en la oferta y en la calidad de forraje.
- 2 Reduccion del efecto de la estacionalidad.
- 3 Disminución en los costos de suplementación.



Sociales

- 1 Uso más eficiente del recurso suelo para diversificar la producción.
- 2 Generador de empleo por actividades de corte, acarreo y otras.
- 3 Mejora en los ingresos y mejor calidad de vida.



Ambientales

- 1 Mantener el área de pastoreo para no afectar el bosque.
- 2 Dar cobertura al suelo para evitar problemas de erosión.
- 3 Mejorar la dieta animal y de esta manera reducir emisiones de metano.
- 4 Captura de carbono.

¿Qué pasó con las pasturas?

La base alimenticia de los bovinos más amplia, práctica y económica, que corresponde a los pastos, se intervino de acuerdo con la presencia y/o nivel de degradación de las pasturas introducidas en los predios, diagnóstico que definió el tipo de práctica que se debía realizar (renovación, establecimiento y/o recuperación de praderas) (Rincón, 2006). Se intervinieron 251 hectáreas, con un área por predio que varió entre 1-4 ha, de acuerdo con los recursos, las necesidades y el tipo de productor. La intervención en fincas de Villavicencio representó el 49,5%, y el restante 50,5% correspondió a los municipios de Acacías, Castilla La Nueva y Guamal. Los materiales más utilizados fueron

pasto amargo (*Brachiaria decumbens*), pasto llanero (*B. dictyoneura*), pasto toledo (*B. brizantha*) y maní forrajero (*Arachis pintoi*) (figura 84).

La evaluación del contenido nutricional del pasto amargo en época de lluvias arrojó que la proteína cruda (PC) fue mayor en el forraje bajo los árboles (melina, acacia y yopo) con valores entre 8,5-10,4% vs. 7,4% con manejo tradicional, comportamiento que se mantuvo para la época seca. De igual manera, la digestibilidad de la materia seca en el sistema silvopastoril, en comparación con el sistema tradicional, fue del 68,6% vs. 65% en época de lluvia y de 60,8% vs. 57,7% en época seca (tabla 38). Los resultados muestran el beneficio del árbol sobre el suelo y sobre las especies forrajeras.

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol



Figura 84. a. Preparación de suelos b. Mezcla de correctivos y semilla c. Carga animal d. Pastoreo en rotación

→ **Tabla 38.**
Calidad nutri-
cional de *B.*
decumbens en
sistemas silvo-
pastoriles vs.
Tradicional

Experiencias en la
implementación
de sistemas
agrosilvopastoriles
y apropiación
social del convenio
Agrosavia-
Ecopetrol

Sistema	Arreglo	Materia seca (%)		Proteína cruda (%)		FDN (%)		Digestibilidad (%)	
		Lluvia	seca	Lluvia	seca	Lluvia	seca	Lluvia	seca
Silvopastoril	<i>A. Mangium</i> - <i>B. decumbens</i>	24,9	45,4	8,9	7,4	69,6	67,0	67,2	57,2
	<i>G. arborea</i> – <i>B. decumbens</i>	27,0	37,5	8,5	6,1	69,4	73,8	69,1	61,1
Tradicional	<i>A. peregrina</i> – <i>B. decumbens</i>	23,4	46,1	10,4	8,1	70,8	67,5	69,4	64,0
	<i>B. decumbens</i>	29,4	46,0	7,4	5,7	70,8	69,9	65,0	57,7

Sistema agroforestal
árboles - cacao en fincas

En el municipio de Acacías, en San Pedro de Chichime-
ne, tres núcleos familiares implementaron árboles en el
cultivo cacao con un área aproximada de 8 ha, com-
plementados con la siembra de árboles de cañafistol,
melina y yopo en las calles del cultivo a una distancia
de 10 x 10 m para dar sombrío al cacao, siguiendo la
recomendación técnica de la Federación de Cacaoteros.

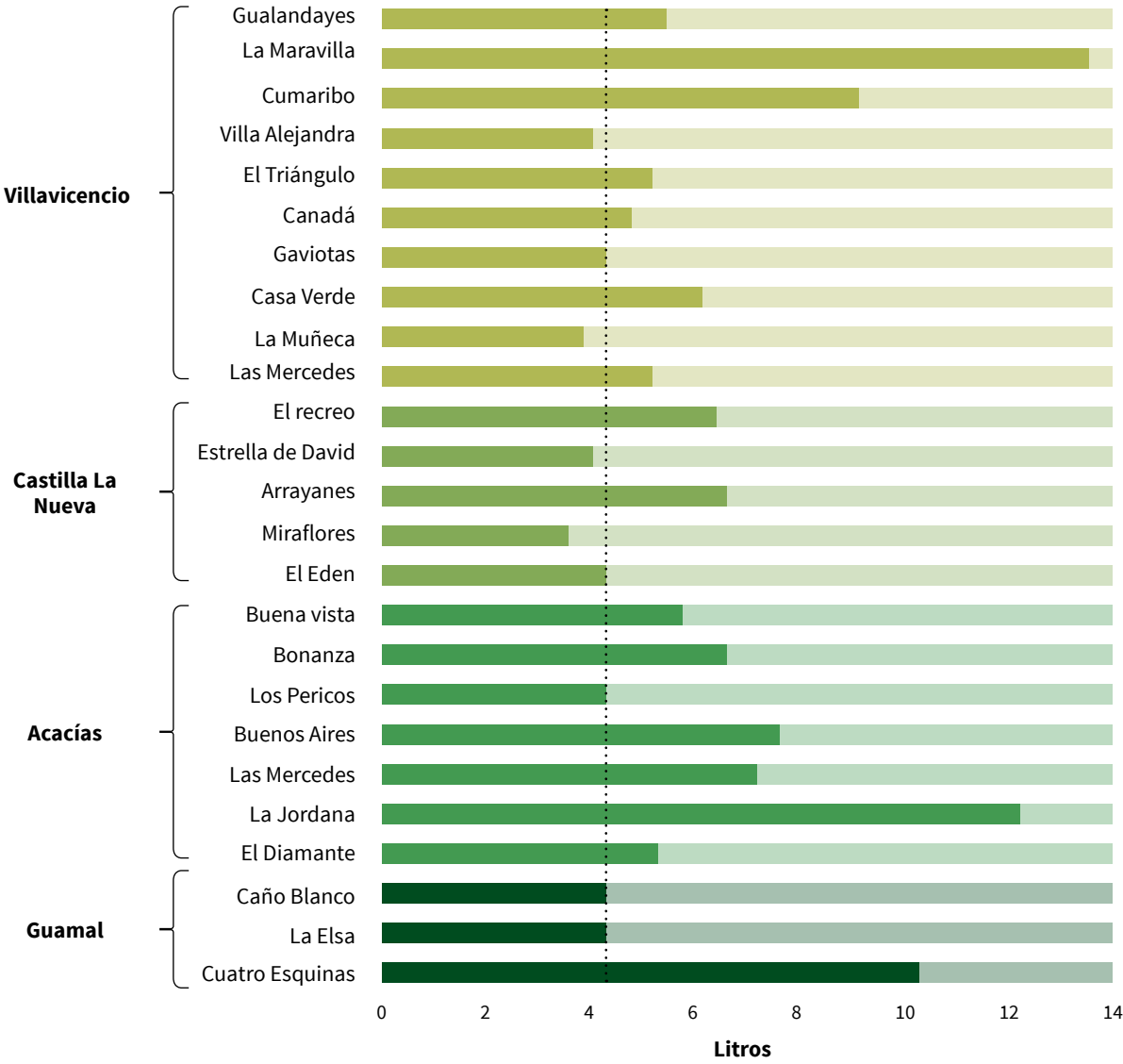
Componente animal:
comportamiento zootécnico

El inventario de ganado en los predios adscritos al pro-
yecto sumó 24.373 cabezas, distribuidas de la siguien-
te manera: en la zona de Villavicencio-APIay, el 24,2%;
en Acacías, el 47,1%; en Castilla La Nueva, el 27,6%, y
en Guamal, el 1,1%. La producción promedio de leche
en el área de influencia del proyecto por municipio
varió entre 4,4 y 9,2 l/vaca/día, se realizaron 1.267
diagnósticos reproductivos y se llevaron a cabo más
de 189 tratamientos farmacológicos en hembras. Ade-
más, se evaluaron 132 toros, de los cuales se descartó
el 30%. Igualmente, se congelaron 1.150 pajillas de
toros en las fincas y se realizaron 504 inseminaciones.
El establecimiento de árboles en los sistemas
ganaderos del área de influencia se vinculó como
una estrategia dentro de las buenas prácticas
ganaderas (BPG). El propósito de esto fue inten-

sificar el sistema y brindar bienestar mediante
el suministro de sombra a los animales frecuen-
temente expuestos a las altas temperaturas y a
la alta humedad relativa propias de la region.

Producción de leche de vacas doble pro-
pósito en predios del área de influencia
del convenio

La observación de algunos productores y los registros
de producción de leche y carne en algunos predios
permitieron verificar mejoras en los indicadores de
los sistemas que estuvieron asociadas a la vinculación
de productos y a la aplicación de recomendaciones
tecnológicas de forma integral dentro del hato en lo
relacionado con el manejo de animales, el manejo de
praderas, el mejoramiento de la oferta y la calidad de
la dieta animal a través de pastos, cultivos y bancos
forrajeros, el uso de ensilajes, el chequeo y manejo
reproductivo de toros y de vacas, el mejoramiento
genético y el bienestar animal, complementados con
aspectos sociales como la capacitación y el fortaleci-
miento a asistentes técnicos y productores, tomando
como base el nivel tecnológico de los predios identifi-
cado al inicio del proyecto. Un ejemplo es la produc-
ción de carne, que en machos de ceba pasó de 493 a
más de 600 g/an/día, y en vacas de saca, de 420 a más
de 460 g/an/día. Para el caso de la leche, por la varia-
ción en el nivel tecnológico de los predios se encontró
un rango entre 3,5-15,7 l/vaca/día (figura 85).



← **Figura 85.**
Producción
promedio de le-
che (l/vaca/día)
en fincas del
área de influen-
cia del proyecto
(2012-2015)

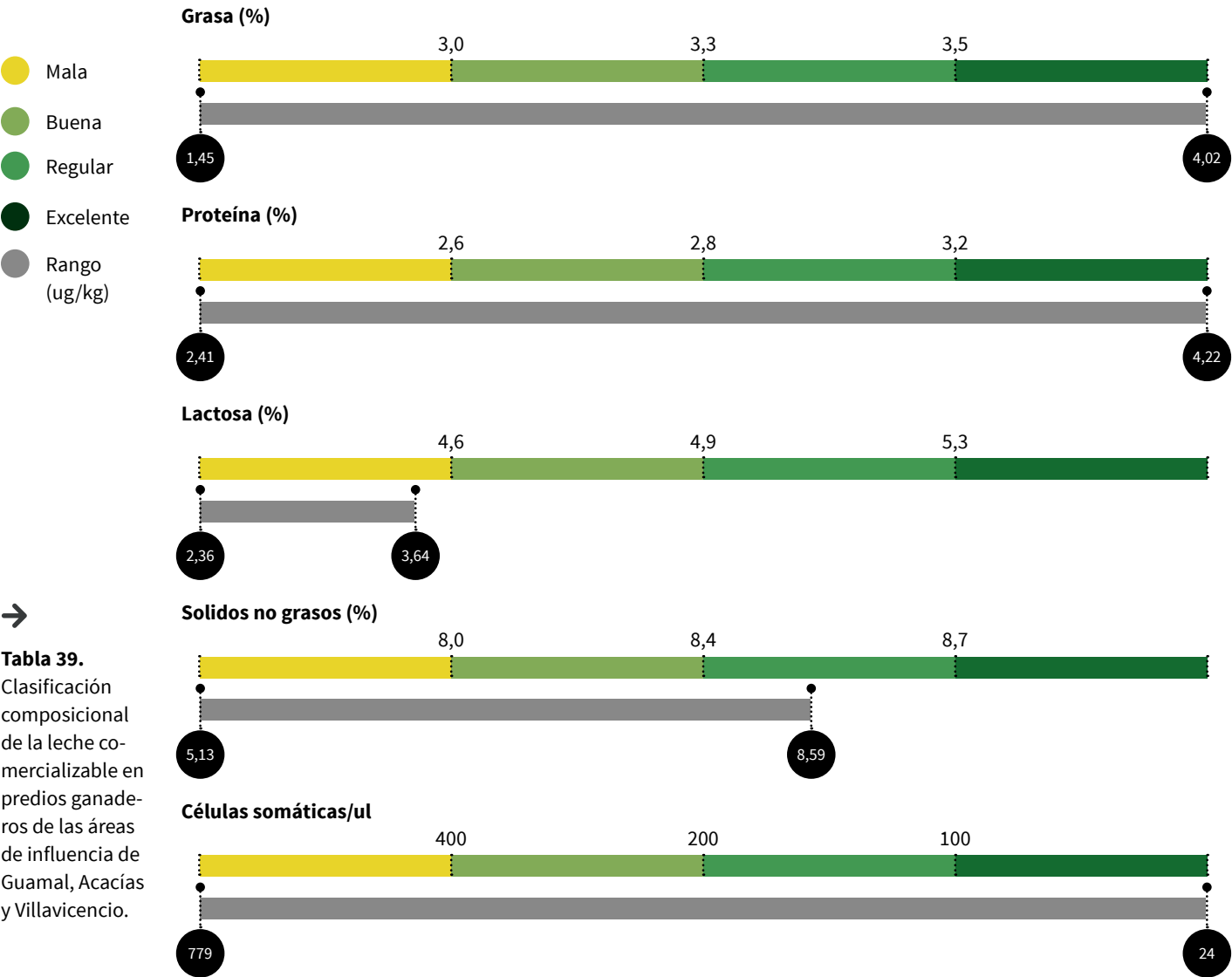
Un ejemplo del proceso fue la finca La Maravilla (Villavicencio), en donde el monitoreo durante un año permitió observar que la producción media de leche se mantuvo en 10,2 l/vaca/día, sin reportar las pérdidas de más del 30% que, en la mayoría de los casos, se dan en la época seca (diciembre-febrero).

En relación con la calidad composicional de la leche del sistema doble propósito, el análisis realizado en ocho predios arrojó variaciones en los contenidos de proteína (3,3-3,6%), de grasa (3,6-4,0%) y de sólidos totales (10,2-12,3%). Estos valores se pueden comparar con la tabla 39, basada en Calderón *et al.* (2006). Para el caso bacteriológico (células somáticas), el 75% de los predios superó los valores permisibles, lo que indica que se debe trabajar más en esta área para ofrecer un producto primario de buena calidad higiénica no solo para consumo, sino para su transformación (Bueno *et al.*, 2016).

Aprendizajes

Las evidencias planteadas a lo largo del documento revelan, desde una visión ecológica y productiva, que la estrategia implementada de los SASP contribuye a los procesos de adaptación y mitigación de manera positiva, pues coadyuva con el mantenimiento, la recuperación y la conservación de los recursos naturales. Asimismo, esta es una alternativa que permite frenar la presión sobre los bosques y sostener la capacidad productiva de los sistemas ganaderos, tal como lo reflejan los resultados técnicos, teóricos y prácticos que contribuyen con el desarrollo sostenible de la ganadería.

De esta manera, las áreas de influencia del convenio se han convertido en un ejemplo de gestión institucional y de modelos físicos de implementación de tecnologías integrales en la región, replicables en otras localidades del piedemonte llanero y del país.



Apropiación social del conocimiento de los resultados del convenio Agrosavia-Ecopetrol

Experiencias en la implementación de sistemas agrosilvopastoriles y apropiación social del convenio Agrosavia-Ecopetrol

Plan de capacitación y formación de expertos

Un objetivo planteado en el desarrollo del convenio entre Agrosavia y Ecopetrol fue promover la creación de empresas en comunidades rurales mediante procesos de capacitación, asesoría y acompañamiento y formar expertos en técnicas y tecnologías agropecuarias que contribuyeran a la solución de necesidades específicas. Para dicho fin se preparó un programa de capacitación a la luz de aspectos clave como objetivos del curso, proceso metodológico, requerimientos, seguimiento y evaluación. La metodología de estructuración estuvo fundamentada en los principios de unidad, prevención, equilibrio y participación, y el plan de capacitación se estructuró a partir del diseño de tres componentes: el técnico, el económico y el psicosocial.

Componente técnico

El objetivo general de este componente se determinó a partir de la evaluación de necesidades y de la orientación, teniendo en cuenta si se refería a conformación de empresa o a formación de expertos. Esto contribuyó a la selección de contenidos y a determinar el enfoque y la forma en que se desarrollarían los temas, así como los métodos de evalua-

ción para utilizar en el proceso de capacitación. La convocatoria de las capacitaciones se realizó a través de las alcaldías municipales, entidades del orden nacional, asociaciones y planteles educativos del área de influencia de Ecopetrol, quienes seleccionaron sus asistentes técnicos. Así se estructuraron y ejecutaron los cuatro cursos relacionados a continuación.



1

Establecimiento y manejo de
pastos y forrajes en suelos ácidos

Objetivo: Capacitar a productores, asistentes técnicos y docentes sobre el establecimiento, manejo y recuperación de praderas, y en la implementación de sistemas agropastoriles y silvopastoriles en suelos ácidos de la Orinoquia como estrategia para mejorar la productividad ganadera (figura 86).

Participantes: 17 personas: 29% ingenieros agrónomos, 50% médicos veterinarios zootecnistas, 7% licenciados en producción agropecuaria, 7% ingenieros agroforestales y 7% veterinarios. De estos participantes, un 86% manifestó tener conocimiento de lo que es una empresa prestadora de servicios agropecuarios (Epsagro), y 57% afirmó estar interesado en conformar una.

↓
Figura 86. Actividades del curso de establecimiento y manejo de pastos y forrajes en suelos ácidos



2

Establecimiento y conservación de
forrajes para producción de ensilaje

Objetivo: Capacitar a productores y a asistentes técnicos en aspectos relacionados con el establecimiento, el manejo y la cosecha de cultivos con potencial forrajero, así como en estrategias de conservación y de uso de forrajes conservados en sistemas de producción animal.

Participantes: 68 personas.

Programación temática: Se desarrolló en dos fases: una teórica, donde se abordó lo relacionado con agroecología, especies forrajeras, establecimiento de cultivos y forrajes en los llanos orientales, y una práctica, cuyo desarrollo se enfocó en cosecha, conservación y uso de forrajes.

↓
Figura 87. Actividades del curso sobre establecimiento y conservación de forrajes para producción de ensilaje



3

Calibración, mantenimiento y
reparación de maquinaria agrícola

Objetivo: Capacitar a trabajadores, productores y jóvenes con vocación agropecuaria en la calibración, el mantenimiento y la reparación de máquinas utilizadas en los sistemas de producción agropecuarios.

Participantes: Productores y personal de la gobernación, 15 en total.

↓
Figura 88. Actividades del curso sobre calibración, mantenimiento y reparación de maquinaria agrícola



4

Inseminación artificial
en bovinos

Objetivo: Capacitar a los ganaderos, participantes y asistentes en prácticas adecuadas de inseminación artificial, así como en el manejo de los diferentes aspectos físicos del animal, la detección del celo, los cuidados preventivos a la hora de inseminar y la nutrición animal.

Participantes: 10 productores de la región.

↓
Figura 89. Actividades del curso sobre inseminación artificial



Componente empresarial

El objetivo general de este componente fue ofrecer herramientas conceptuales y metodológicas para el fortalecimiento del sector social y solidario en las comunidades objeto de intervención³. Para

ello se desarrolló un curso en el que participaron 11 personas afiliadas a distintas asociaciones, con los siguientes módulos temáticos: capacitación y formación —curso básico y medio de economía solidaria—, fortalecimiento empresarial y asesoría empresarial tributaria.



→
Figura 90.
Actividades
del curso
empresarial

3. Este programa se estructuró junto con Corporación Somos, entidad avalada por el Departamento Administrativo Nacional de la Economía Solidaria.

Componente psicosocial

El propósito de este tercer componente fue contribuir a la conformación de grupos empresariales o de emprendimiento con capacidades de gestión, discusión e interacción social y toma de decisiones para el fortalecimiento de las economías locales de las comunidades. La orientación temática tuvo como foco el desarrollo de la actitud y cultura emprendedora a través del pensamiento creativo y de la generación

de ideas empresariales locales. En este caso se utilizó la modalidad de taller en encuentros quincenales durante un año. Estas sesiones se iniciaban con una dinámica de integración, seguida de una presentación de lo referente al componente psicosocial, y luego se hacía trabajo en grupos para concluir con una reflexión de la actividad. También se diseñaron pruebas psicotécnicas que permitieron conocer e identificar el nivel de habilidades sociales que los participantes del curso tenían al inicio del entrenamiento psicosocial.



←
Figura 91.
Actividades del
componente
psicosocial



Conformación de empresas

Durante el proceso de capacitación integral llevado a cabo, se identificaron las iniciativas productivas que se presentan en la tabla 40. Con este grupo

se inició el proceso de elaboración de planes de negocios, teniendo como objetivo establecer en un documento escrito la descripción de los negocios proyectados y todo lo que se relaciona con ellos: desde sus objetivos y las estrategias que permitirán alcanzarlos, pasando por el mercado al cual se va a incursionar, la forma en que se van a comercializar los productos o servicios, la inversión que se va a realizar, el financiamiento requerido, la proyección de los ingresos y egresos y la evaluación financiera, hasta la misma organización general del negocio o proyecto.

Nombre		Municipio	Producto	Asociados	
	Corporación Pura Pulpa	Villavicencio - Vegas de Guayuriba	Pulpa de frutas		5
	Artmeta	Villavicencio - La Vigía	Artesanías		3
	Mineral´s Cosmeica	Villavicencio - Llano Lindo	Mascarillas naturales		2
	Corpoagrometa (corporación Agropecuaria del Meta)	Villavicencio - Arayanes y El Cairo	Ensilajes		4
	Corporación Asoespago	Villavicencio - Vegas del Guayuriba y Barcelona. Restrepo - El Cairo. Puerto López	Prestación de ATA		7
	Vegas del Guayuriba	Villavicencio	Conservación de forrajes		3
	Corporación Reunamos Colombia	Villavicencio - Apiay y casco urbano. Acacias - Patio Bonito	ATA pequeños y medianos productores		10
	Corporación de Ahorro y Préstamo CAP	Villavicencio	Fondo de ahorro		13
	Asoagroteubleque	Puerto López - Puerto Tembleque	Cultivos agropecuarios y comercializados		15 flías.
	Setas del Guayuriba	Acacias - Guayuriba y el Playón	Orellanas		12
	Lácteos el Playón. Asoplayón	Acacias	Derivados lácteos		6

→
Tabla 40.
Empresas conformadas en el marco del proyecto



Estrategias de educación no formal y continuada

En el marco del convenio se observó una oportunidad de programar y desarrollar una estrategia de educación no formal con miras a vincular y fortalecer las capacidades y competencias de los profesionales prestadores del servicio de asistencia técnica agropecuaria en el departamento del Meta. De ahí la estructuración y ejecución de tres diplomados, cuyo modelo pedagógico estuvo enmarcado en los conceptos del aprendizaje significativo constructivista (Saldarriaga y Loor Rivadeneira, 2016), donde el tutor es un facilitador del proceso bajo la estrategia de enseñanza/aprendizaje y el participante-adulto es el primer y principal recurso. De esta manera se busca que este último, apoyado en sus conocimientos y experiencias anteriores, pueda construir nuevo conocimiento y desarrollar competencias y habilidades necesarias para llevar a cabo sus actividades profesionales. Esto sigue la línea de Flood (2008), quien afirma que todo aprendizaje solo puede efectuarse si hay continuidad y congruencia tanto a nivel del saber como del ser y del hacer.

En este orden de ideas, cabe considerar que, si bien la formación y la experiencia acumulada por cada uno de los participantes sirve como recurso de aprendizaje y como referente para relacionar aprendizajes nuevos, también puede llegar a convertirse en fuente de resistencia al cambio. Por lo tanto, la formación solo cobra importancia cuando permite al participante valerse de sus experiencias anteriores y explotar y/o descubrir sus habilidades y capacidades y le reconoce sus expectativas y necesidades personales (Rodríguez, 2014).

Para evaluar el proceso enseñanza/aprendizaje de los participantes, se plantearon estrategias propias del modelo significativo/constructivista, agrupadas en heteroevaluación (evaluación por parte del formador), coevaluación (evaluación realizada entre pares) y autoevaluación, dando el mismo énfasis a cada una de ellas, ya que al participante le corresponde un rol fundamental y es él quien debe llevarlo a cabo. La evaluación realizada de esta manera se considera un proceso y no un resultado final, y se utiliza como una herramienta más del proceso enseñanza/aprendizaje.



Por otra parte, y debido a que el proceso educativo y formativo de los diplomados se estructuró y diseñó para ser impartido a perfiles específicos, la convocatoria se realizó de manera dirigida, principalmente a entidades prestadoras del servicio de asistencia técnica directa rural (ATDR) en el departamento. A continuación se detallan las particularidades de cada diplomado.

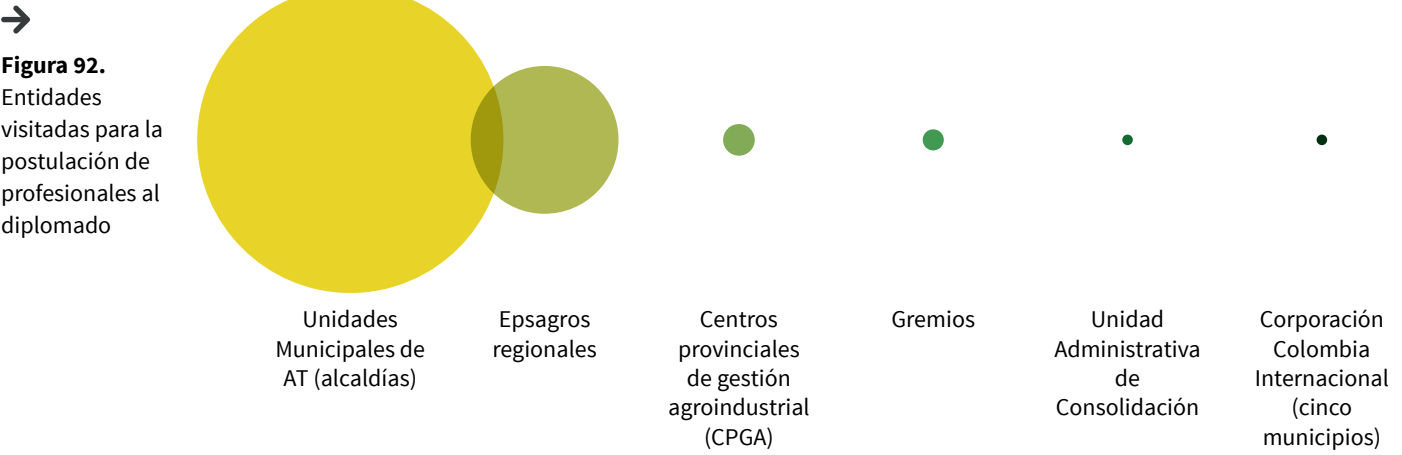
Manejo sostenible del recurso suelo con fines productivos en la Orinoquia colombiana

Este diplomado se estructuró entre los años 2012 y 2013, y fue ejecutado en el 2014, en alianza académica con la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales de la Universidad de los Llanos, programa de Ingeniería Agronómica. En la figura 92 se relacionan las entidades visitadas e invitadas a postular profesionales para participar en el programa académico.

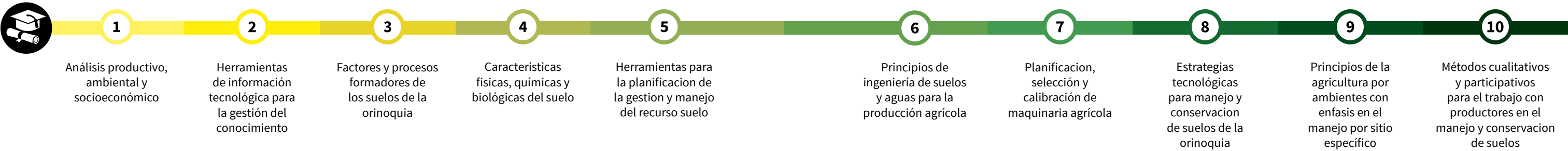
Objetivo: Contribuir a la actualización de conocimientos en el uso, el manejo y la conservación del recurso suelo en forma planificada y sostenible, de tal manera que en el ejercicio de su profesión y oficio los participantes propendan al desarrollo integral de

la región a través del aumento de la capacidad productiva de los suelos sin detrimento del ambiente.

Con el anterior objetivo en mente, se diseñó un programa académico con una intensidad horaria de 308 horas: 164 de trabajo independiente y 144 de trabajo dependiente, con diez unidades formativas (figura 93), que contenían objetivo pedagógico, temáticas, herramientas pedagógicas, actividades de trabajo independiente y evaluación, entre otras. Para garantizar la calidad de este diplomado, se contó con la tutoría de investigadores, docentes y/o colaboradores con diferentes niveles de escolaridad (figura 94) de instituciones como Corpoica, Universidad Nacional de Colombia, UPR y Universidad de los Llanos. Por consiguiente, y como lo muestra la figura 95, el diplomado formó a 38 asistentes técnicos de diferentes profesiones en elementos conceptuales y técnicos para el manejo sostenible del recurso suelo con fines productivos.



↓ **Figura 93.** Unidades formativas del diplomado sobre manejo del recurso suelo



↓ **Figura 94.** Nivel de escolaridad de los tutores participantes en el diplomado



↘ **Figura 95.** Número de graduados por profesión
Foto: Asistentes técnicos graduados del diplomado



Agroforestería con énfasis en el diseño y evaluación de sistemas silvopastoriles en la región de la Orinoquia

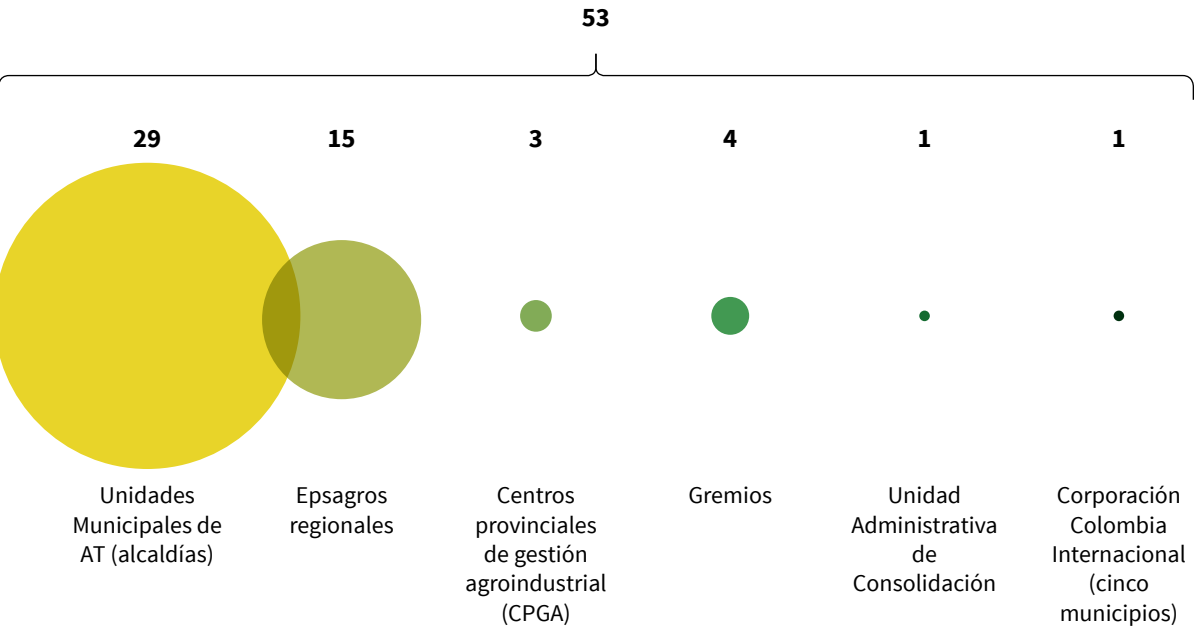
Este diplomado fue estructurado entre los años 2013 y 2014, y se ejecutó en el 2014, en alianza académica con la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Villavicencio. En la figura 96 se relacionan las entidades visitadas e invitadas a postular profesionales para participar en el programa académico.

Objetivo: Aportar elementos conceptuales y de manejo práctico a los asistentes técnicos agropecuarios de la región de los llanos orientales sobre estrategias de implementación y manejo de sistemas silvopastoriles, con miras a mejorar la productividad animal y darle

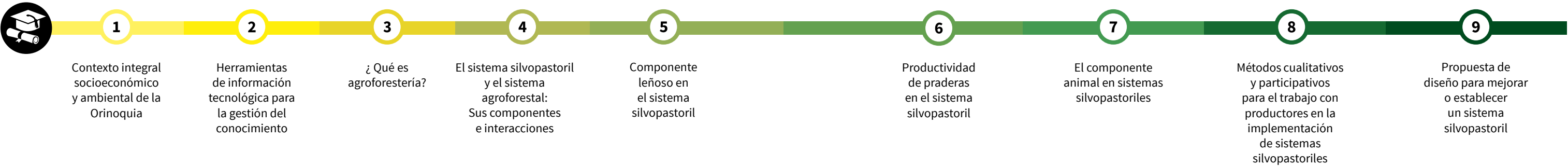
una connotación ambiental que complemente la funcionalidad del sistema ganadero regional (figura xx).

Para lograr lo anterior, se diseñó un programa académico con una intensidad horaria de 311 horas: 168 de trabajo independiente y 143 de trabajo dependiente, con nueve unidades formativas (figura 97), que fue llevado a cabo por 27 facilitadores/docentes con diferentes niveles de escolaridad (figura 98) y de instituciones como el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), el Observatorio Siembra, la Biblioteca Agropecuaria Colombiana, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Los Llanos y la Universidad Cooperativa de Colombia. Asimismo, participaron investigadores de Corpoica mediante talleres, clases magistrales, seminarios y giras técnicas, entre otras. Una vez finalizado todo el proceso formativo, 25 asistentes técnicos de diferentes profesiones (figura 99) contaron con conocimientos en técnicas y herramientas para la evaluación productiva y promoción participativa de los sistemas silvopastoriles.

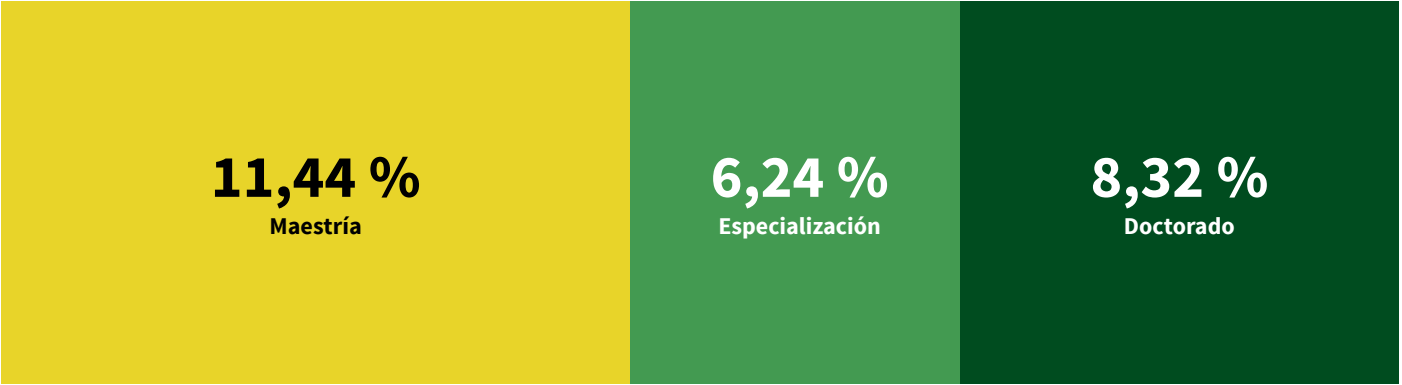
→ **Figura 96.** Entidades visitadas para la postulación de profesionales al diplomado



↓ **Figura 97.** Unidades formativas del diplomado en sistemas silvopastoriles



↓ **Figura 98.** Nivel de escolaridad de los tutores participantes en el diplomado



↘ **Figura 99.** Número de graduados por profesión
Foto: Clausura del diplomado en sistemas silvopastoriles



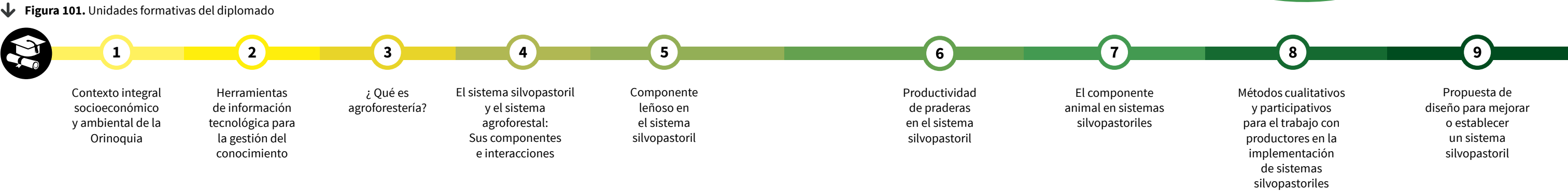
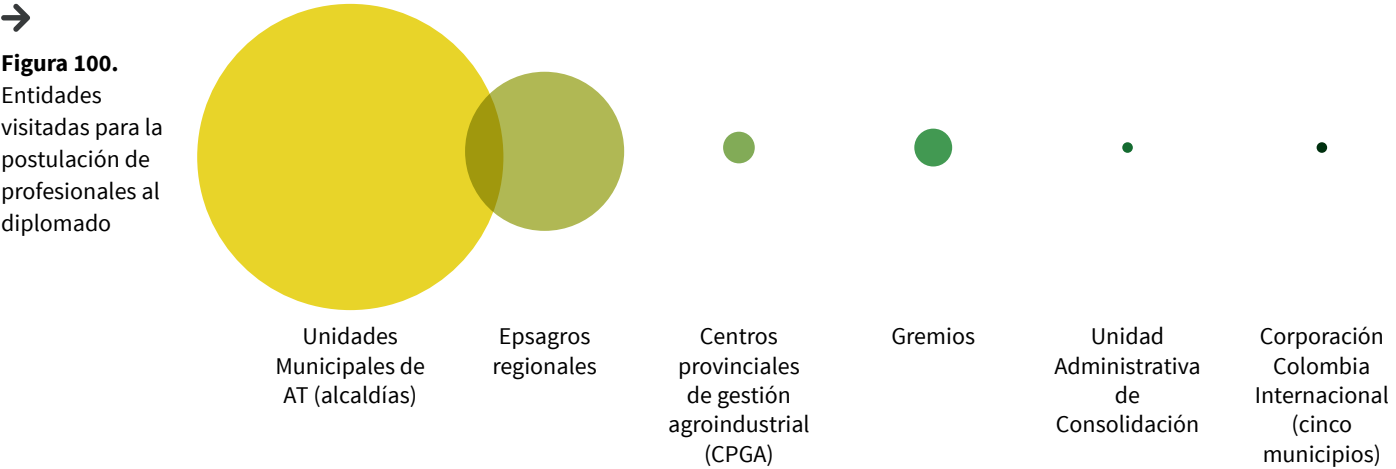
Fortalecimiento de las capacidades técnicas y tecnológicas para el desarrollo de sistemas agroforestales, con énfasis en silvopastoriles, en la Orinoquia colombiana

Este diplomado se estructuró entre los años 2013 y 2014, y fue ejecutado en el 2015, en alianza académica con la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Villavicencio. En la figura 100 se relacionan las entidades visitadas e invitadas a postular profesionales para participar en el programa académico.

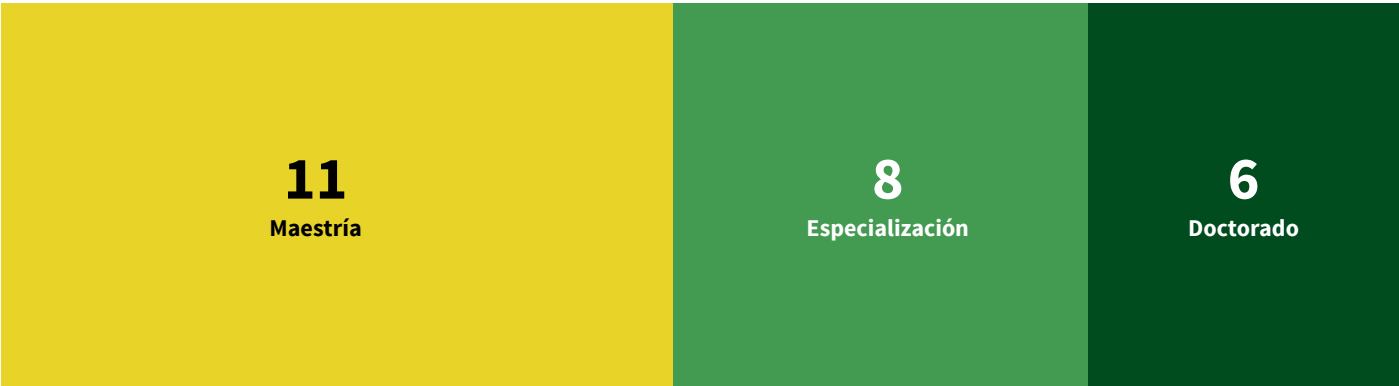
Objetivo: Contribuir a que las competencias de los prestadores de asistencia técnica y de los multiplicadores del conocimiento sean optimizadas de cara al mejoramiento de la productividad de los sistemas

ganaderos y a la recuperación de áreas de pasturas degradadas, de tal manera que contribuyan a la difusión de técnicas y prácticas silvopastoriles mediante el uso y gestión del conocimiento generado.

En virtud de lo anterior, y teniendo en cuenta el diseño del programa académico del diplomado en “Agroforestería con énfasis en el diseño y evaluación de sistemas silvopastoriles en la región de la Orinoquia”, se ajustó la intensidad horaria para un total de 352 horas: 168 de trabajo independiente y 184 de trabajo dependiente, con nueve unidades formativas (figura 101), que fue llevado a cabo por 25 facilitadores/docentes con diferentes niveles de escolaridad (figura 102) y de instituciones como Corpoica, Alquería, Ministerio de Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Distrital de Colombia y Universidad Cooperativa de Colombia. Una vez finalizado todo el proceso formativo, 24 asistentes técnicos de diferentes profesiones (figura 103) contaron con conocimientos en técnicas y herramientas para la evaluación productiva y la promoción participativa de los sistemas silvopastoriles.



↓ **Figura 102.** Nivel de escolaridad de los tutores participantes en el diplomado



↘ **Figura 103.** Número de graduados por profesión
Foto:

- Ingeniero ambiental 1
- Ingeniero forestal 2
- Lic. en producción agropecuaria 1
- Ingeniero agrícola 3
- Ingeniero agrónomo 6
- Médico veterinario 4
- Médico veterinario zootecnista 7



Los autores

Los autores

Édgar Fernando Almansa Manrique
ealmansa@agrosavia.co

Ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, experto en manejo y conservación de suelos y aguas. Ha participado en proyectos con Pacific Rubiales, Banco Mundial, MADR, Colciencias, entre otros. Se desempeñó como director de laboratorio de suelos del CI La Libertad y fue coordinador nacional del proyecto de pequeña irrigación. En la actualidad es investigador de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), donde lidera como investigador principal de proyectos del convenio Agrosavia-Ecopetrol.

Julián Andrés Peláez Montoya
jpelaez@agrosavia.co

Licenciado en producción agropecuaria de la Universidad de los Llanos. En la actualidad se desempeña como profesional de transferencia de tecnología en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia).

José Orlando Arguello Tovar
oarguello@agrosavia.co

Químico graduado de la Universidad Nacional de Colombia, con especialización en la Administración de Empresas y Maestría en Auditoría de Gestión de

la Universidad de Santiago de Chile. Experiencia en la dinámica química de nutrientes en el suelo y plantas. Vinculado a proyectos de investigación de la nutrición de especies vegetales de ciclo anual en la Orinoquia colombiana. Varios trabajos publicados de los resultados de investigación relacionados con la dinámica del agua en el suelo, impactos erosivos de la lluvia, arrastre de sólidos, escorrentía superficial y la variación de la productividad de algunos cultivos a través del tiempo.

José Guillermo Velásquez Penagos
jvelasquez@agrosavia.co

Médico veterinario con maestría en reproducción bovina y suficiencia investigadora en estudios avanzados de fisiología animal. PhD en ciencias biomédicas con énfasis en reproducción. En la actualidad trabaja en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) como investigador PhD en el campo de la ecofisiología y biotecnología de la reproducción, donde lidera como investigador principal delegado los macroproyectos de investigación del convenio Agrosavia-Ecopetrol y de doble propósito del piedemonte llanero. Es director nacional del grupo de investigación Reproducción Tropical y ha participado en proyectos con British Petroleum, Petrominerales, Colciencias, MADR, Comunidad Europea, entre otros.

José Henry Velásquez Penagos
jvelasquezp@agrosavia.co

Médico veterinario y zootecnista con maestría en reproducción animal. Experto en reinicio de la actividad ovárica y en biotecnología de la reproducción con énfasis en la transferencia de embriones en grandes y pequeñas especies. Cuenta con conocimiento sobre plantas asociadas a problemas reproductivos. Profesor de cátedra en maestría e investigador en Agrosavia desde el año 1994, en donde viene desarrollando proyectos de investigación y validación de tecnología. Actualmente se desempeña como investigador principal y asociado de proyectos de reproducción.

Ciro Ortiz Valdés
cortizv@agrosavia.co

Profesional en medicina veterinaria y zootecnista de la Universidad del Tolima, con experiencia en manejo nutricional, reproductivo, sanitario y manejo de pasturas del hato bovino y bufalino, Actualmente se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en donde realiza actividades de apoyo a la investigación en el componente pecuario del convenio Agrosavia-Ecopetrol.

Diana Patricia Barajas Pardo
dianap.barajas@campusucc.edu.co

Médica veterinaria de la Universidad de La Salle (Bogotá), con estudios avanzados de fisiología animal de la Universidad de Murcia, España. Doctorada de la Universidad de Murcia (España) en biología y tecnología de la reproducción de mamíferos. En la actualidad es profesora de reproducción y coordinadora de investigaciones de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Cooperativa de Colombia. Ha realizado estudios de investigación en biología celular y molecular en temas de maduración de ovocitos, fertilización in vitro y desarrollo embrionario y proteómico de plasma seminal en razas bovinas criollas y comerciales. También tiene trabajos en salud pública.

Sonia Lucia Gutiérrez Parrado
slgutierrez@agrosavia.co

Medica veterinaria y zootecnista de la Universidad de los Llanos. Actualmente se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en donde realiza actividades dentro de proyectos del convenio entre Agrosavia-Ecopetrol y MADR en biotecnología de la reproducción; específicamente, alrededor de temas de calidad seminal, procesos de criopreservación y producción de embriones. Participa en varios proyectos de reproducción de la agenda de investigación.

Gloria Estefanía Pastrana Aguirre
gpastrana@agrosavia.co

Ingeniera forestal de la Universidad del Tolima. En la actualidad se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), donde realiza actividades dentro de los proyectos del convenio Agrosavia-Ecopetrol asociadas a cultivos forestales irrigados con ATAEP.

Jenniffer Zulay Tafur-Sanabria
ingztafur@gmail.com

Ingeniera agrónoma de la Universidad de los Llanos. Especialista en agua y saneamiento ambiental. En la actualidad se desempeña como consultora en gestión del recurso hídrico para cultivos y huella hídrica.

Viviana Irene Romero Ramírez
Vivi.rora@gmail.com

Bióloga de la Universidad Javeriana, especialista en gerencia de empresas agropecuarias de la Universidad de La Salle y con estudios en biotecnología vegetal. Actualmente se desempeña en el área de la consultoría ambiental para hidrocarburos y minería, manejando el componente de fauna silvestre.

Victor Fabio Luna Mora
vluna@agrosavia.co

Biólogo de la Universidad del Tolima. Actualmente se desempeña como profesional de apoyo a la in-

vestigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en donde realiza actividades dentro de los proyectos del convenio Agrosavia-Ecopetrol asociadas a biodiversidad y cambios de uso del suelo en el piedemonte llanero.

Guillermo Alonso Bueno Guzmán
gbueno@agrosavia.co

Zootecnista magíster en zootecnia de la Universidad Federal de Viosa Brasil (MG). Ha trabajado en planificación, desarrollo y vinculación de productos tecnológicos en sistemas de producción alrededor de aspectos como establecimiento, recuperación y manejo de pasturas y de cultivos forrajeros, multiplicación de semillas de especies forrajeras gramíneas y leguminosas, prácticas de conservación de forrajes para alimentación de bovinos, manejo y nutrición de bovinos en sistema doble propósito y cría, y manejo de sistemas agro-silvopastoriles en el piedemonte y altillanura colombiana. Actualmente se desempeña como investigador máster asociado, adscrito a la Red de Ganadería y Especies Menores de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en el CI La Libertad.

Luisa Fernanda Posada Velásquez
lposada@agrosavia.co

Médica veterinaria y zootecnista egresada de la Universidad de los Llanos. Actualmente trabaja como profesional de apoyo a la investigación de la Corporación Colombina de Investigación Agro-

pecuaria (Agrosavia). Sus actividades han estado dirigidas hacia la transferencia de tecnología en el marco del convenio Agrosavia-Ecopetrol.

Oscar Javier Cerinza Murcia
ocerinza@agrosavia.co

Médico veterinario y zootecnista egresado de la Universidad de los Llanos. En la actualidad se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), donde realiza actividades relacionadas con sistemas de producción.

Diego Mauricio Pabón Leal
dpabon@agrosavia.co

Médico veterinario zootecnista de la Universidad de los Llanos. Ha trabajado en el desarrollo de la investigación para sistemas de producción de ganadería (producción y reproducción) en la Orinoquia colombiana. Actualmente es profesional de apoyo a la investigación (PAI), adscrito a la Red de Ganadería y Especies Menores de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), con sede en el Centro de Investigación Carimagua en Puerto Gaitán, Meta.

Otoniel Pérez López
Operez@agrosavia.co

Ingeniero agrónomo, magíster en salud y producción animal, con énfasis en nutrición de rumian-

tes. Vinculado a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en donde sus estudios se enmarcan en la evaluación, el desarrollo, el uso y el manejo de pastos y forrajes tropicales y su integración en sistemas de producción animal, además del desarrollo y vinculación de sistemas integrados agrosilvopastoriles en condiciones de suelos ácidos de la Orinoquia colombiana. Es investigador principal delegado de macroproyectos e investigador principal de proyectos de investigación de la agenda de investigación.

Sandra Xiomara Pulido Castro
spulido@agrosavia.co

Ingeniera agrónoma con maestría en sistemas de producción agropecuaria. Cuenta con trayectoria como investigadora en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) liderando y participando en equipos en proyectos de investigación y transferencia de tecnología con énfasis en desarrollo rural. Asimismo, se ha desempeñado en el fortalecimiento de capacidades de productores y actores relacionados con el SNIA, principalmente asistentes técnicos y extensionistas agropecuarios. En Agrosavia ha sido coordinadora de soporte al SNIA y jefe del departamento de transferencia de tecnología y soporte al SNIA. En la actualidad trabaja como asesora senior de la Dirección de Vinculación.

Referencias

Acosta, A. R. (2000). Ranas, salamandras y caecili-
as (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Biota
Colombiana*, 1(3), 289-319.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de
Enfermedades (2014). *Resúmenes de Salud
Pública - Hidrocarburos totales de petróleo [Total
Petroleum Hydrocarbons (TPH)]*. [En línea]. Re-
cuperado de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/
es_phs123.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html).

Almansa, M. E., Bernal, R. J. y Arguello, T. O. (2006).
Indicadores físicos de sostenibilidad edáfica. Ple-
gable divulgativo N.o 48. Villavicencio, Colom-
bia: Corpoica CI La Libertad.

Álvarez, E. et al. (2016). *Modelos de crecimiento
diamétrico y de tasas de acumulación de carbono
en 200 especies multipropósito de árboles nativos
en nueve zonas de vida de Colombia*. Colombia:
Fundación Natura y Jardín Botánico de Medellín
Joaquín Antonio Uribe.

Amézquita, E. (2004). La fertilidad física del sue-
lo. En: Congreso Latinoamericano, 16, y Con-
greso Colombiano de la Ciencia del Suelo sobre
Suelo, Ambiente y Seguridad Alimentaria, 12.
Cartagena, Colombia.

Amézquita, E., Hoyos, P. y Molina, D. L. (2003). *Por
qué construir capas arables en suelos de la altilla-
nura colombiana*.

Andrades, M. y Martínez, M. (2014). *Material didác-
tico agricultura y alimentación, Fertilidad del
suelo y parámetros que la definen*. 3a ed. España:
Universidad de la Rioja.

Baver, L. D., Gardner, W. H. y Gardner, W. R. (1972).
Soil Physics. 4a ed. Nueva York: John Wiley &
Sons.

Bemhaja, M. (2000). Pasto elefante (*Pennisetum
purpureum* Schum.) INIA Lambaré. Boletín de
Divulgación (72), 1-2. Montevideo, Uruguay:
Unidad de Agronegocios y Difusión del INIA,
Montevideo.

Bonza, P. N. (2014). *Evaluación del componente
forestal Acacia Acacia mangium Willd, Melina
Gmelina arbórea Roxb y Yopo Anadenanthera pe-
regrina (L.) Speg bajo sistemas silvopastoriles en
el Centro de Investigación La Libertad Corpoica*.
Tesis para Maestría en Agroforestería Tropical,
Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales
UDCA, Bogotá, Colombia. Recuperado de [http:
//repository.udca.edu.co: 8080/jspui/bitstream/
11158/240/1/203765.pdf](http://repository.udca.edu.co:8080/jspui/bitstream/11158/240/1/203765.pdf).

Bradford, S. (2010). *Medicina interna de grandes
animales*.Barcelona,España: Elsevier.

Briñez, J., Valbuena, E., Castro, G., Tovar, A. y Ruiz,
J. (2008). Algunos parámetros de composición y
calidad en leche cruda de vacas doble propósito

en el municipio machiques de perijá. Estado
Zulia, Venezuela . *FCV-LUZ*, XVIII(5), 607-617.

Bueno, G. (2010). Sistemas silvopastoriles. Arreglos
y usos En: A. Rincón y C. Jaramillo (eds.), *Esta-
blecimiento, manejo y utilización de recursos fo-
rrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos*
(pp. 201-230). Villavicencio, Colombia: Ministerio
de Agricultura y Desarrollo Rural, Fedegan.

Bueno, G. A., Pérez, O., Cerinza, O. y González, G.
(2014). *Integración de árboles en arreglos de cercas
vivas para los sistemas ganaderos del piedemonte
llanero*. Colombia: Corpoica-Ecopetrol-MADR.

Bueno, G. A., Pardo, O., Pérez, O., Cerinza, O. y
Pabón, D. (2015). *Bancos forrajeros en sistemas
agrosilvopastoriles para la alimentación animal
en el piedemonte del Meta*. Villavicencio, Colom-
bia: Corpoica-Ecopetrol-MADR.

Bueno, G. A., Cerinza, O., Pabón, D., Pérez, O. y
Velásquez, J. H. (2016). *Informe técnico final: Uso
Integral de aguas asociadas a la producción de HC
en sistemas agropecuarios del área de influencia
de Ecopetrol II. Componente Sistema Agrosilvopas-
toril*. Villavicencio, Colombia: Corpoica-Ecopetrol.

Cáceres, A. y Urbina, N. (2009). Ensamblaje de
Anuros de Sistemas Productivos y Bosques del
Piedemonte Llanero, Departamento del Meta,
Colombia. *Caldasia*, 31(1), 175-194.

Calderón, A., García, F. y Martínez, G. (2006). Indicado-
res de calidad de leches crudas en diferentes regio-
nes de Colombia. *MVZ Córdoba*, 11(1), 725-737.

Campos, R. C., García, K., Hernández, E. A. y Giraldo,
L. (2012). Protein and Mineral Metabolites for
Dairy Cows during the Transition Period under
Tropical Conditions. *Rev. Fac. Nac. Agron. Mede-
llín*, 65(12), 6719-6728.

Canadian Council of Ministers of the Environment
(2007). *Canadian soil quality guidelines for the
protection of environmental and human health:
Summary tables*.

Cárdenas, L. M. (2015). *Biomasa y crecimiento de
especies forestales nativas*. Bogotá, Colombia:
Fundación Natura.

Cardona, E., Ríos, L y Peña, J. (2012). Disponibili-
dad de variedades de pastos y forrajes como
potenciales materiales Lignocelulósicos para la
producción de bioetanol en Colombia. *Informa-
ción Tecnológica*, 23. Medellín, Colombia.

Cenicaña (2002). *Características Agronómicas y de
Productividad de la variedad Cenicaña Colombia
CC – 8592*. Serie técnica No. 30. Cali, Colombia.

Cenicaña (2010). *Producción de caña de azúcar en
el valle del Río Cauca, estadísticas descriptivas*.
Cali: Cenicaña.

Chacón, P., Leblanc, H. A. y Russo, R. O. (2007). *Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica*. Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica: Universidad Earth.

Córdova S. y Tabasco C. H. (2013). *Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal*. México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales.

Correa-Londoño, G. (2004a). *Análisis de medidas repetidas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Correa-Londoño, G. (2004b). *Parcelas divididas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Delgado, M. (s.f.). *Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal*. [En línea]. Recuperado de https://www.oriusbiotech.com/escrito?-nom=Los_microorganismos_del_suelo_en_la_nutrici%C3%B3n_vegetal.

Díaz, R. y Hunter, A. (1978). *Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental) (2011). *Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA*. Lima, Perú: Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental.

Durán, A. (1998). *Caracterización de suelos de la Región Basáltica del Uruguay*. En XIV Reunión del Grupo técnico regional del Cono Sur en mejoramiento y utilización de recursos forrajeros del área tropical y subtropical: Grupo Campos. Serie técnica 94. INIA Tacuarembó.

Falcucci, A., Maiorano, L. y Boitani, L. (2007). Change in the Land-Use Land-Cover Patterns in Italy and their Implications for Biodiversity Conservation. *Landscape Ecology*, 22, 617-631.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento*. Vol. 2. [En línea]. Recuperado el 22 de octubre de 2013 de <http://www.fao.org/docrep/016/ap354s/ap354s00.PDF>.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (1994). *Irrigation and drainage paper. Water quality for agriculture*. Davis, California: University of California.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2006). *Estudio Riego Y Drenaje Cálculo de ET0: Método de Penman-Monteith. Manual 56*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ferreira, F., Campos, W. E., Carvalho, A. U., Pires, M. F. A., Martínez, M. L., Silva, M. V. G. B., Verneque, R. S. y Silva, P. F. (2009). Parâmetros clínicos, hematológicos, bioquímicos e hormonais de bovinos submetidos ao estresse calórico. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 61(4), 769-776. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352009000400002>

Ficha técnica de sangría y recolección de látex. (2015). [En línea]. Recuperado de <http://www.asoheca.org/imagenes/Fichastecnicas/FICHA TECNICA DE SANGRIA Y RECOLECCION DEL LATEX.pdf>.

Flood, C. (2008). *El adulto como sujeto de aprendizaje en entornos virtuales*. Argentina: FLACSO.

Flores, S. H. (1963). *Crecimiento en diámetro y altura del árbol del hule (Heveas brasiliensis Muell. Arg) en dos zonas ecológicas de Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Centro Tropical de Investigación y Enseñanza para Graduados.

Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R. y Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.

Foster, M. (2012). Standard Techniques for Inventory and Monitoring. En R. McDiarmid *et al.*, *Reptile Biodiversity. Standard Methods for Inventory and Monitoring*. Londres, Inglaterra: University of California Press, Ltd.

Franceschi, M. L., Da Silva, V. P., Lopes, L. R., Marques, M. y Laura, V. A. (2004). *Sistemas Silvopastoris – Introdução de Árvores na Pecuária do Centro-Oeste Brasileiro*. Documento 146. Embrapa. Campo Grande, MS. Brasil.

García, H., Albarracín, L., Toscano, A., Santana, N. e Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Bogotá: Corpoica.

García, C., Moreno, J. L., Hernández, M. T. y Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. En F. Valladares (ed.), *Ciencia y Medio Ambiente – CCMA-CSIC* (pp. 125-138). CSIC – Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA).

Gasca, H. y Torres, D. (2013). Conservación de la biodiversidad en Colombia, una reflexión para una meta: conocer y educar para mejorar. *Cuadernos de Biodiversidad*, 42, 31-37. Doi:10.14198/cdbio.2013.42.03.

Gómez, J. (2008). Biocomercio sostenible: una estrategia de conservación y uso sostenible de la biodiversidad. *Revista Javeriana*, 144(750), 74-79.

Google Earth (s.f.a). *Pastura degradada de Brachiaria en ASA en 2010*. <https://www.google.com/intl/es/earth/>.

Google Earth (s.f.b). *Imagen satelital de ASA*. <https://www.google.com/intl/es/earth/>.

Guerrero, R. (2009). *Fertilización de cultivos de clima cálido. Monómeros colombo venezolanos*. [En línea]. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/016/ap354s/ap354s00.PDF>.

Hilty, S. y Brown, W. (2009). *Guía de las Aves de Colombia*. Colombia: Asociación Colombiana de Ornitología (ACO).

Humbert, R. P. (1974). *El cultivo de la caña de azúcar*. México: Continental.

IDEAM (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia, Imprenta Nacional de Colombia.

IGAC (2004). *El Meta: un Territorio de Oportunidades*. Colombia: Gobernación del Meta, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Imprenta Nacional de Colombia.

IGAC (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Meta*.

Imaña, E. y Encinas, O. (2008). *Epidometría forestal. Universidad de Brasilia. Departamento de Engenharia florestal. Brasilia*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. En T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J., Boschung, A. Nauels, Y., Xia, V. Bex y P. M. Midgley (eds.). *Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.

James, D. W., Hanks, R. J. y Jurinak, J. J. (1982). *Modern irrigated soils*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Kattan, H., Serrano, H. y Aparicio (1996). Aves de Escalete: Diversidad, Estructura Trófica y Organización Social. *Cespedia*, 21(68), 920.

López, A. A. (2013). *Crecimiento y rendimiento de plantaciones de acacia mangium, eucalytus pellita, pino caribaea en la Orinoquia colombiana*. Bogotá: Conif-Corpoica.

Lora, R. (1998). Propiedades físicas y químicas del suelo. Memorias I Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Editora Guadalupe Ltda. Villavicencio.

Macías, V. E. y Calvo de A. R. (2009). *Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza de suelos de Galicia*. España.

Manrique, R., Ramírez, J., Rangel, M. y Bayona, A. (2008). *Buenas prácticas agrícolas para el manejo agronómico de la caña de azúcar (Sacharum spp.), con destinos a la producción de panela y otros usos alternativos como el alcohol carburante*. 1ª ed. Bogotá: Corpoica.

Marczak, L., Sakamaki, T., Turvey, S., Deguise, I., Wood, S. y Richardson, J. (2010). Are Forested

Buffers an Effective Conservation Strategy for Riparian Fauna? Any Assessment Using Meta-Analysis. *Ecological Application*, 20(1), 126-134. Doi:10.1890/08-2064.1.

Martínez-Becerra, R. y Martínez-Rueda, N. (1997). *Diseño de experimentos, Análisis de datos estándar y no estándar*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

McNish, T. (2007). *Las Aves de los Llanos de la Orinoquia*. Bogotá: M&B Ltda.

Medellín, R., Arita, H. y Sánchez, O. (1997). *Identificación de los murciélagos de México. Clave de campo*. México: Asociación Mexicana de Mastozoología.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2018). *Sector lácteo colombiano mayo de 2018*. [En línea]. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/SICLA/Documentos/002 - Cifras Sectoriales/Cifras Sectoriales - 2018 Mayo Cadena Láctea.pdf>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014). *Resolución 1207 de 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*.

Moldenhauer, G. J. F. et al. (1999). *El olivo: un árbol para la historia*. Granada, España: Herogra Fertilizantes S. A.

Montenegro, G. H. (2003). Propiedades físicas de los suelos en relación con la fertilidad. En: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Bogotá.

Montenegro, H. y Malagón, D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá: IGAC.

Motta, M. B., Rodríguez, T. C., Montenegro, G. H., Marulanda S. J., Correa de C. A. y Bendeck de V. M. (1990). *Manual de Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos*. Bogotá: IGAC.

Motta, P. A., Rivera, L. G., Mariño, A. y Lizcano, C. E. (2012). Desempeño productivo y reproductivo de vacas F1 Gyr x Holstein en clima cálido colombiano. *Vet. Zootec.*, 6(1), 17-23.

Muñoz, J. (2001). *Los murciélagos de Colombia: sistemática, distribución, descripción, historia natural y ecología*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Narro, E. (1994). *Física de suelos con enfoque agrícola*. México: Trillas.

Ocampo, R. J., Domínguez, P. A. y Galindo, C. F. (2015). *Clasificación de la condición corporal del ganado*. [En línea]. Recuperado de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4358/Clasificaci%C3%B3n%20de%20la%20condici%C3%B3n%20corporal%20del%20Ganado.pdf?sequence=1>.

Oliva, H. E. (1990). *Comportamiento en plantación de mangium (acacia mangium Willd y Aripin (caesal-dinia velurica (By R) standl) en América Central*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Orozco, D., Menjivar, J. y Rubiano, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307. Doi:10.15446/acag.v64n4.38731.

Osorio, W. (2012). Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad de nutrientes en suelos ácidos del trópico. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 74-91.

Pardo, O., Carulla, J. E. y Hess, H. D. (2008). Efecto de la relación proteína y energía sobre los niveles de amonio ruminal y nitrógeno ureico en sangre y leche, de vacas doble propósito del piedemonte llanero, Colombia. *Rev. Colombiana Ciencias Pecuarias*, 21, 387-397. <https://doi.org/http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v21n3/v21n3a08.pdf>.

Parra, J. L., Martínez, M., Pardo, H. y Vargas, S. (1998). Mastitis y calidad de la leche en el piedemonte del meta y cundinamarca. [En línea]. Recuperado de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/33136/24947_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Patiño, S., Suárez, L., Andrade, H. y Segura, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2).

Pérez, O. y Bueno, G. A. (2010). Cultivos Forrajeros. En: A. Rincón y C. Jaramillo, A. Rincón y C. Jaramillo (eds.), *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos*. Villavicencio, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Fedegan.

Proexport Colombia (2012). *El Sector Forestal en Colombia*.

Profor (2016). *Situación actual y potencial de fomento de plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia*. [En línea]. Recuperado de [https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Informe Final - Plantaciones Comerciales en Colombia_1](https://www.profor.info/sites/profor.info/files/Informe%20Final%20Plantaciones%20Comerciales%20en%20Colombia_1.pdf).

Ramírez, L. R., Casanoves, F., Harvey, C. A., Chacón, M., Soto, G. y DeClerck F. (2011). Efecto de la diversidad arbórea y la distancia al bosque de los sistemas silvopastoriles sobre la conservación de aves residentes de Matiguás, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* (48), 36-45.

Reyna, M. (2018). *Producción excesiva de agua en reservorios*. [En línea]. Recuperado de <http://bauerberg-klein.com/technical-articles/produccion-excesiva-de-agua-en-reservorios/>.

Rincón, A. (2006). *Factores de degradación y tecnología de recuperación de praderas en los Llanos orientales de Colombia*. Boletín técnico 49. Villavicencio: Corpoica, Gobernación del Meta.

Rioja, M. (2002). *Apuntes de Fitotecnía General*. España: Universidad Castilla La Mancha. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real.

Riopaila-Castilla (2007). *El cultivo de la caña de azúcar. Manual práctico de consulta*.

Rodríguez, S. C. (1983). Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schumacher). *Revista de difusión de tecnología agrícola y pesquera del FONAIAP Publicación divulgativa* (12). Venezuela: FONAIAP (Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias).

Rodríguez Fernández, N. (2014). Fundamentos del proceso educativo a distancia: enseñanza, aprendizaje y evaluación. *RIED: Revista Iberoamericana de Educación a Distancia [S.l.]*, 17(2), 75-93. Disponible en: <http://revistas.uned.es/index.php/ried/article/view/12679/11874>.

Rojas, R. F., Arias, A. D., Moya, R. R., Meza, M. A., Murillo, G. O. y Arguedas, G. M. (2004). *El*

manual para productores de melina (Gmelina arborea) en Costa Rica. Centro de Investigación en Integración Bosque Industria de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Russell, K. E. y Roussel, A. J. (2007). Evaluation of the Ruminant Serum Chemistry Profile. *Veterinary Clinics of North America - Food Animal Practice*, 23(3), 403-426. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2007.07.003>.

Salamanca, A., Quintero, R. y Benítez, J. (2011). Características de crecimiento predestete en becerros del Sistema Doble Propósito en el municipio de Arauca. *Zootecnia Tropical*, 29(4), 455-465.

Saldarriaga, P. J., Bravo, G. y Loor Rivadeneira, M. (2016). La teoría constructivista de Jean Piaget y su significación para la pedagogía contemporánea. *Dom. Cien.*, 2(núm esp.), 127-137. ISSN: 2477-8818.

Salinas, J. G. y Valencia, C. A. (1983). *Oxisoles y Ultisoles en América Tropical. Parte I: distribución, importancia y propiedades físicas. Parte II: mineralogía y características químicas*. Palmira, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Sánchez de Prager, M. (2007). *Las endomicorizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico*. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Sayre, R., Roca, E., Sedaghatkish, G., Young, B., Keel, S., Roca, R. Sheppard, S. (2002). *Un enfoque en la naturaleza. Evaluaciones ecológicas rápidas*. Arlington, EE. UU.: The Nature Conservancy.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002). Norma Oficial Mexicana Nom-021-Semarnat-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario oficial de la Federación*. Ciudad de México, Distrito Federal.

Seppänen, P. (2002). Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Revista Foresta Veracruzana*, 4(2), 51-58.

Sierra, M. (2005). *Niveles de metales pesados y elementos asociados en suelos de la provincia de Almería, parámetros que los afectan y riesgos de contaminación*. Tesis doctoral, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada.

Smith, J. (1997). Land Speculation and Intensification at the Frontier: a seeming Paradox in the Colombian Savanna. *Agricultural Systems*, 54(4), 501-520. Doi:10.1016/S0308-521X(96)00088-1.

Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R. et al. (2001). Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. *Science*, 292(5515): 281-284. Doi:10.1126/science.1057544.

Vaides, L. E. (2004). *Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (Tectona grandis L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala*. Tesis en Ordenación Forestal, Unidad 3M. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Vaides, L. E. (2015). *El crecimiento en masas forestales. Ordenación forestal I*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. Recuperado de <http://>

es.slideshare.net/LeonardoRubi/crecimiento-en-masas-forestales.

Van Bavel, C. H. M. (1949). Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 17, 416-418.

Vega, J. y Martiarena, R. (2010). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de araucaria (*Araucaria angustifolia* -Bert.- O. Ktze). *Revista de Ciencia y Tecnología* (13).

Veneklass, E., Fajardo, A., Obregón, S. y Lozano, J. (2005). Gallery Forest Types and their Environmental Correlates in a Colombian Savanna Landscape. *Ecography*, 28(2), 236-252. Doi:10.1111/j.0906-7590.2005.03934.x.

Vergara, O., Botero, L. y Martínez, C. (2009). Factores ambientales que afectan la edad al primer parto y primer intervalo de partos en vacas del sistema doble proposito. *Revista MVZ Córdoba*, 14(1), 1594-1601.

Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F. y Umaña, A. M. (2006). *Manual de Métodos para el Desarrollo de Inventarios de Biodiversidad*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Vitt, L. y Caldwell, J. (2009). *Herpetology. An Introductory Biology fo Amphibians and Reptiles*. Boston: Elsevier.

Wilcox, L. V. (1955). *Classification and Use of Irrigation Waters. United States Salinity Laboratory of Riverside. California*. Circular N.o 969 de United States Department of Agriculture. Washington, D. C.





Las aguas residuales pueden usarse para la producción agrícola mediante el riego, pero hacerlo requiere de investigación y gestión diligente de los riesgos sanitarios a través de un tratamiento adecuado o un uso apropiado. Con tal premisa en mente, en esta publicación se presentan en forma resumida algunas de las experiencias realizadas dentro del marco del convenio entre Agrosavia y Ecopetrol que tiene como objetivo “aunar esfuerzos técnicos, científicos, operativos y financieros para el desarrollo de la investigación sobre el uso y manejo integral de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos en sistemas agropecuarios del área de influencia de Ecopetrol”.

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

