

A photograph of a forest with many thin, vertical tree trunks and green foliage. A horizontal bar at the top is divided into three segments of different shades of green: light green, medium green, and dark green. The number '03' is displayed in white on a dark green square in the top left corner.

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



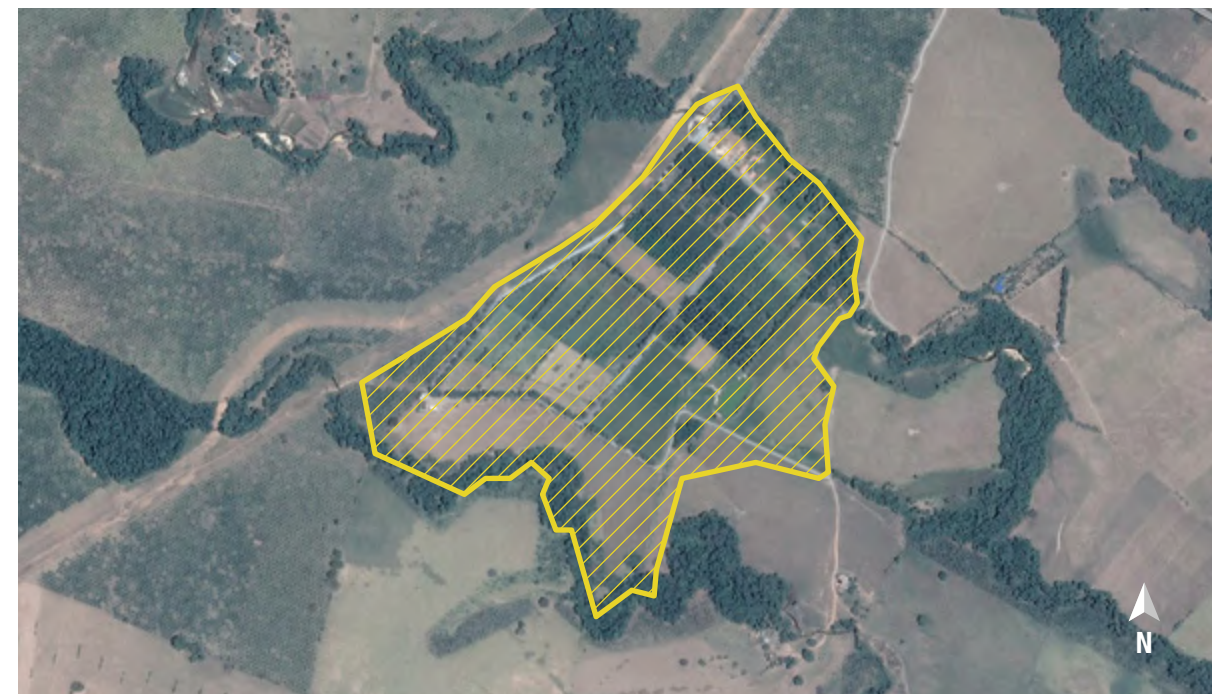
Se puede afirmar entonces que las ATAEP que cumplen con la normatividad legal vigente (Resolución 1207 de 2014, Resolución 0631 de 2015 y Decreto 1594 de 1984) surgen como una valiosa alternativa para el riego en la producción de especies forestales establecidas en suelos con limitaciones de fertilidad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



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

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<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>.

## 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).

←  
**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 *Brachiaria 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 asociada<sup>1</sup> *Brachiaria 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 pintoi* (maní forrajero).



**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.

Eucalipto



***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 *Brachiaria humidicola*.

Yopo



***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 *Brachiaria humidicola*.

Pino



***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 *Brachiaria humidicola*.

## 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  $129 \text{ l.s}^{-1}$ ,

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, Ecopectrol, 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:

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



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 47.**  
Medición del DAP en árboles de yopo bifurcados

## 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):

$$\text{Vol} = \text{AB} \times \text{HT} \times f$$

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

Además,

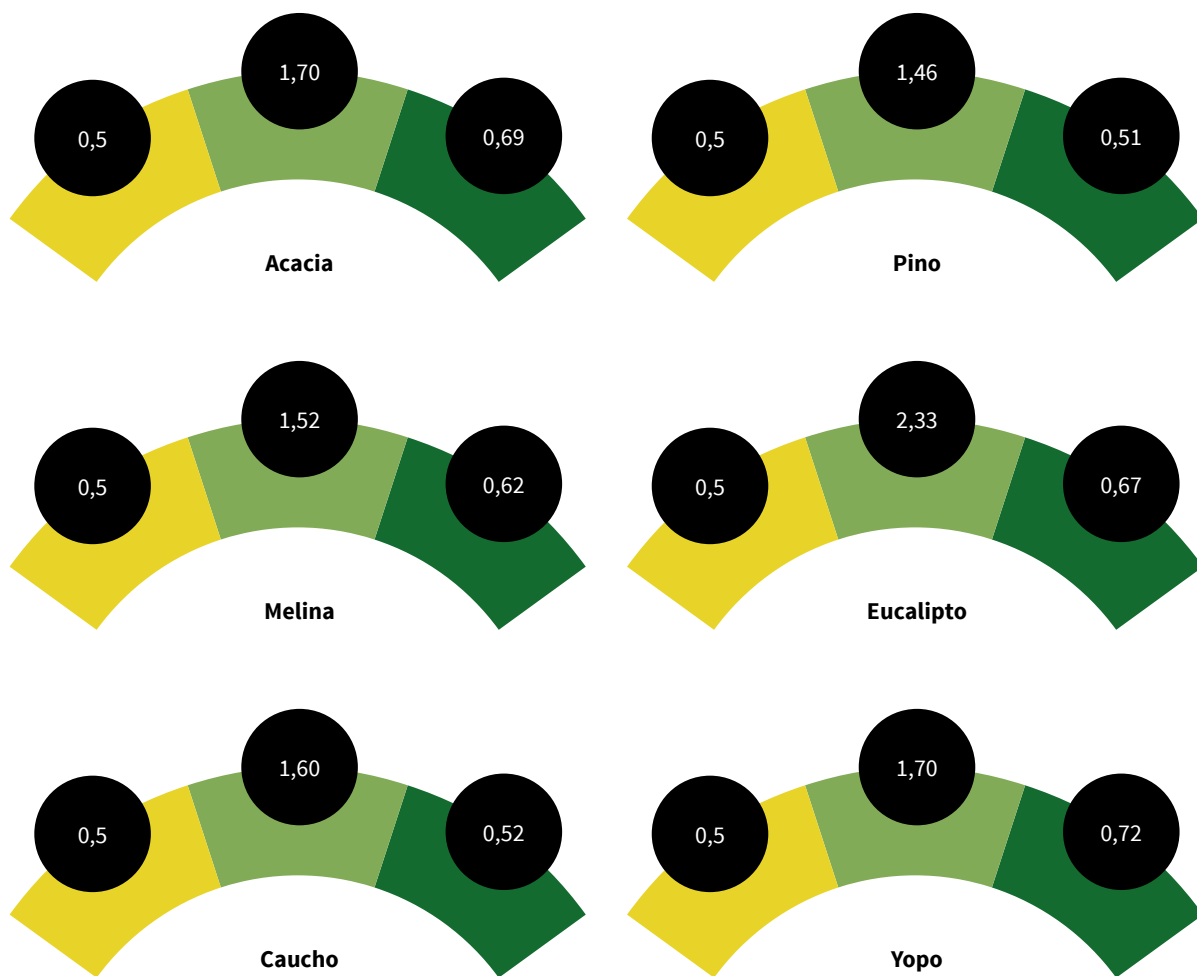
$$\text{AB} = (\pi/4) \times \text{DAP}^2$$

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 FAO<sup>2</sup> (figura 48). Así pues, se aplicó la fórmula:

$$B_{at} = \text{Vol} \times \text{FEB} \times \text{Ge}$$

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

- 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.

2. **Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, Vol 2;** recuperado el 22 de octubre de 2013 en: <http://www.fao.org/docrep/016/ap354s/ap354s00.PDF>.

### 3 Calidad del agua

Los cultivos fueron regados con ATAEP provenientes de Castilla La Nueva y Acacías. 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:

$$\text{Vapli.} = \text{Q parcela} \times \text{T avance}$$

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 <sup>-1</sup>	< 3,508	ICP	NR	5,0
Arsénico	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,00013	ICP	0,05	0,1
Berilio	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,00042	ICP	NR	0,1
Cadmio	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,000026	ICP	0,01	0,01
Zinc	mg.l <sup>-1</sup>	0,003756	ICP	1,5	2,0
Cobalto	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,000322	ICP	NR	0,05
Cobre	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,002102	ICP	1,0	0,2
Cromo	mg.l <sup>-1</sup>	0,000238	ICP	60,05	60,1
Hierro	mg.l <sup>-1</sup>	52,83	ICP	NR	5,0
Litio	mg.l <sup>-1</sup>	0,1975	ICP	NR	2,5
Manganeso	mg.l <sup>-1</sup>	0,10896	ICP	NR	0,2
Molibdeno	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,000099	ICP	NR	0,01
Níquel	mg.l <sup>-1</sup>	0,000662	ICP	NR	0,2
Plomo	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,000284	ICP	0,05	5,0
Selenio	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,000860	ICP	0,01	0,02
Vandanio	mg.l <sup>-1</sup>	0,001115	ICP	NR	0,1
Boro	mg.l <sup>-1</sup>	0,1235	ICP	NR	0,3 - 4,0
Cloruros Cl-	mg.l <sup>-1</sup>	122	Antek	250	NR
Sodio Na	mg.l <sup>-1</sup>	41,2	Antek	NR	NR
Manganeso Mn	mg.l <sup>-1</sup>	0,092	Antek	NR	0,2
Bario Ba	mg.l <sup>-1</sup>	0,575	Antek	1,0	NR
Mercurio Hg	mg.l <sup>-1</sup>	< 0,002	Antek	0,002	NR
Hidrocarburos Totales	mg.l <sup>-1</sup>	2,4	Antek	NR	NR
Conductividad	µS.cm <sup>-1</sup>	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.

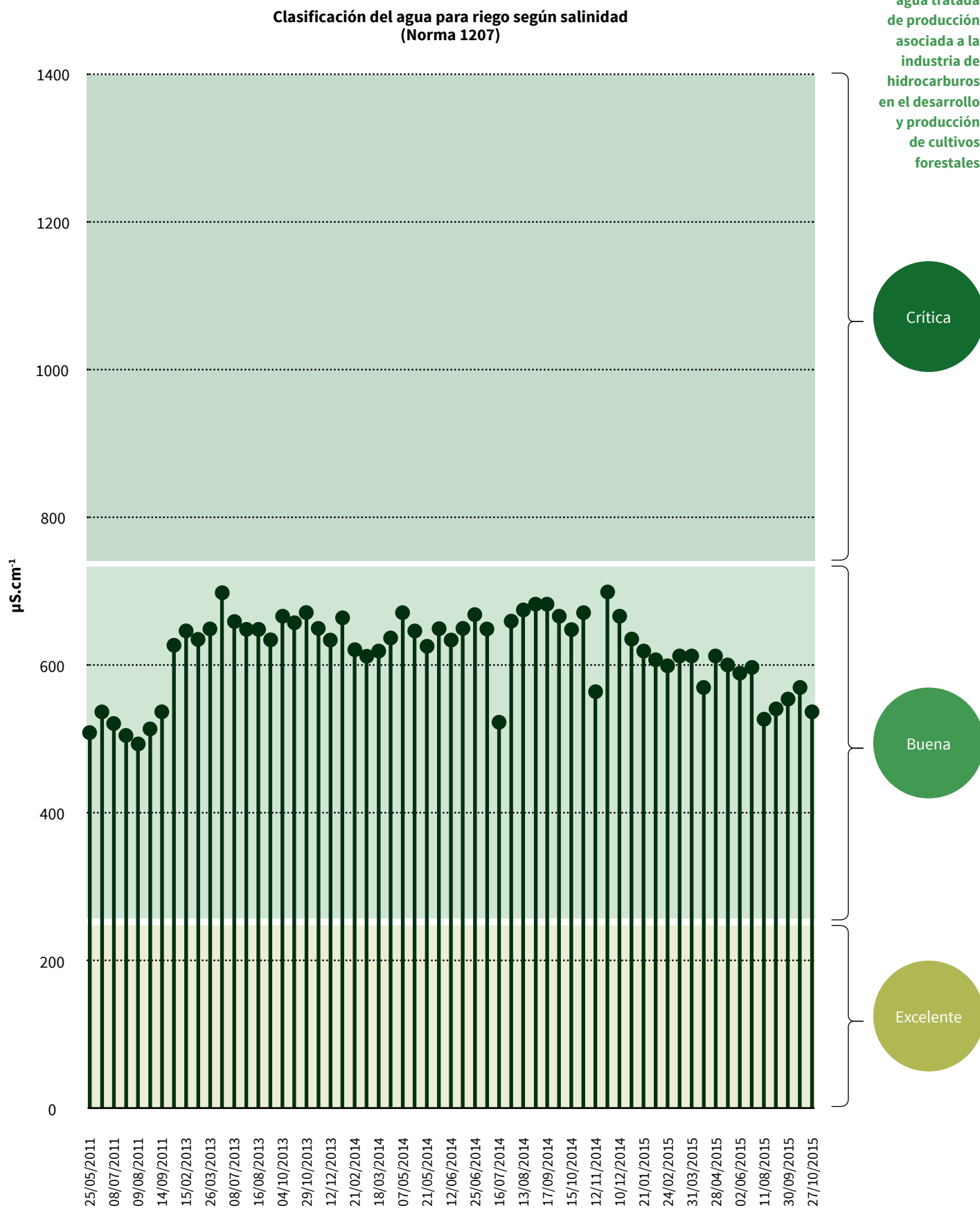
Descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de cloruros, nitratos, fosfatos u otros iones. Por otra parte, los hidrocarburos y compuestos orgánicos como aceites, fenol, alcohol, azúcar y otros compuestos no ionizables (aunque contaminantes) no 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  $25^\circ\text{C}$  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<sup>-1</sup>, y actualmente este valor oscila entre 1,86-1,54 cmol.kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>. La norma mexicana NOM-021-Semarnat-2000 califica como nivel muy bajo valores de Ca menores de 2 cmol.kg<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>, cuando el nivel medio registrado inicialmente en estos suelos había sido de 0,10 cmol.kg<sup>-1</sup> (la norma NOM-021-Semarnat-2000 califica como muy bajos valores de magnesio inferiores a 0,5 cmol.kg<sup>-1</sup>).

El potasio registró un contenido medio de 0,09 cmol.kg<sup>-1</sup> inicialmente, antes de que se establecieran los



**Tabla 24.**

Valores medios multitemporales de los elementos mayores del suelo

### Química de suelos

	pH	M.O %	Ca cmol.kg <sup>-1</sup>	Mg cmol.kg <sup>-1</sup>	K cmol.kg <sup>-1</sup>	Na cmol.kg <sup>-1</sup>	CE dS.m <sup>-1</sup>
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).

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

El sodio no presentó diferencias significativas entre las parcelas evaluadas, con valores registrados entre 0,15-0,21  $\text{cmol.kg}^{-1}$ . En este sentido, Rioja Molina (2002) y Moldenhauer (1999) indican que valores menores a 0,3  $\text{cmol.kg}^{-1}$  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  $\text{dS.m}^{-1}$ . Rioja (2002) considera que valores menores de 0,30  $\text{dS.m}^{-1}$  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  $\text{dS.m}^{-1}$  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 ( $>4,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), 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

### Química de suelos

Fe $\text{mg.kg}^{-1}$	Cu $\text{mg.kg}^{-1}$	Mn $\text{mg.kg}^{-1}$	Zn $\text{mg.kg}^{-1}$	B $\text{mg.kg}^{-1}$
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,

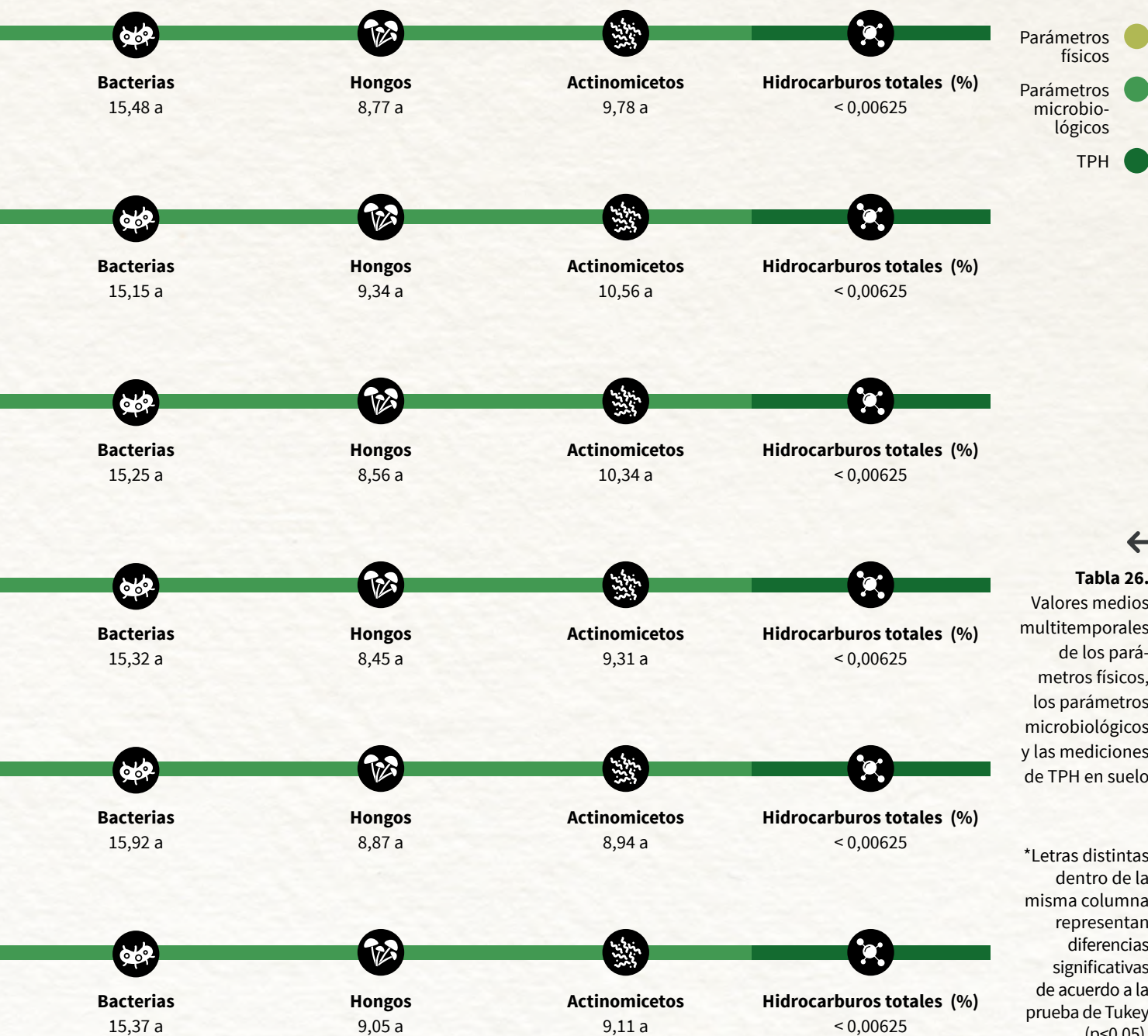
y valores entre 3,0-5,0 mm corresponden a suelos estables. En la tabla 26 se presenta además el análisis estadístico multitemporal realizado a los parámetros microbiológicos del suelo en cada una de las parcelas experimentales. Como se observa, no se dieron diferencias significativas en este parámetro y, con relación a los valores de poblaciones propuestas 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



←  
**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).

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<sup>-1</sup> fracción de hidrocarburos media).

Los metales pesados —y en general los elementos traza— están presentes en relativamente bajas concentraciones (<mg.kg<sup>-1</sup>) 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.



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



Año de revisión  
2003



Año de revisión  
1999



Año de revisión  
1997



Año de revisión  
1999

**Figura 51.** Valores medios multitemporales de los metales pesados del suelo monitoreados (mg.kg<sup>-1</sup>)



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

# Componente cultivos

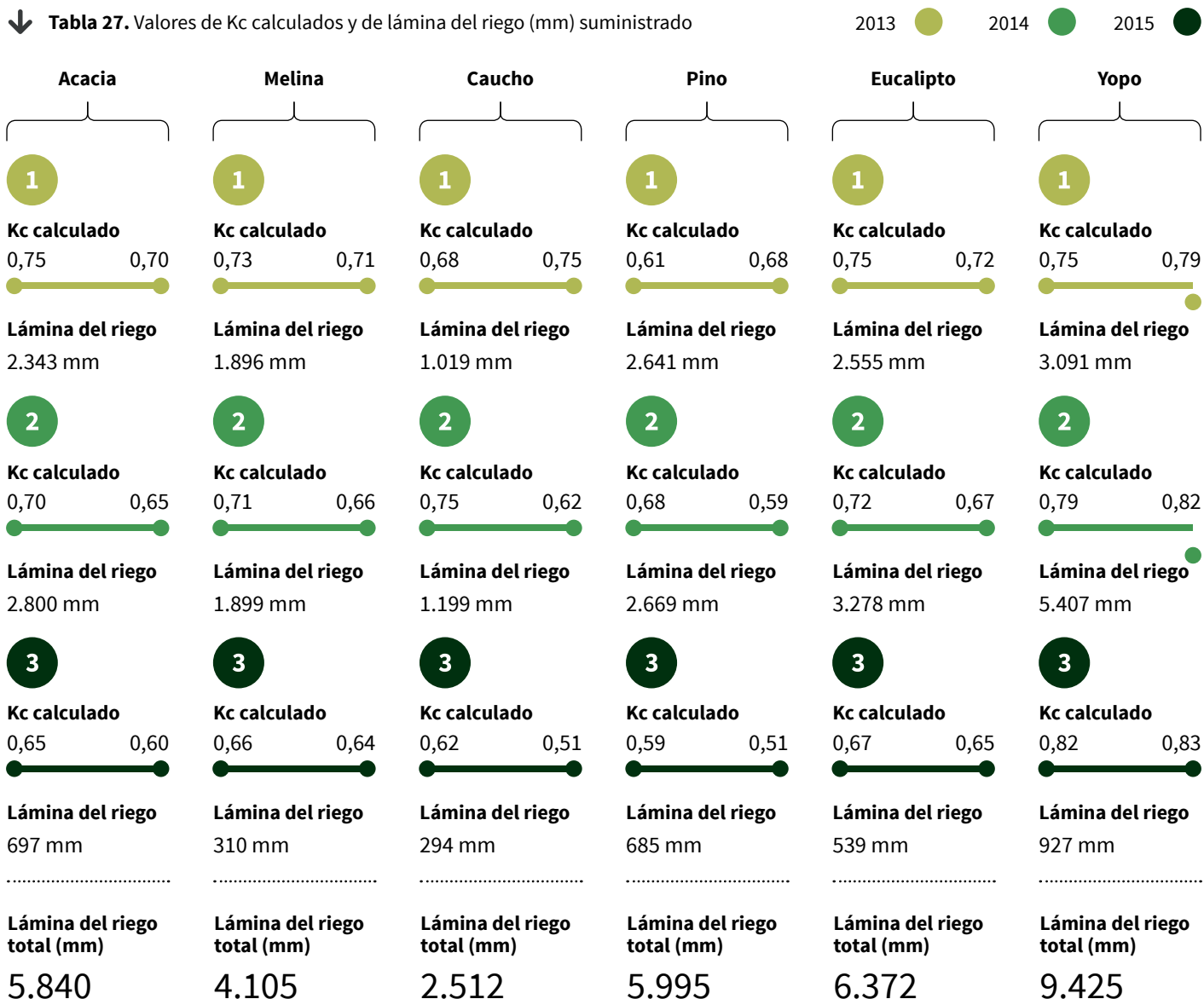
## Requerimientos hídricos de los cultivos de acuerdo a la especie

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

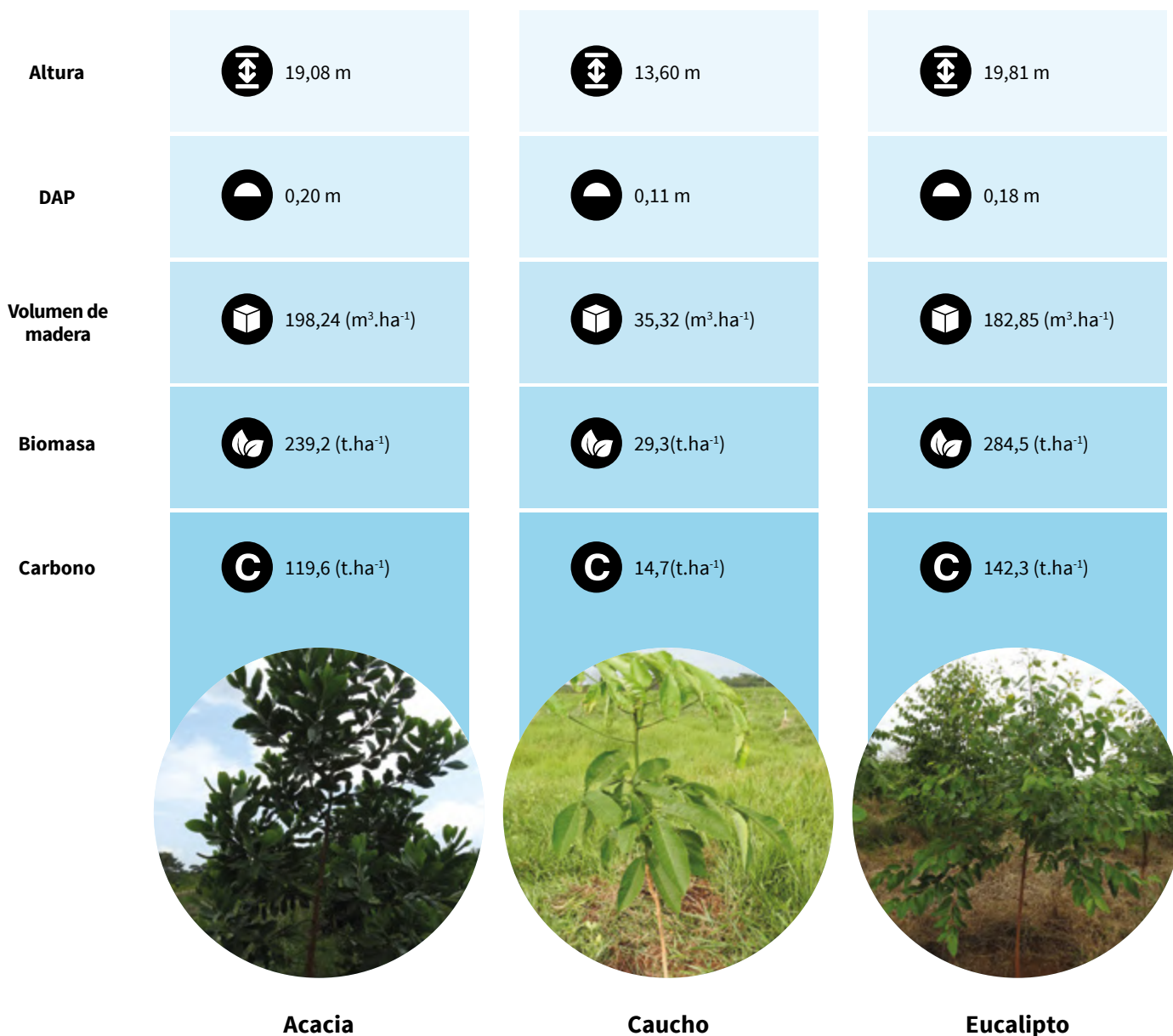
↓ **Tabla 27.** Valores de Kc calculados y de lámina del riego (mm) suministrado



\*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



## Medición de altura total y diámetro a la altura del pecho

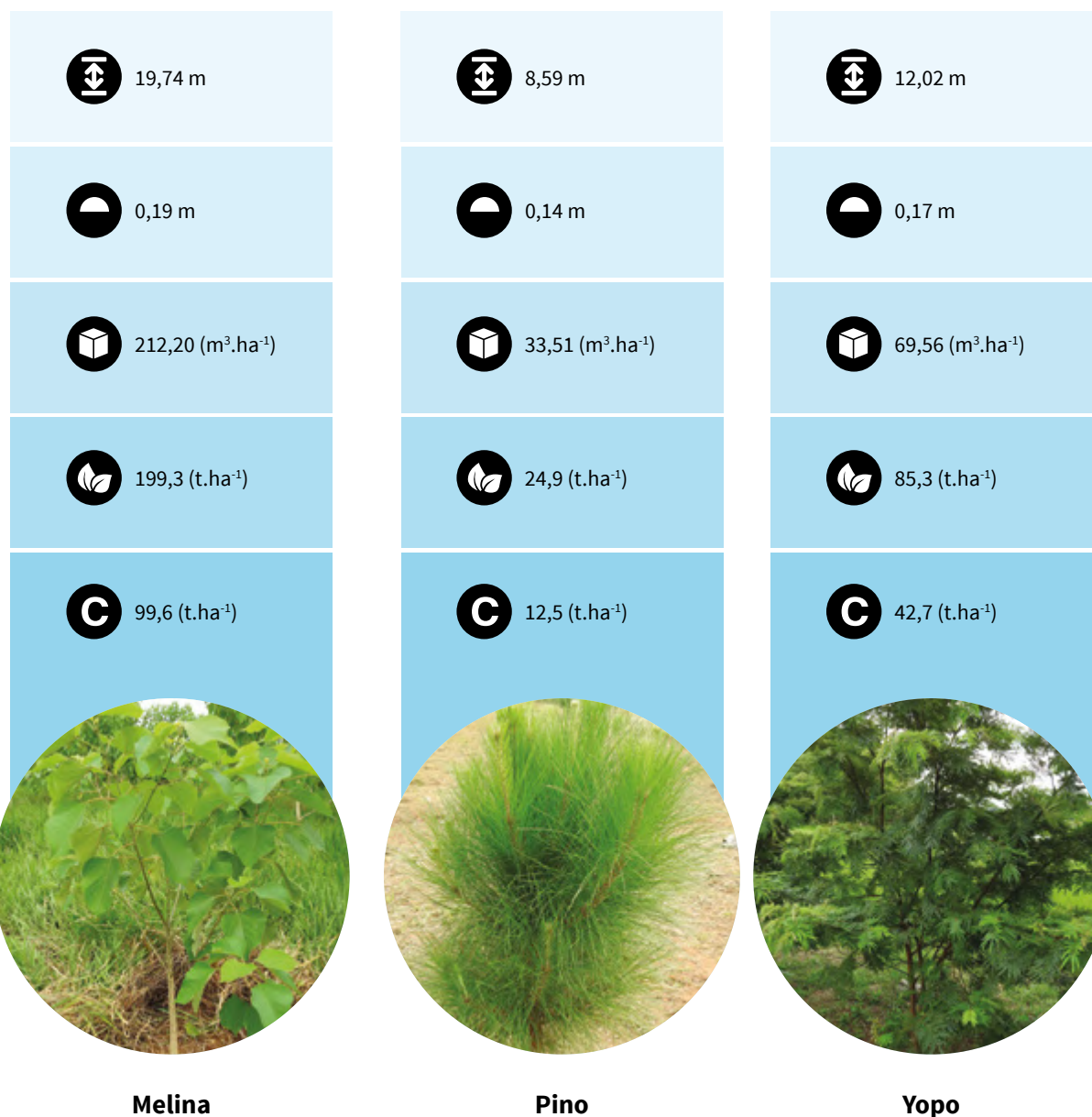
El crecimiento es el aumento gradual en el tamaño de un árbol en un periodo considerado de tiempo. El ritmo de este proceso está determinado por factores internos (genéticos) y externos (sitio), así como por el tiempo. Para los 4,5 años de muestreo de la presente investigación, se obtuvieron los resultados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

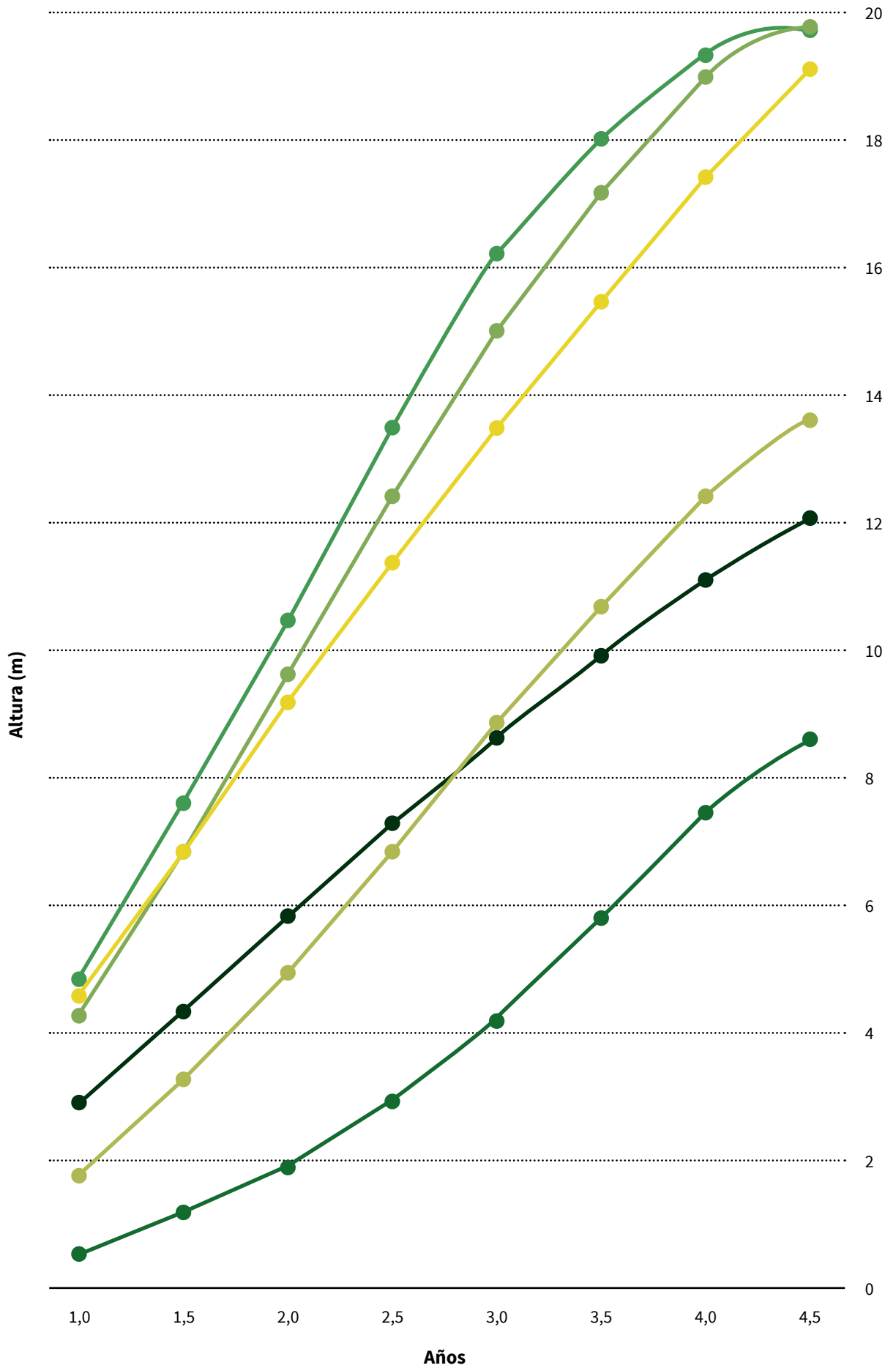
En la tabla 28 se presentan los valores de altura total (m) y DAP (m) para las especies evaluadas a los 4,5 años, además de los resultados de volumen de madera, biomasa y carbono, los cuales serán discutidos más adelante.

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.

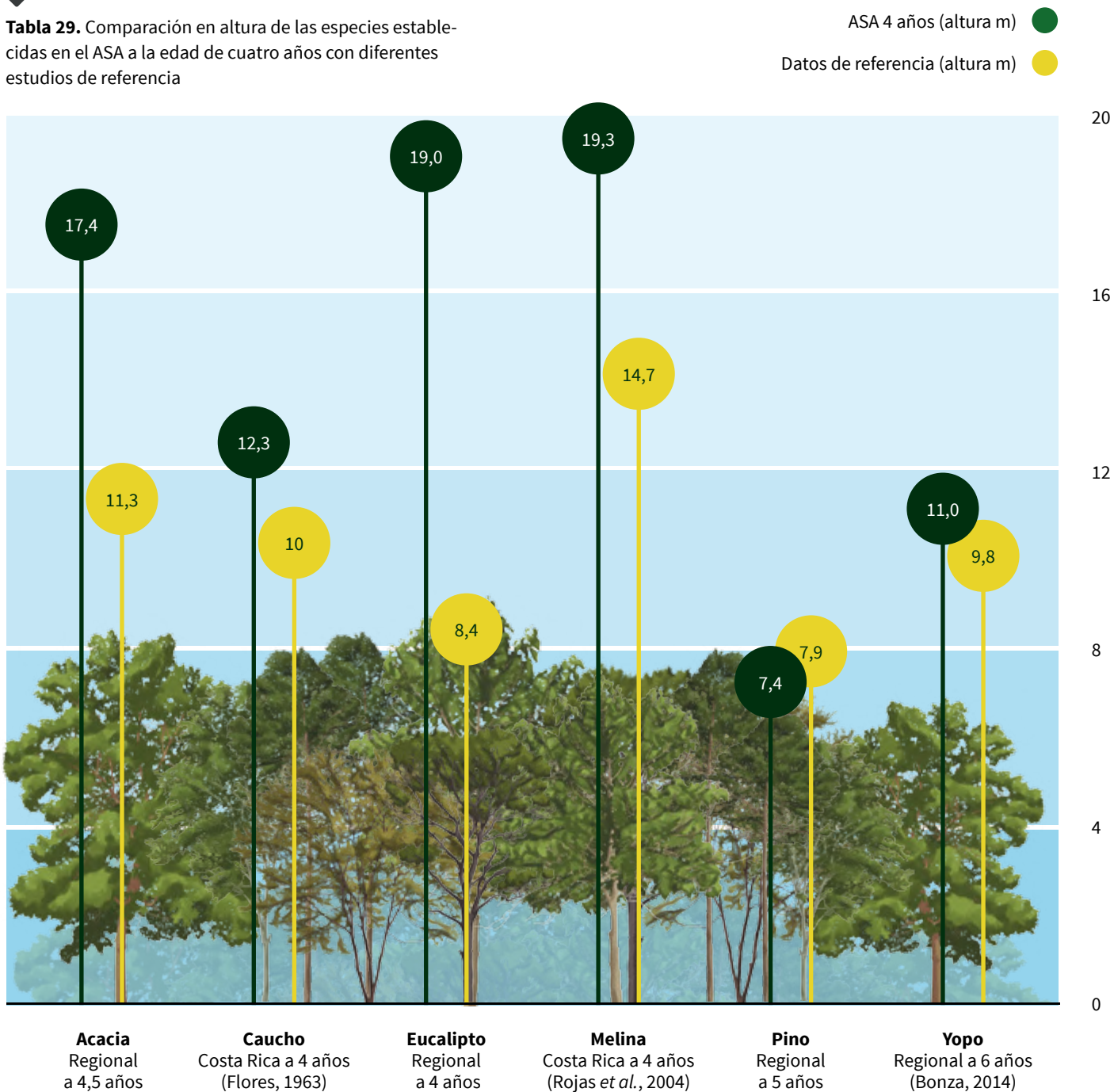
Por otra parte, en la tabla 29 se presenta un comparativo del crecimiento en altura y del DAP de las especies evaluadas en el ASA a los cuatro años, en suelos clase VI del piedemonte llanero, con algunos estudios de referencia encontrados de otros investi-

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



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



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).

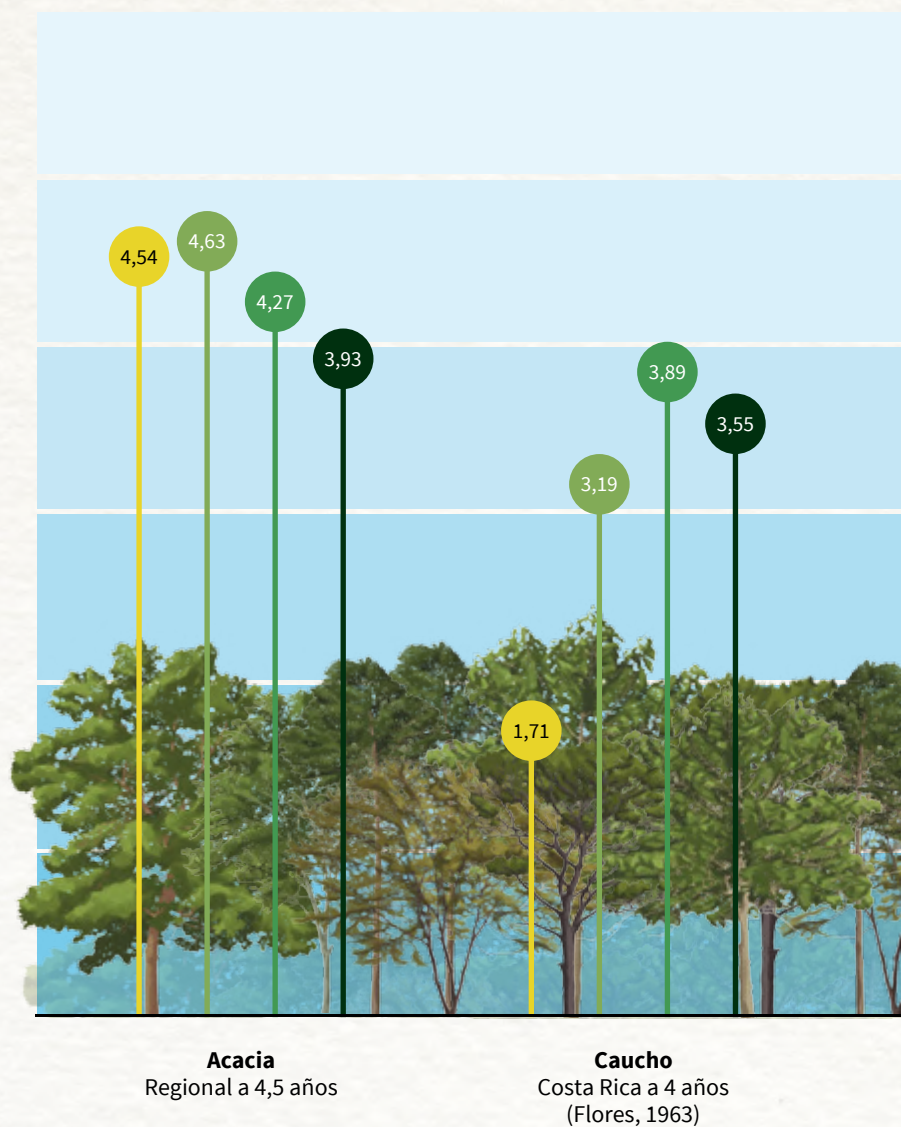
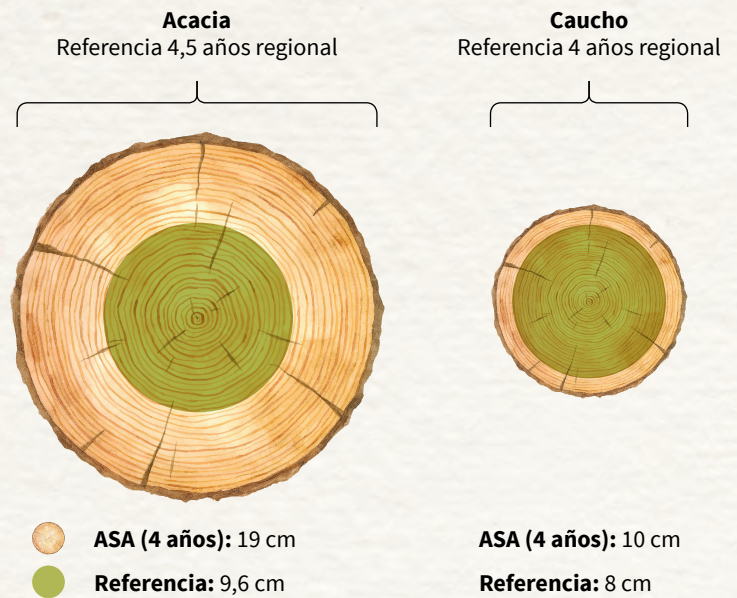
En la tabla 30 se presentan el ICA y el IMA para la altura y para el DAP de las especies establecidas en el ASA en un periodo de monitoreo de cuatro años (el incremento consiste en la diferencia de tamaño entre el comienzo y el final de un periodo de crecimiento). El IMA y el ICA son valores que están 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.

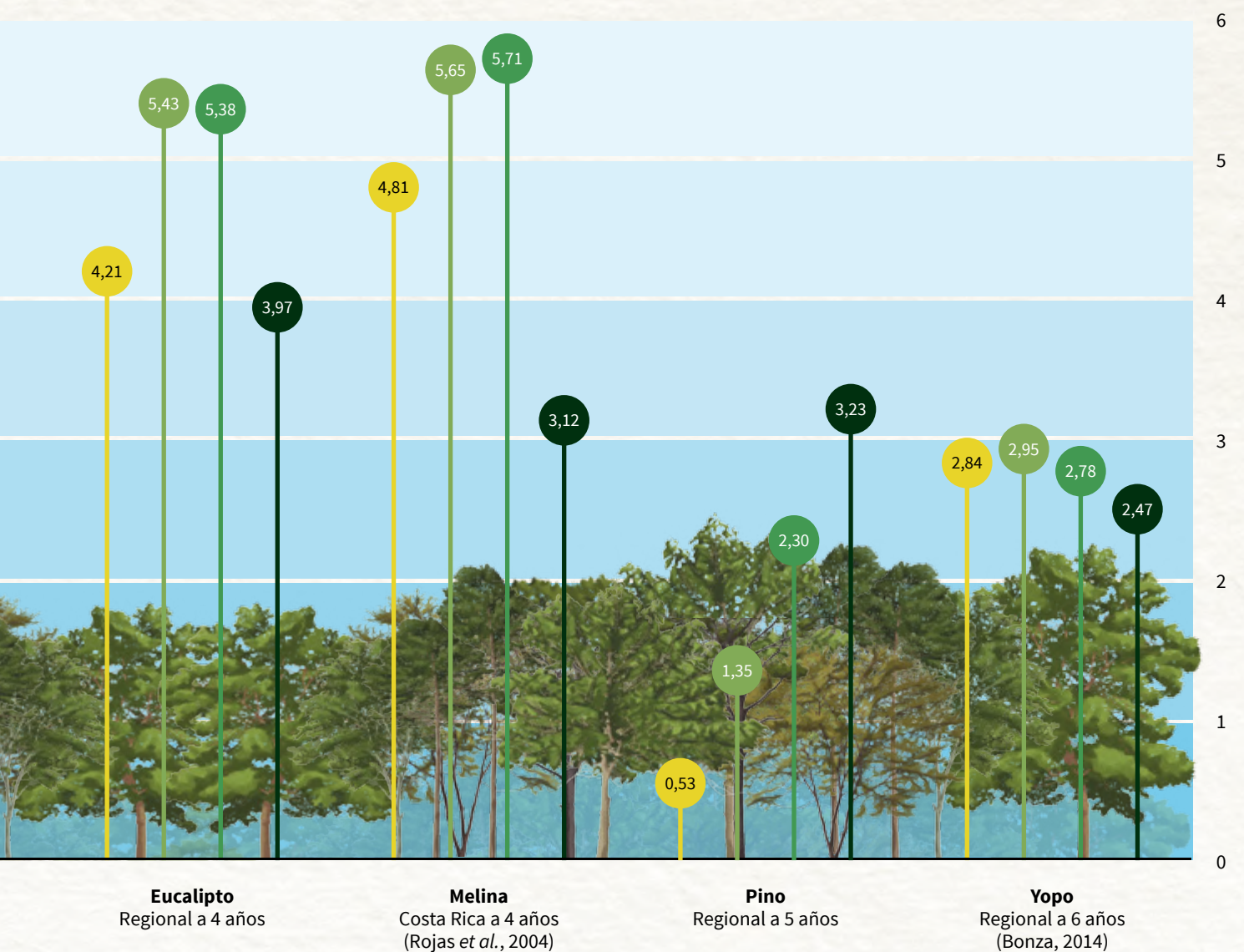
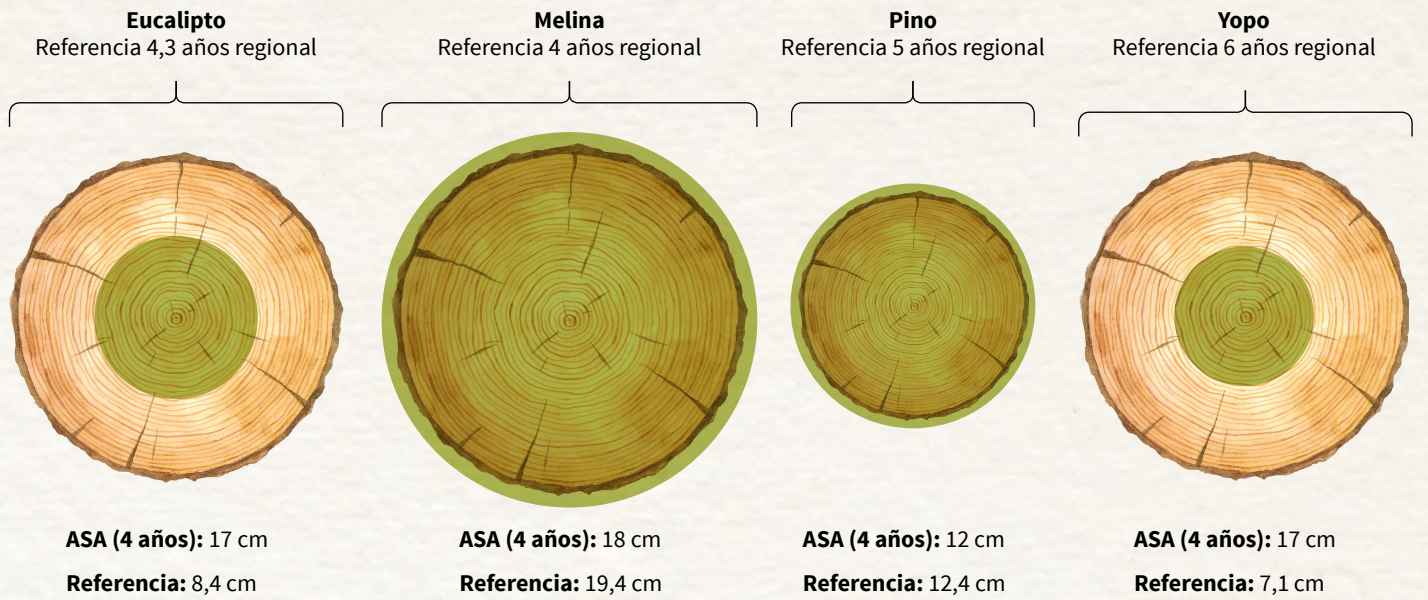
- Año 1
- Año 3
- Año 2
- Año 4



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

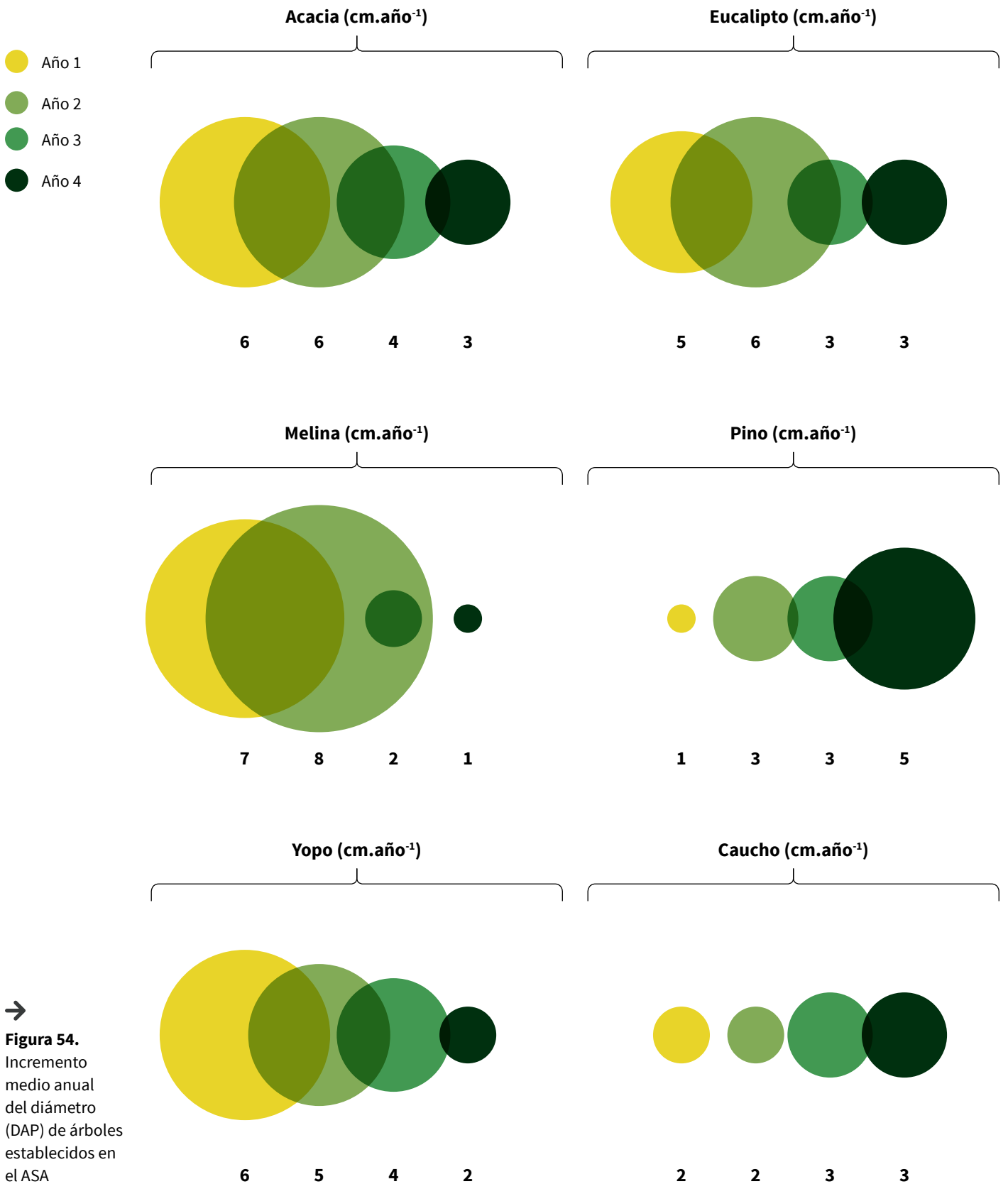
↓ **Figura 53.** Comparación en diámetro (DAP) de las especies establecidas en el ASA con algunos estudios de referencia





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<sup>-1</sup>.

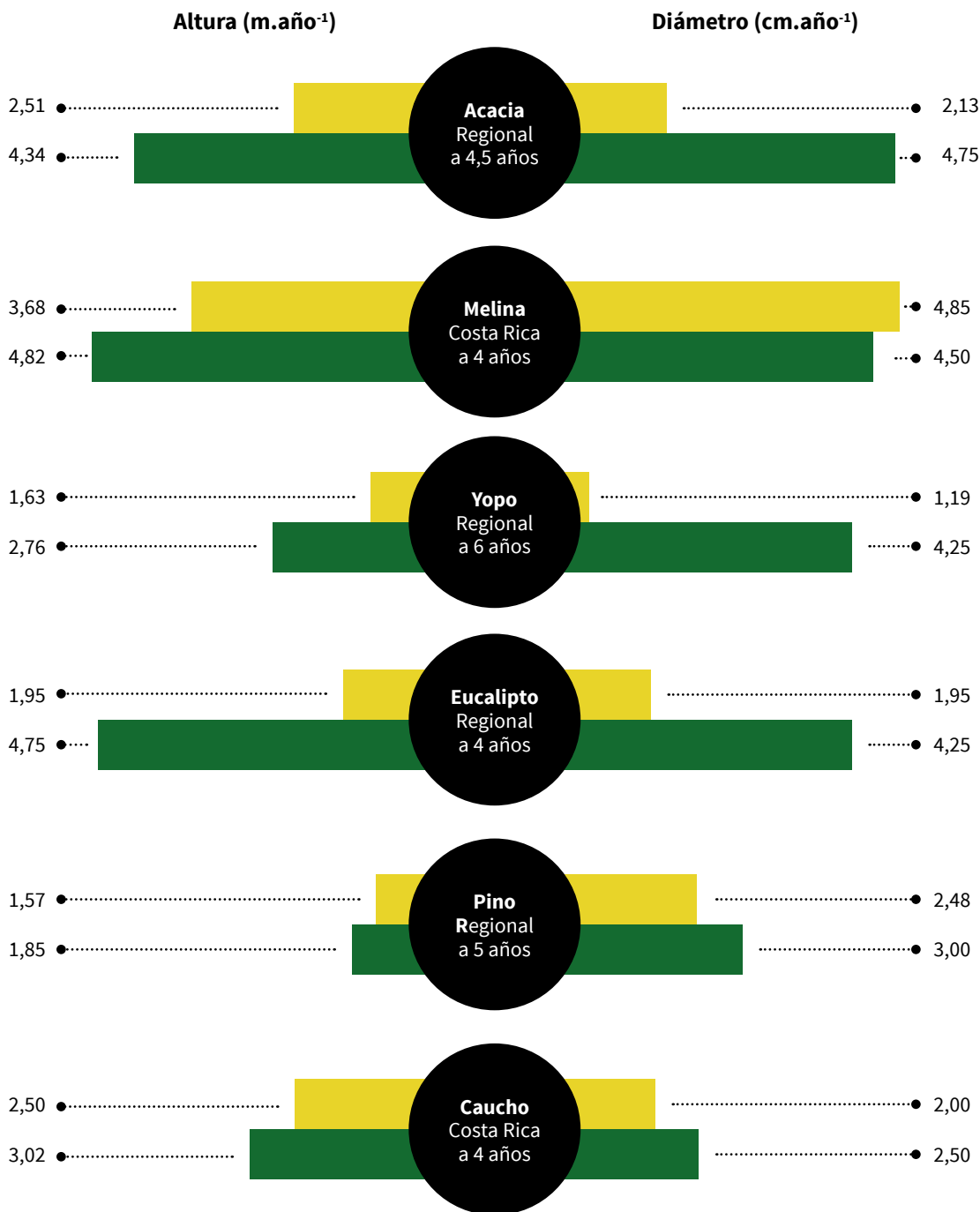


→ **Figura 54.** Incremento medio anual del diámetro (DAP) de árboles establecidos en el ASA

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<sup>-1</sup>; en el caucho dicho promedio es superior a 3 m.año<sup>-1</sup>, comparado con los 2,5 m.año<sup>-1</sup> reportados por referencia; el yopo muestra un IMA de 2,76 m.año<sup>-1</sup>, en contraste con los 1,63 m.año<sup>-1</sup> registrados por la literatura, y el IMA del pino es de 1,85 m.año<sup>-1</sup>, mientras que el valor de

referencia es de 1,57 m.año<sup>-1</sup>. 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<sup>-1</sup> en el ASA vs. 4,85 cm.año<sup>-1</sup> 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 (Yellow circle)  
 IMA ASA (4 años) (Green circle)  
 \*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 figura 56 (a-f), la melina y el yopo están cerca de alcanzar la edad de rotación técnica en cuanto a incrementos de volumen se refiere.



Acacia

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



Melina

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



Caucho

<b>Año 1</b>	0,21
<b>Año 2</b>	1,92
<b>Año 3</b>	11,00
<b>Año 4</b>	27,92
<b>Año 4,5</b>	35,32



Pino

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



Eucalipto

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

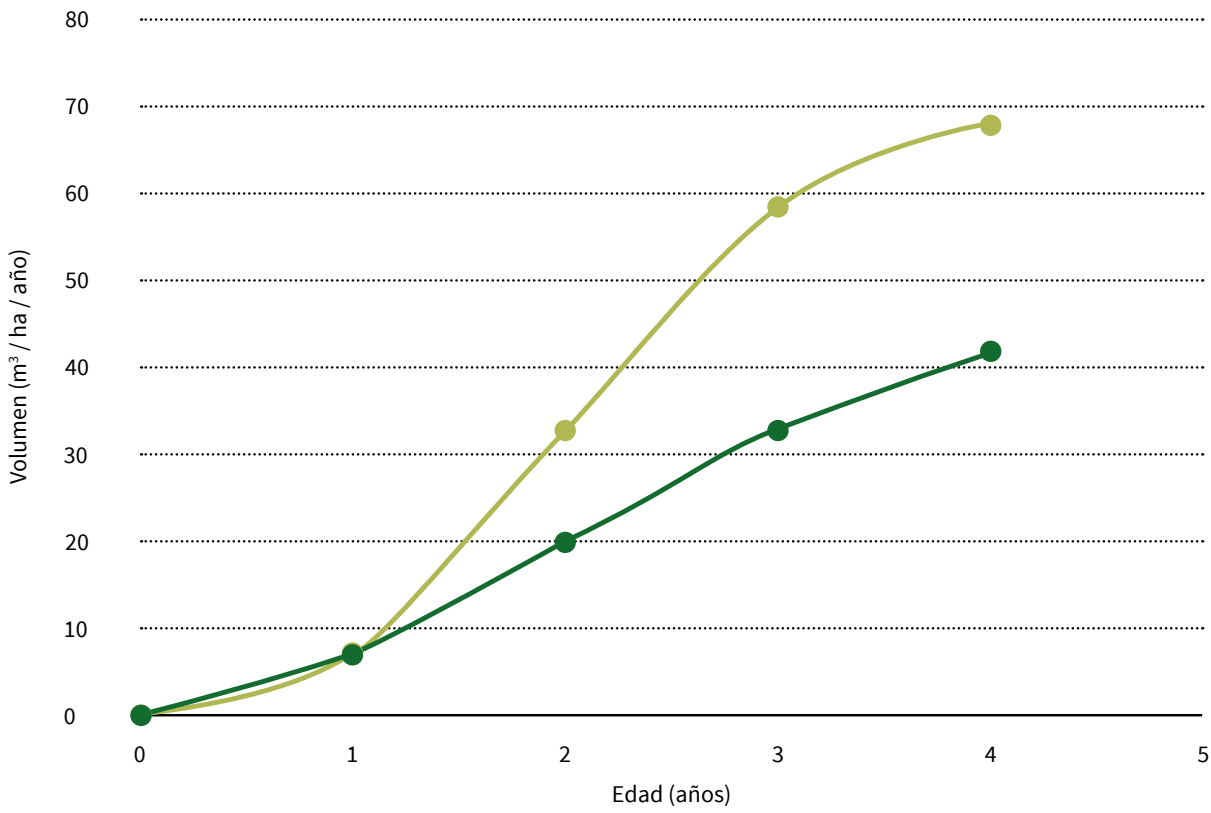


Yopo

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

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

IMA e ICA en volumen total - Acacia



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

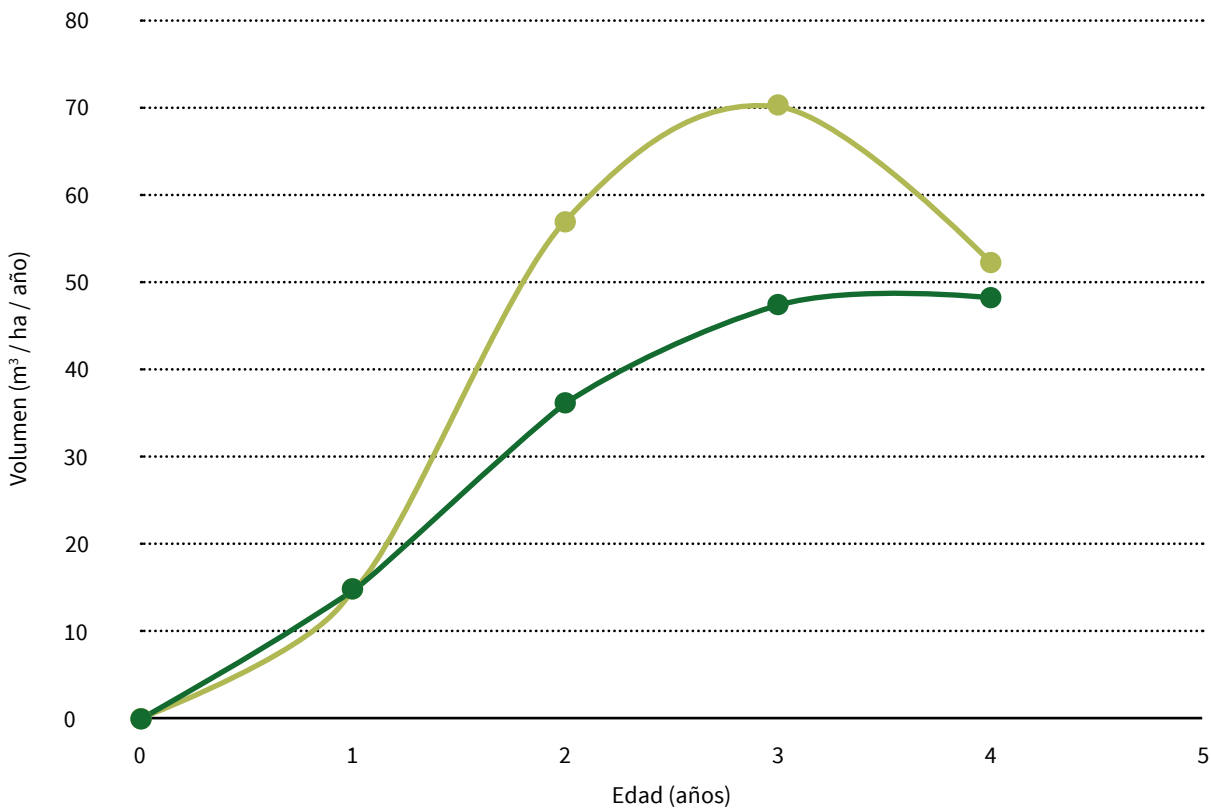
Efecto del uso para riego del agua tratada de producción asociada a la industria de hidrocarburos en el desarrollo y producción de cultivos forestales

ICA ●  
IMA ●



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

IMA e ICA en volumen total - Melina



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

ICA ●  
IMA ●

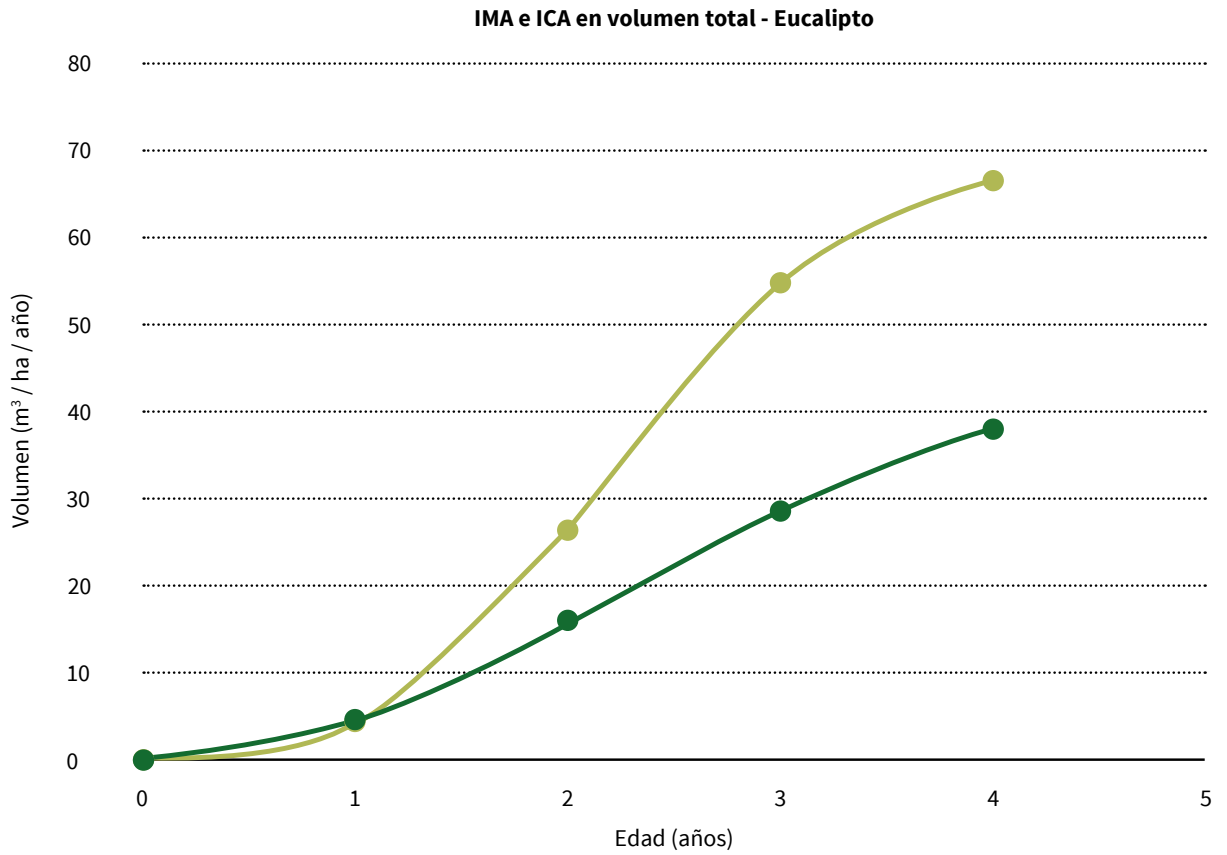


**Figura 56b.** Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Melina)

- ICA
- IMA



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

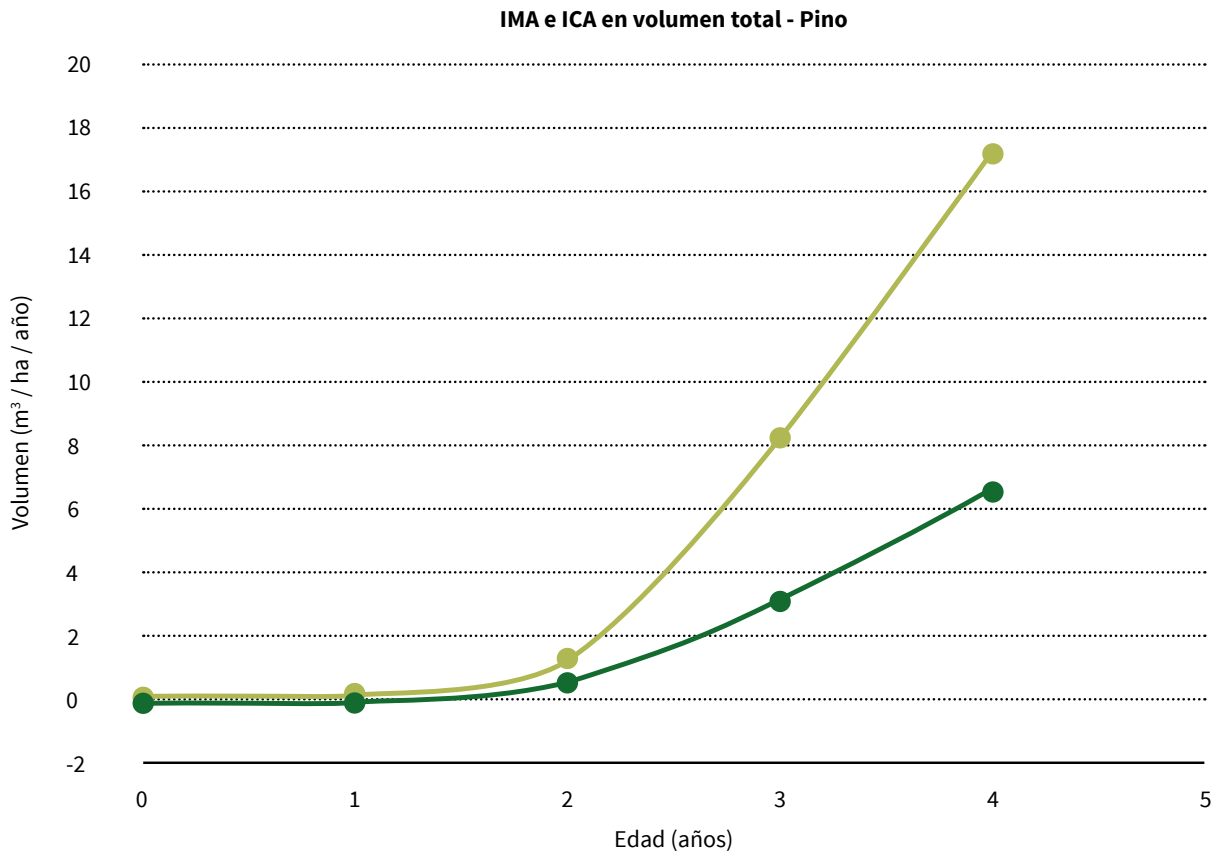


\*ICA: incremento corriente anual. IMA: incremento medio anual.

- ICA
- IMA

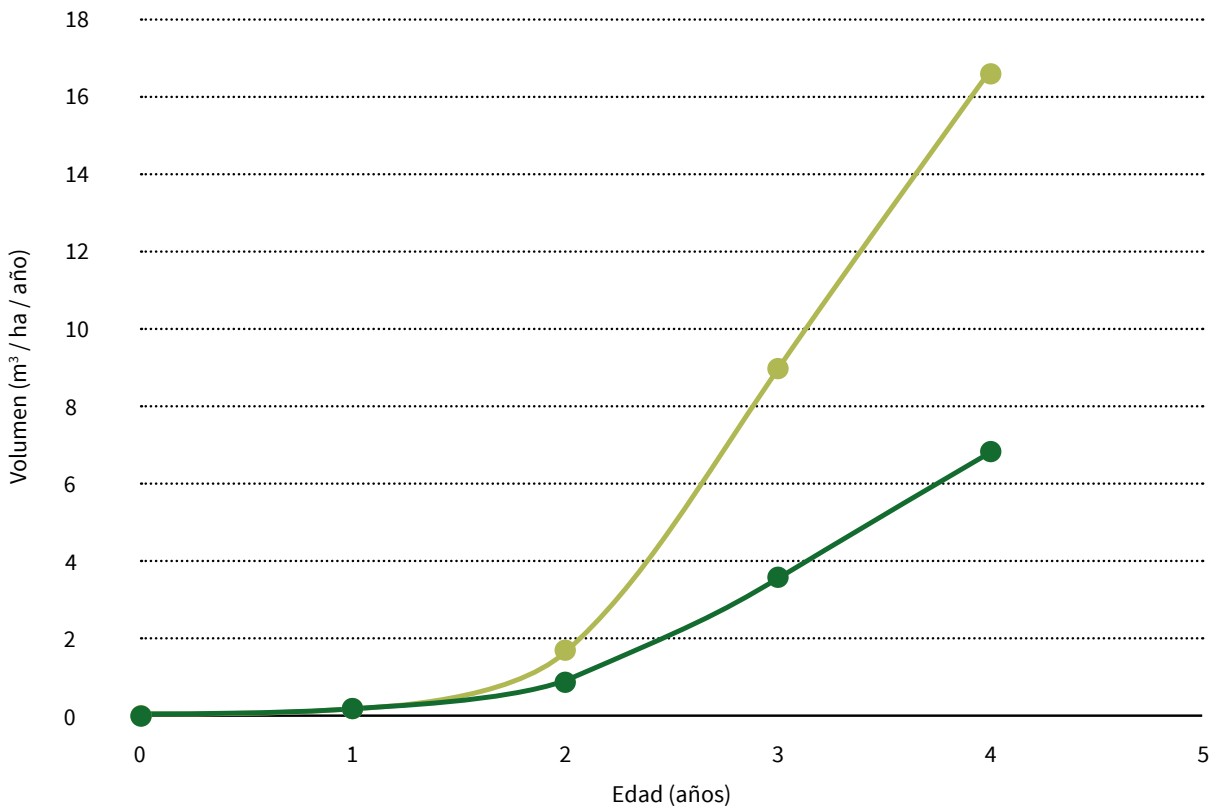


**Figura 56d.** Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Pino)



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

IMA e ICA en volumen total - Caucho



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 ●

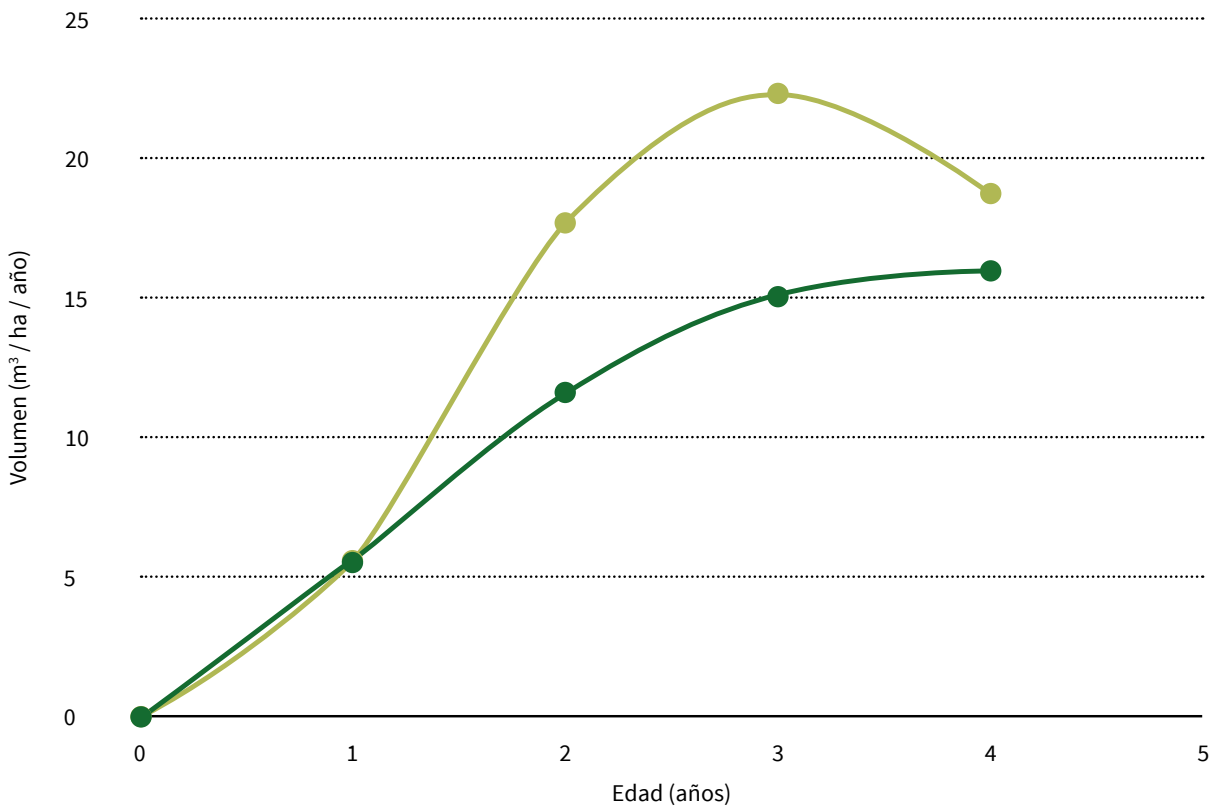


Figura 56e.

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

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

IMA e ICA en volumen total - Yopo



ICA ●

IMA ●



Figura 56f.

Funciones de producción (ICA e IMA) en volumen de árboles establecidos en el ASA (Yopo)

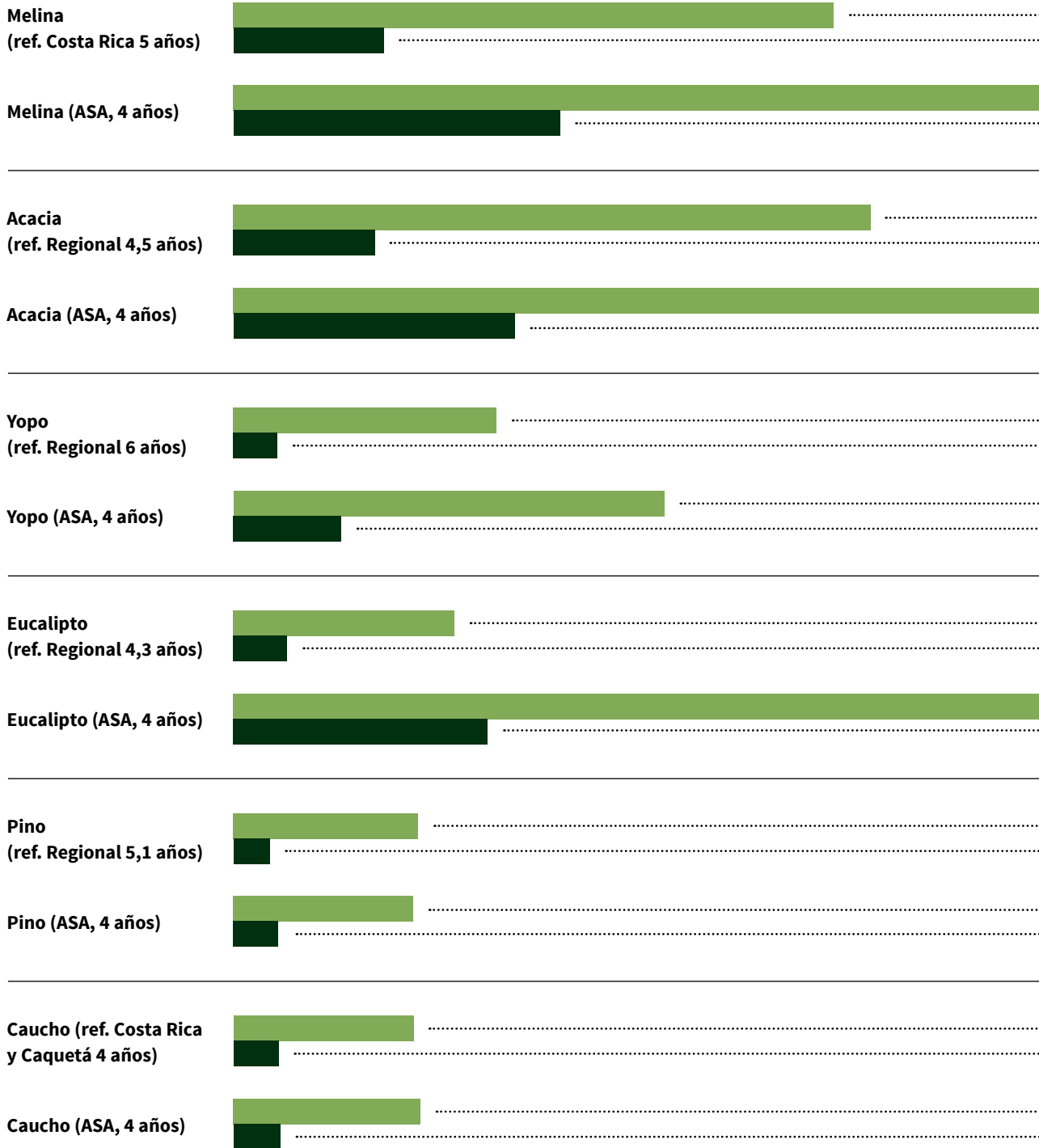
\*ICA: incremento corriente anual. IMA: incremento medio anual.

Ahora, en la figura 57, se presenta un comparativo de la información de volumen de madera en pie obtenida en el ASA con los estudios de referencia consultados tanto a nivel regional como internacional puesto que para algunas especies no se encontraron referencias a nivel regional. Es importante recordar que, si bien el desarrollo y la producción de una especie están determinados por su genética, la adaptabilidad a condiciones

edafoclimáticas, las densidades de población, la edad y el manejo silvicultural, de todas formas es deseable establecer este tipo de cotejos para identificar las ventajas comparativas y determinar la potencialidad económica y ambiental de un determinado sistema productivo.

Como puede apreciarse, las especies comerciales melina, acacia y eucalipto presentan volú-

- Vol. Total  $m^3 \cdot ha^{-1}$
- IMA Vol.  $m^3/ha/año$

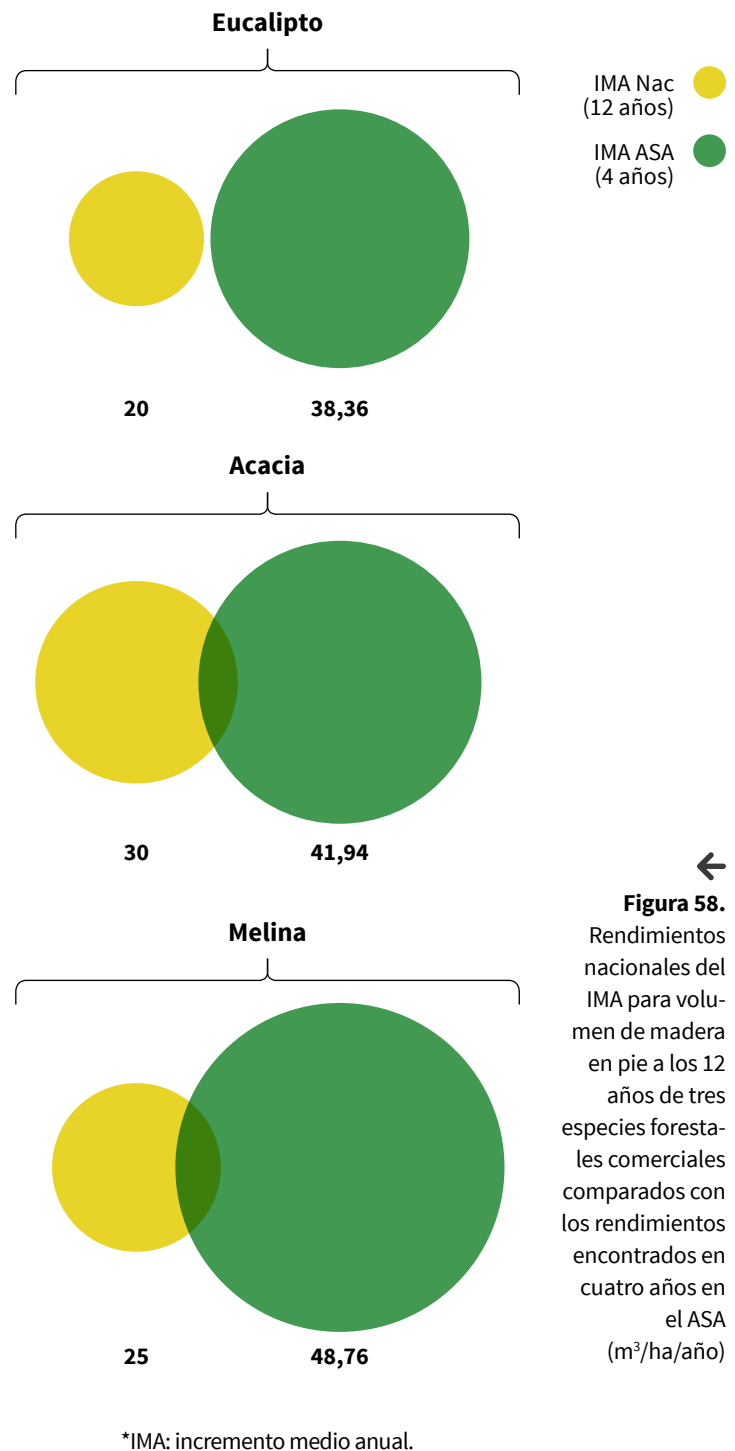
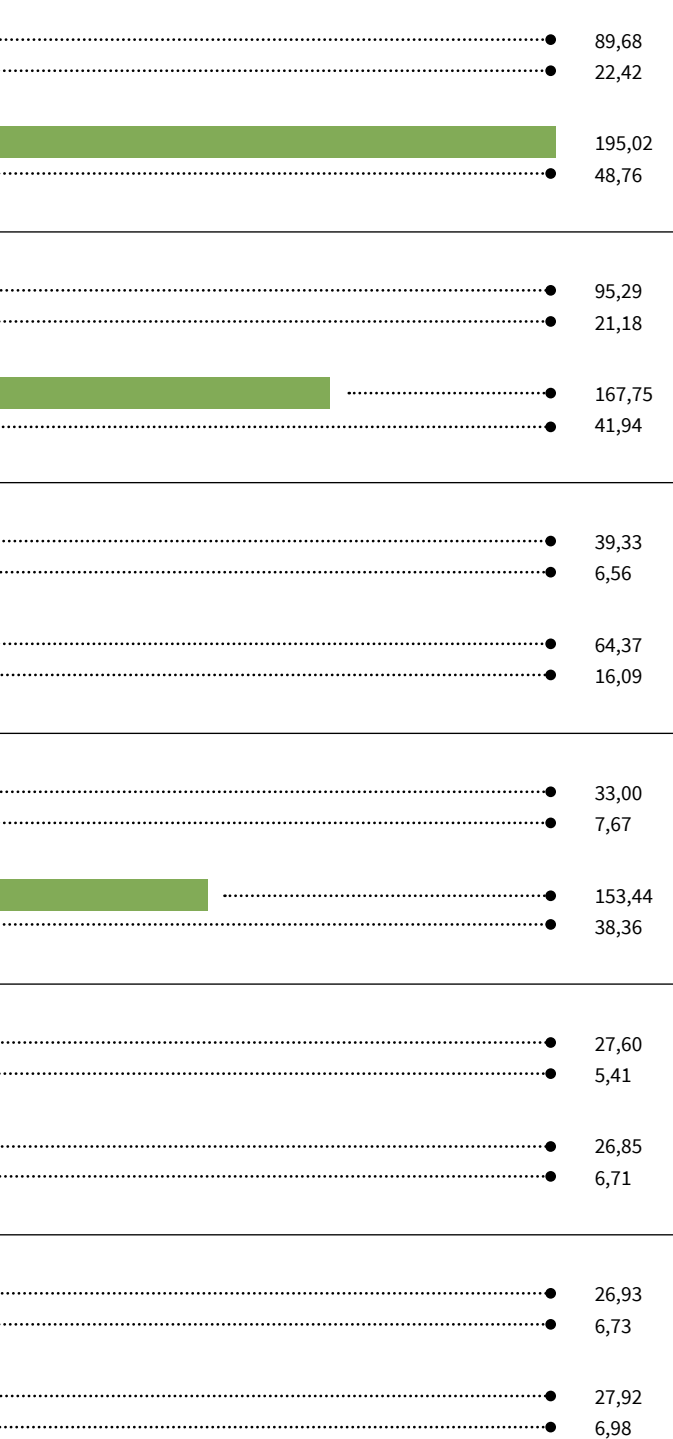


→ **Figura 57.** Comparativo del crecimiento en volumen de madera en pie de las especies evaluadas con referencias regionales e internacionales

menes totales de madera en pie a los cuatro años de establecidas superiores a 150 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, mientras que la información suministrada por las referencias no alcanza los 100 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> en ningún caso. Entretanto, los datos registrados para el yopo muestran el efecto positivo del tipo de manejo que se ha realizado para esta especie en el ASA. Asimismo, el pino y el caucho también muestran, a la luz de esta evaluación,

el efecto trascendente del manejo con ATAEP. Finalmente, la figura 58 refleja una comparación entre los IMA máximos registrados a nivel nacional por Proexport (2012) con la información 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



←  
**Figura 58.** Rendimientos nacionales del IMA para volumen de madera en pie a los 12 años de tres especies forestales comerciales comparados con los rendimientos encontrados en cuatro años en el ASA (m<sup>3</sup>/ha/año)

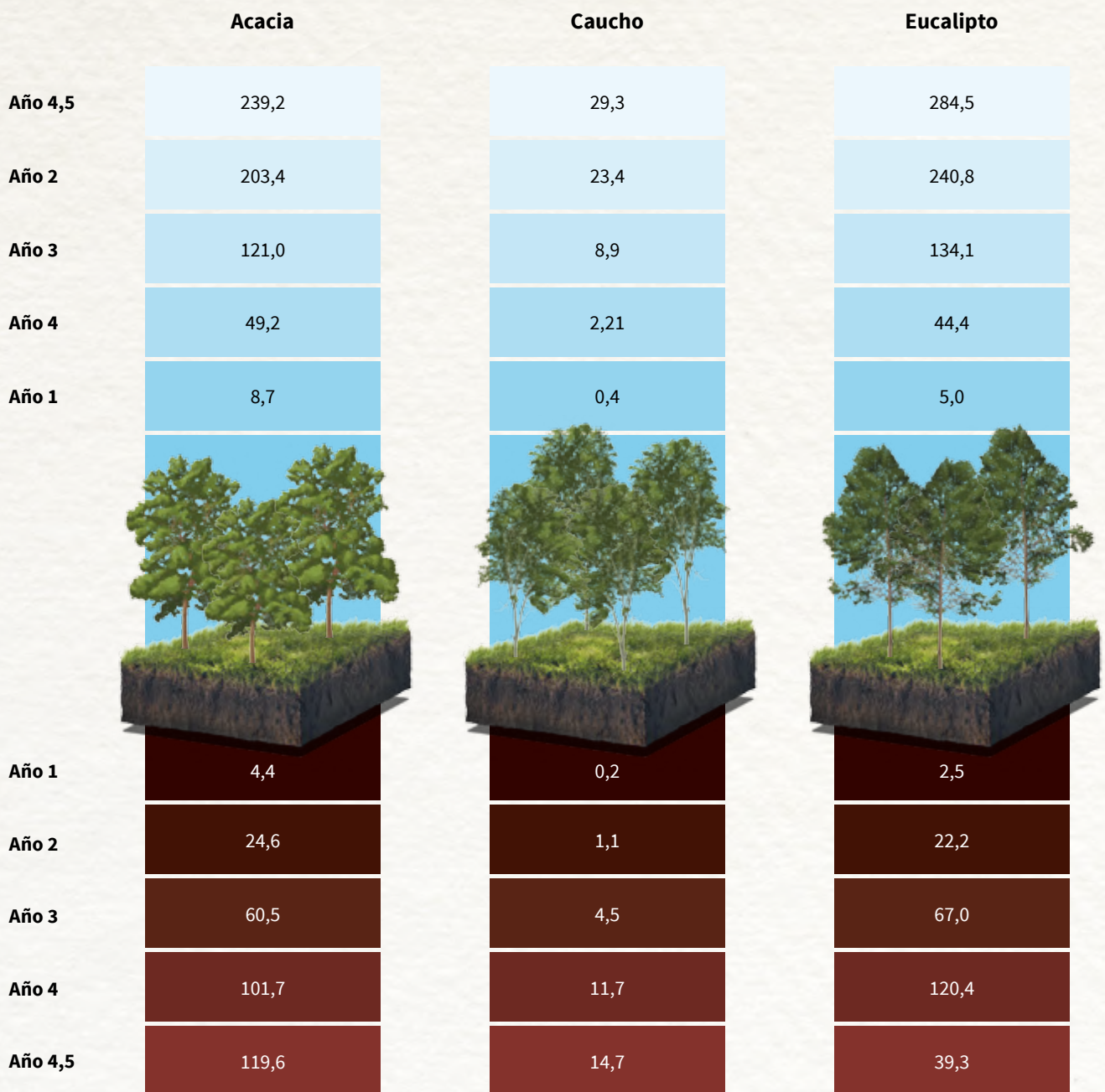
## Cálculo de biomasa

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<sup>-1</sup>, seguido por la acacia (239,2 t.ha<sup>-1</sup>) y la melina, con 199,3 t.ha<sup>-1</sup>.

El pino y el caucho cuentan con los menores valores de biomasa acumulada en pie (24-29 t.ha<sup>-1</sup>) a los 4,5 años de edad; para el yopo se observan valores cercanos a 85 t.ha<sup>-1</sup>, y las especies comerciales eucalipto, acacia y melina, con registros superiores a las 199 t.ha<sup>-1</sup>, 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.

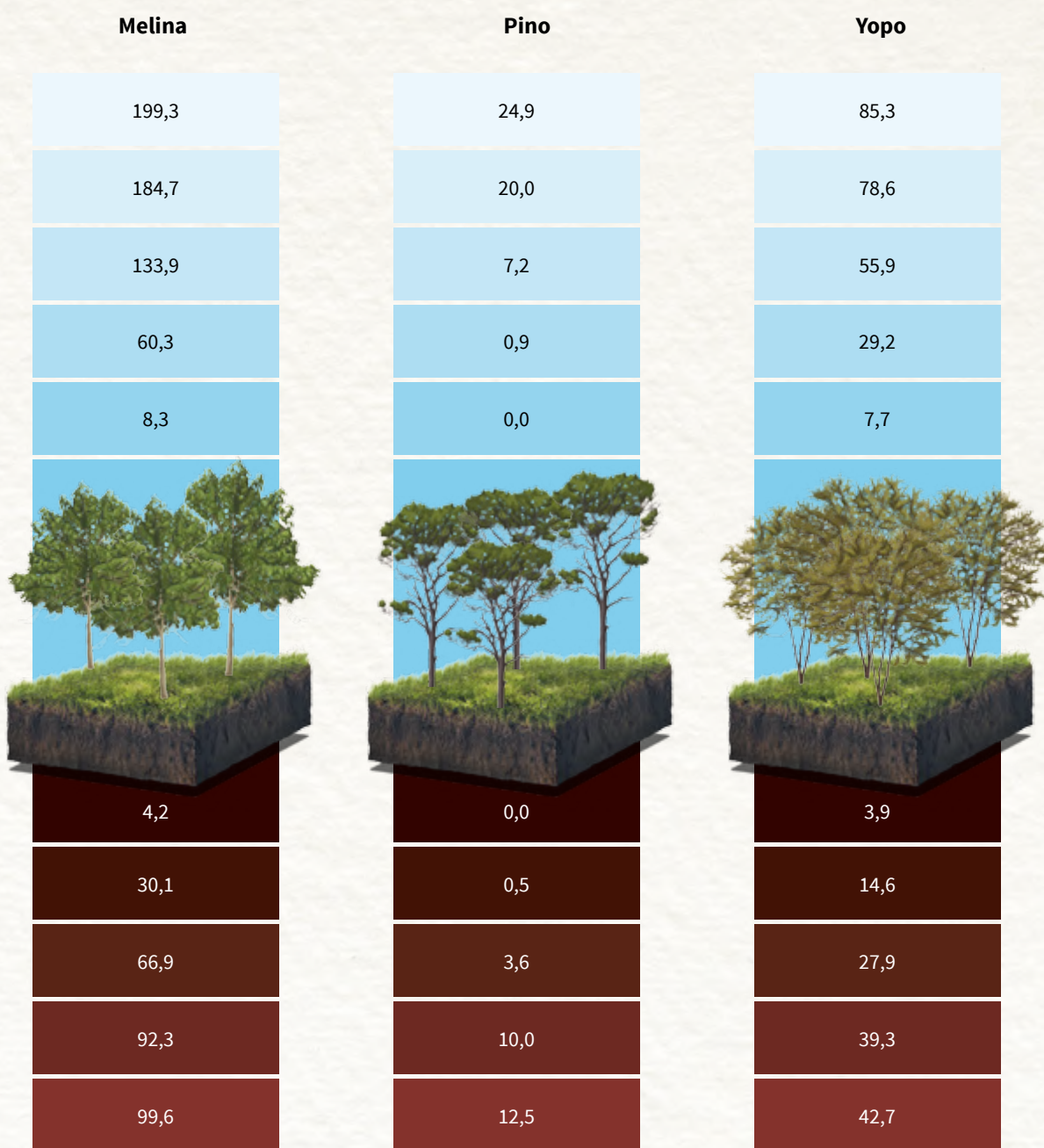
### Estimación de almacenamiento de carbono

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<sup>-1</sup>)

←  
**Tabla 33.**  
Carbono almacenado en pie de las especies forestales establecidas en el ASA (t.ha<sup>-1</sup>)

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 Martiánez, 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).