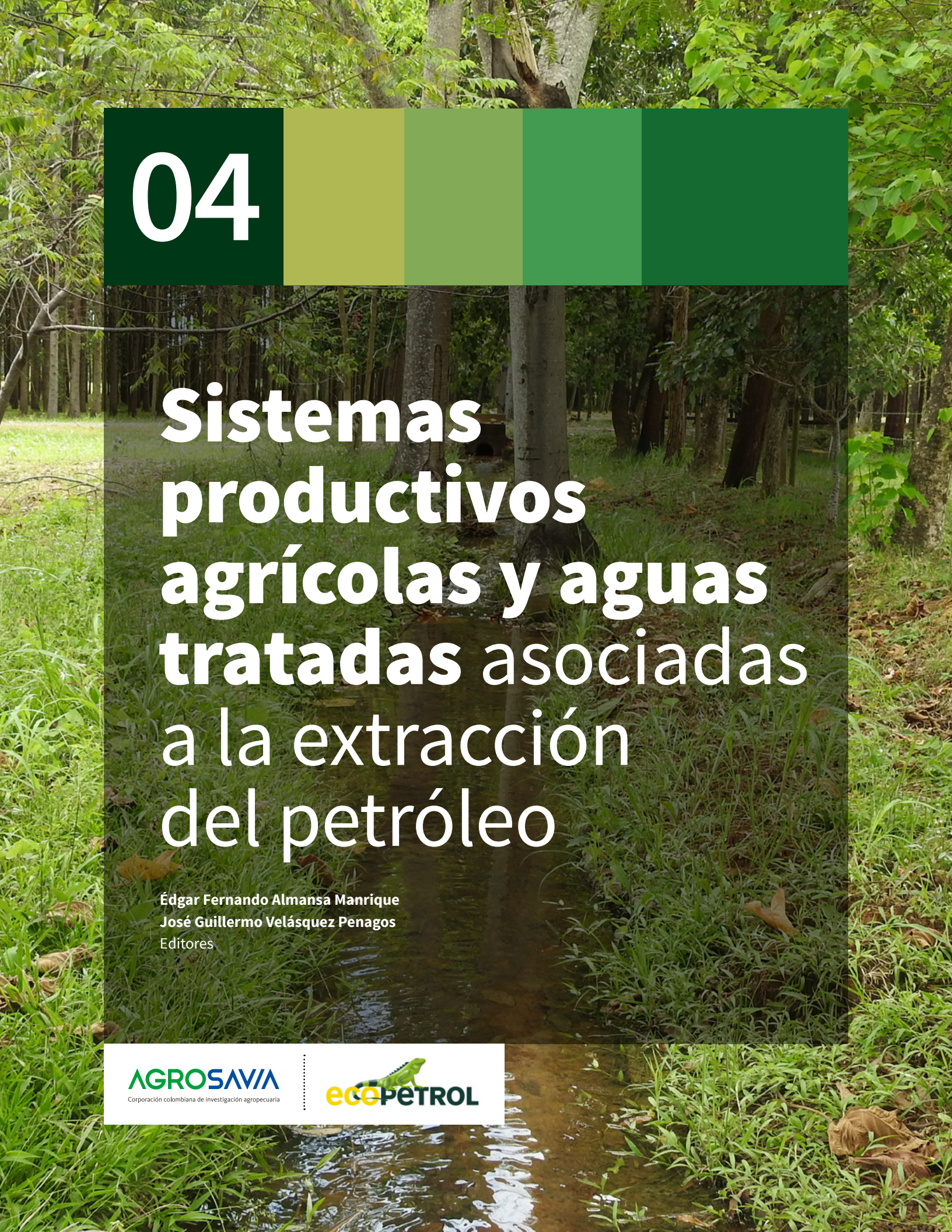


04

Sistemas productivos agrícolas y aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Editores

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria
ecopetrol

04

Sistemas productivos agrícolas y aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Editores

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

ecopetrol

Sistemas productivos agrícolas y aguas tratadas asociadas a la extracción del petróleo / Édgar Fernando Almansa Manrique [y otros ocho] editado por: Édgar Fernando Almansa Manrique y José Guillermo Velásquez Penagos -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2020.

116 páginas -- (Colección Transformación del agro)
Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos
ISBN obra impresa: 978-958-5461-68-0
ISBN e-Book: 978-958-5461-69-7

1. Conservación de suelos 2. Lisímetros 3. Riego 4. Biodiversidad 5. Cultivos 6. Hidrocarburos 7. Factores climáticos 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
Víctor Fabio Luna Mora
Viviana Irene Romero Ramírez
Milady Ruiz Nieves
Gloria Estefanía Pastrana Aguirre
Ruth Lucena Marín Romero
Ricardo Botero Quintero

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: 978-958-5461-68-0
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). *Sistemas productivos agrícolas y aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo*. 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, Guillermo González, Óscar Rondón, Álvaro Cárdenas, Julián Peláez, Zulay Tafur, James Franco, Fernando García, Albert Gutiérrez, Orlando Arguello, Nubia Rodríguez, Nelson Baquero, Lina Moreno, Judy Chacón, Ramón González, Paola Espinosa, Ciro Ortiz, Nora Cubillos y Xiomara Pulido. En Ecopetrol a Lupe Estupiñán, Mauricio Herrera, Wilson De Lacruz, Giovanni Annicharico, Andrés Zárate, Juan Burgos, Daniel Torregrosa, Yalitza Sierra, Javier Genaro Gutiérrez, Héctor Castaño, Héctor Manosalva, Omar Armando Baquero y José Cotello.

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



Contenido



01

Investigación bajo condiciones controladas en dos localidades, CI La Libertad y Castilla La Nueva

P. 10



02

Efecto del uso de las aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo en el suelo, el agua y las especies vegetales de interés económico en condiciones de campo

P. 58



03

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de influencia del ASA

P. 88



04

Conclusiones y referencias

P. 100

Resumen

La explotación de pozos petroleros está ligada a la producción de grandes cantidades de agua que son extraídas de las profundidades de la corteza terrestre al mismo tiempo que el petróleo. Ecopetrol realizó a través de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) trabajos de investigación sobre el efecto de estas aguas en la producción agrícola cuando se usan para riego. El objeto de estas investigaciones es desarrollar modelos de uso de aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo (ATAEP) en actividades rurales, de manera que se le pueda dar un uso alternativo al suelo y aprovechar racionalmente un recurso que tiende en el tiempo a ser escaso y costoso.

El proyecto se ejecutó entre los años 2012 y 2015 en los municipios del área de influencia de Ecopetrol en el piedemonte del departamento del Meta: Villavicencio, Acacías y Castilla La Nueva. Comprendió dos componentes básicos: el primero, que se realizó en el Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia (Villavicencio) y en la Estación 2 de Castilla La Nueva, estuvo relacionado con el monitoreo, en condiciones controladas (lisímetros), del efecto del riego con ATAEP en la calidad y la salud del suelo, así como en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos.

El segundo componente contempló la evaluación, en condiciones de campo, del efecto en suelos, cultivos y biodiversidad de la utilización de ATAEP como riego en el ASA. Esta actividad se realizó en un predio adquirido por Ecopetrol para tal fin. El proyecto involucró, además, acciones de socialización y capacitación de la tecnología y del conocimiento desarrollado a través de metodologías participativas.

Finalmente, y teniendo en cuenta que el suministro permanente de agua para riego contribuye a superar la estacionalidad de la producción que se presenta en la región, se contempló la diversificación de las alternativas productivas involucrando especies forestales dendroenergéticas y agroindustriales (caucho, yopo, guadua y acacia, entre otros) y un manejo predial aplicando principios de conservación y restauración ambiental.

Introducción

Actualmente, en el contexto ambiental, la actividad minera es considerada “transitoria en el tiempo” (Bayona, 2017) ; por lo tanto, los proyectos mineros y las actividades de recuperación ambiental asociados deben ser planificados de acuerdo con un determinado “uso final del territorio”, procurando siempre minimizar los efectos adversos sobre el ambiente.

Según lo anterior, Ecopetrol ha realizado a través de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) trabajos de investigación sobre el efecto en sistemas productivos agropecuarios del uso de las aguas de producción tratadas en los STAP (sistemas de tratamiento de aguas de producción). El propósito de los estudios es desarrollar modelos de uso de estas aguas en actividades productivas, con miras a mitigar el posible impacto negativo en la calidad del agua de las microcuencas, obtener un uso alternativo del suelo y un aprovechamiento racional de un recurso que tiende en el tiempo a ser escaso y costoso, y desarrollar paradigmas sustentables de producción que, respetando la tradición rural de las comunidades, permitan planificar un uso final del territorio.

Las aguas que salen de la zona industrial de Ecopetrol en la Superintendencia de Operaciones de Castilla y Chichimene (SCC) cumplen con la normatividad legal ambiental para ser vertidas a un cauce superficial de agua. Sin embargo, como estrategia que contribuya a disminuir la presión sobre estos cuerpos de agua, es conveniente evaluar su uso potencial en sistemas productivos, aprovechando la inversión realizada en su adecuación y aumentando la eficiencia en el uso del recurso en el área de influencia, especialmente en la época seca del año (cuatro meses), cuando se convierte en la principal limitante a la producción agropecuaria.

Muchas regiones del mundo están experimentando crecientes problemas de déficits hídricos. Esto se debe al crecimiento implacable de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución, sumado a las periódicas sequías asociadas a factores climáticos y a la baja capacidad de almacenamiento de los suelos. De cualquier manera, la escasez de agua en todos sus aspectos conlleva graves costos económicos, sociales e incluso políticos.

En tiempos de escasez extrema, las autoridades suelen optar por derivar el agua de los agricultores hacia las ciudades dado que el agua tiene mayor valor económico en su uso industrial y urbano que en la mayoría de los fines agrícolas. Ante este panorama, el agua de reúso en agricultura surge como una alternativa viable para conservar agua dulce con fines económicos y sociales y, al mismo tiempo, darles a los agricultores un suministro de agua fiable para sus actividades productivas y obtener importantes beneficios ambientales. De tal modo, esta opción ha venido siendo estudiada y adoptada cada vez más en regiones con problemas de escasez de agua, hasta tal punto que en alrededor de 50 países la agricultura sobresale como usuario principal de este tipo de aguas, en aproximadamente el 10% de todas las tierras de regadío (UN Water,2017).

Sin embargo, se trata de un proceso que requiere planificación integral de todos los recursos hídricos para lograr una utilización del agua más eficiente y sostenible desde el punto de vista económico.

Con vista en lo anterior, en el área de influencia de Ecopetrol (Acacías, Castilla La Nueva y Villavicencio) se llevó a cabo desde el 2006 un proyecto para evaluar el uso de ATAEP en el desarrollo de cultivos de potencial importancia económica (agroenergéticos) y en especies pecuarias de interés, además de monitorear el impacto ambiental que estos procesos conllevan.

El proyecto inició con una fase de investigación en espacios controlados, con suministro regularizado de agua. Posteriormente, y con base en los resultados obtenidos en los dos primeros años de la investigación, se complementó con la fase de campo a partir del 2009. En este documento se presentan los resultados de las investigaciones agrícolas y de los trabajos de restauración ambiental realizados en el desarrollo del convenio entre Agrosavia y Ecopetrol.





01

Investigación bajo condiciones controladas en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Édgar Fernando Almansa Manrique
Julián Andrés Peláez Montoya
Ruth Lucena Marín Romero

En un pozo petrolero el mayor producto de desperdicio es lo que se conoce como agua de producción. Según Mesa *et al*. (2018), "el agua de la industria del petróleo en Colombia se usa y/o se genera en las fases de exploración, producción, transporte y refinación; siendo más alto su consumo en la fase de producción, con 91,72% del total. En esta fase se incluyen actividades como: vertimientos industriales, vertimientos domésticos, aguas de producción, reinyección para recobro mejorado, inyección como destino final, y vertimiento a cuerpos de agua".

En los últimos tiempos, debido a una creciente preocupación de la sociedad por los temas ambientales y siendo Ecopetrol una empresa comprometida con el cuidado y conservación del medio ambiente en los sitios en donde realiza sus actividades de explotación, conformó una alianza con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) con el objetivo de investigar las posibilidades de utilizar el agua de producción previamente tratada en los STAP en sistemas agropecuarios.

El agua de producción puede ser tratada y eliminada por varios métodos, la mayoría de los cuales se limitan a cumplir con lo establecido en la norma ambiental para vertir dicho líquido a corrientes superficiales. En todo caso, el agua tratada debe cumplir con la normatividad colombiana sobre el uso de aguas residuales tratadas (Resolución 1207 de julio de 2014).

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 m^2), 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 observan en un cultivo convencional.

Ubicación

La investigación bajo condiciones controladas se ubica geográficamente en dos localidades del piedemonte llanero; específicamente, en el Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia, en el municipio de Villavicencio, y en Castilla La Nueva, en la estación 2, pozo 10 de Ecopetrol.

El invernáculo 1 del CI La Libertad se encuentra localizado geográficamente a los 04° 3' 32,39" latitud norte y 73° 27' 59,86" longitud oeste. Está constituido por 64 tanques lisimétricos, y el suelo empleado presenta textura franco arenosa arcillosa (FArA). Por su parte, el invernáculo 2 de esta misma localidad se encuentra ubicado geográficamente a los 04° 3' 42,45" latitud norte y 73° 27' 39.87" longitud oeste, y está conformado por 16 tanques lisimétricos; el suelo utilizado es de textura franco arenosa (FA).

Los invernáculos 1 y 2 de la localidad de Castilla La Nueva se encuentran ubicados en la vereda Cacayal 03° 53' 26,66" latitud norte y 73° 40' 44,02" longitud oeste, en terrenos de Ecopetrol aledaños a la estación 2, cerca de las piscinas de tratamiento de aguas de producción. Esta área consta de 80 tanques lisimétricos, y los suelos utilizados son de textura franco arcillosa (FAr).

Metodología

- Se implementó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos de calidad y dotación de agua y tres repeticiones.
- Se establecieron tres coberturas: caña de azúcar (CC-8592), pasto elefante y suelo desnudo.
- Se utilizaron láminas de riego controladas (según el consumo registrado con medidores de humedad edáficos), con una frecuencia de dos riegos semanales.
- Se evaluaron dos calidades de agua (ATAEP y agua normal) y dos límites de agua (suministro de agua para mantener el 100% y el 80% de la humedad disponible en el suelo para la planta). Para el invernáculo ubicado en Castilla La Nueva, el agua normal (N) provino del Caño Grande, y la ATAEP de Ecopetrol (E), del STAP de la estación Castilla 2.

Para el caso de los invernáculos ubicados en el CI La Libertad, los volúmenes de agua normal (N) provinieron del pozo profundo utilizado en el centro, y la ATAEP de Ecopetrol (E) se obtuvo del STAP de la estación Apiay.

Se realizó semestralmente un muestreo de suelos con el fin de evaluar las variaciones químicas, físicas, microbiológicas y ambientales debidas a los tratamientos.

Se monitoreó semanalmente cada tipo de agua mediante lecturas de conductividad eléctrica, salinidad, pH y temperatura.

Mensualmente, se monitorearon los parámetros vegetativos de las especies establecidas, y al final de cada ciclo se hicieron análisis de tejido vegetal y bromatológico.

En las figuras 1 y 2 se presenta la disposición de los ensayos por localidad.

E: agua de Ecopetrol.

N: agua normal.

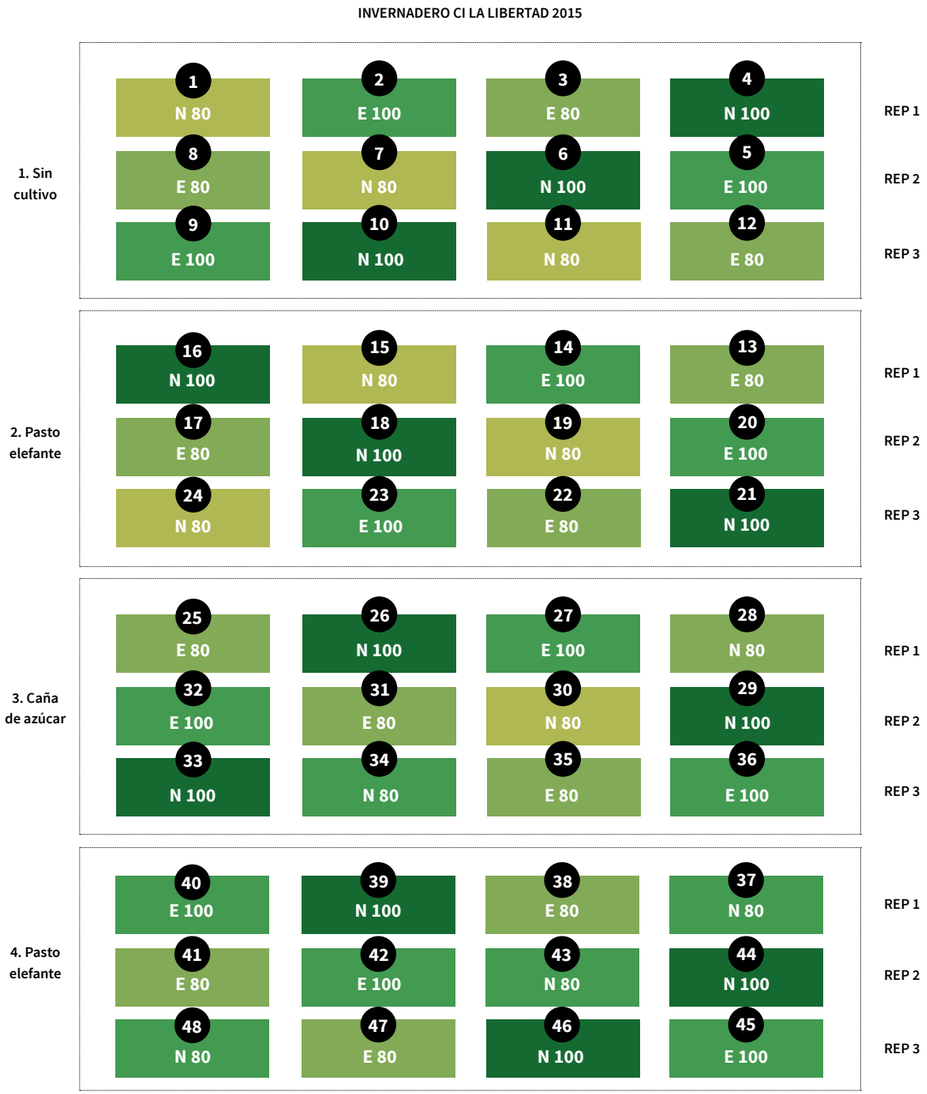


Figura 1. Plano del invernadero del CI La Libertad

Se monitorearon las condiciones ambientales por medio de estaciones climáticas automatizadas (temperatura del ambiente y edáfica, humedad relativa, brillo solar, radiación).

Se realizó permanentemente el manejo agronómico recomendado a las especies establecidas.

Para el análisis de resultados se utilizó el paquete estadístico SAS (software JMP®), con estadística descriptiva, análisis de varianza y prueba de comparación de medias por Tukey con un nivel de significancia del 5%.

E: agua de Ecopetrol.

N: agua normal.

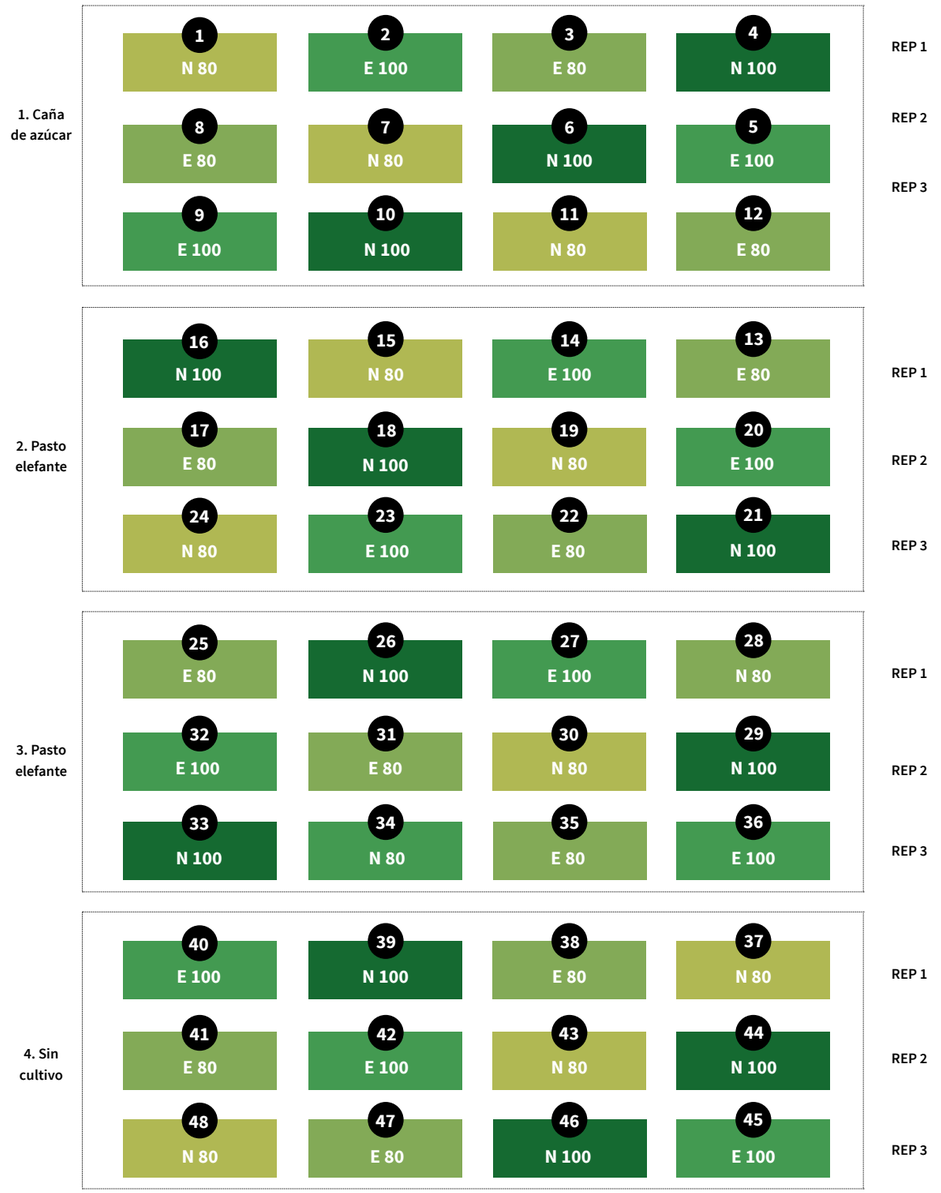


Figura 2. Plano del invernadero de Castilla La Nueva

Resultados y discusión

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

El suelo es un recurso natural no renovable, al menos en una escala de tiempo humano (Jenny, 1980). Tenemos por tanto la obligación de mantenerlo y conservarlo para presentes y futuras generaciones. Esto implica la necesidad de adaptarlo a diversos usos (agricultura, bosque, suelo urbano, industria… [recreativo]), pero siempre tendiendo hacia una "sostenibilidad" de dicho recurso natural, de manera ordenada y controlada. En condiciones naturales, el suelo tiende a un estado de equilibrio tras un lento proceso de formación denominado edafogénesis (Albaladejo y Diaz, 1990). En estas condiciones el suelo se encuentra cubierto por una vegetación que le aporta una cantidad progresiva de materia orgánica y de nutrientes, y produce una mejora en su estructura. Puede decirse entonces que los suelos mantienen una calidad adecuada. El suelo, además de sus funciones como soporte físico y productor de alimentos y fibras, juega un papel esencial en el mantenimiento de la calidad del aire, almacenamiento de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos, y como medio purificador de contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

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 [recreativo]). Una de las definiciones posibles es la que ofrecieron Doran y Parkin en 1994, definiendo la calidad de un suelo como su capacidad para mantener su productividad biológica, su calidad ambiental, promoviendo además la salud de animales, plantas y el propio ser humano.

Efecto en suelos

Para conocer los efectos en el suelo del riego con ATAEP en la producción de cultivos se realizaron diferentes tipos de análisis y determinaciones (físicas, químicas, microbiológicas y ambientales). De este modo fue posible 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 cómo las prácticas agronómicas que el hombre realiza para la producción de cultivos modifican y afectan la calidad del recurso. Sobre este conocimiento, se debería comprender la importancia y las posibles formas de mantener y mejorar las condiciones del suelo.

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 esta muestra ocupaba en el suelo. Esta es una de las propiedades más estudiadas en física de suelos por su importancia para cuantificar la compactación, la dispersión de agregados y la circulación de aire y agua, entre otros fenómenos producidos por prácticas agrícolas inadecuadas.Para el caso de esta investigación se determinó el efecto del uso de ATAEP en el suelo y se comparó con el de agua normal (no petrolera). En la figura 3 y en la tabla 1 se presentan los resultados encontrados en los lisímetros con cultivo y sin cultivo de las localidades CI La Libertad y Castilla La Nueva.

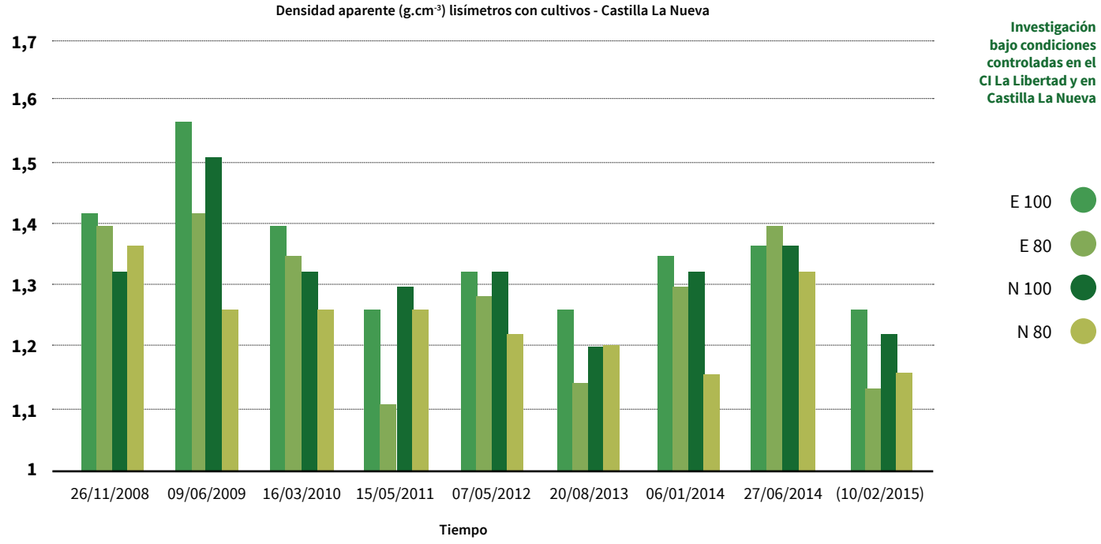


Figura 3. Comportamiento de la densidad aparente (g.cm^{-3}) en los lisímetros en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	DA (g.cm^{-3})			
	Media	Media	Media	Media
E100	1,39 a	1,23 a	1,35 a	1,35 a
E80	1,38 a	1,21 a	1,33 a	1,28 bc
N100	1,31 b	1,20 a	1,34 a	1,32 ab
N80	1,26 b	1,21 a	1,36 a	1,25 c

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico efectuado a la densidad aparente en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Como se observa, en el ensayo llevado a cabo en el CI 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. En esta localidad, por otra parte, no se encontró influencia del agua en la densidad aparente en los lisímetros cuando contenían cultivos.

En Castilla La Nueva, asimismo, se encontró diferencia significativa en los lisímetros con cultivos debida principalmente a la dotación de riego (volúmenes de agua aplicada) y no a la calidad del agua, mientras que en los tratamientos sin cultivo no se presentó diferencia.

El valor de la densidad aparente encontrada en esta investigación para todos los casos es inferior a la normal reportada por Amézquita, Molina y Hoyos (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.

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. Este atributo depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo.

Lo normal es que los suelos con fracciones gruesas presenten también poros gruesos, y los suelos limosos y arcillosos, huecos muy numerosos, pero de tamaño pequeño. Son por tanto los suelos coloidales los que tienen la mayor porosidad. 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 de agua retenida muy bajos, o ambas cosas a la vez, en tanto que un valor superior al límite máximo supone una dificultad para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas.

En la figura 4 se muestra, para las dos localidades contempladas, el comportamiento de la porosidad a través del tiempo. Por otra parte, en la tabla 2 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado utilizando el programa SAS, en donde se trató de determinar si en el tiempo la porosidad total se había afectado por los tratamientos de manejo utilizados.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Porosidad total (%)			
	Media	Media	Media	Media
E100	47,44 b	52,97 a	48,70 a	48,76 c
E80	47,36 b	54,23 a	49,40 a	54,40 ab
N100	50,69 a	54,69 a	49,40 a	50,17 bc
N80	52,08 a	54,36 a	48,23 a	52,47 a

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico efectuado a la porosidad total del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p<0,05$).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

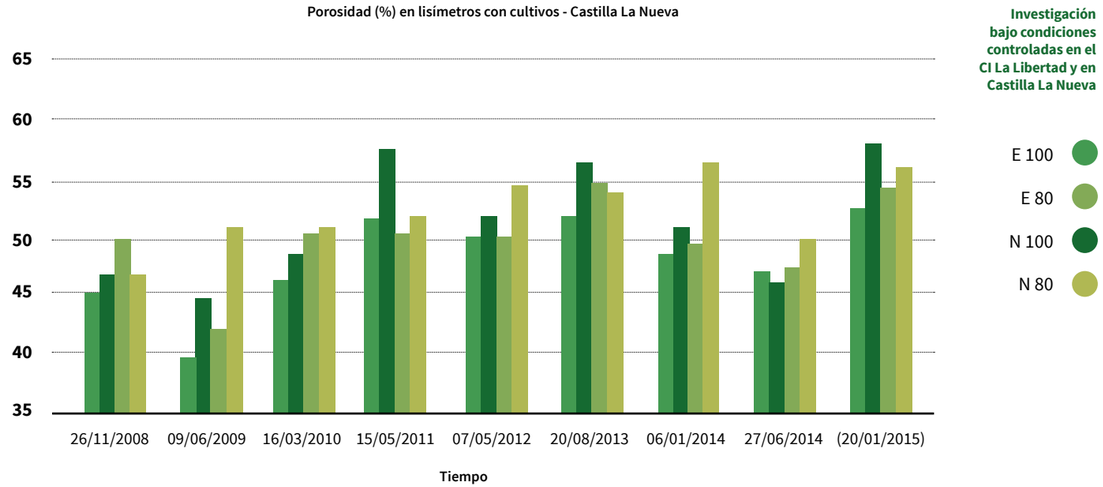


Figura 4. Comportamiento de la porosidad en suelos de los lisímetros en Castilla La Nueva

Como se observa, en el ensayo llevado a cabo en el CI La Libertad se encontró diferencia significativa de la porosidad total 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 porosidad total en los lisímetros cuando contenían cultivos. Por otra parte, en Castilla La Nueva se encontró diferencia significativa en los lisímetros con cultivos debida a los tratamientos, y en los tratamientos sin cultivo no se presentó diferencia.

El valor de la porosidad encontrada en esta investigación para todos los casos es superior a la normal reportada por Amézquita, Hoyos y Molina (2003) para suelos franco-arcillosos (45%) y franco arenosos (40%) de la Orinoquia colombiana. Según Salinas y Valencia (1983), para suelos oxisoles y ultisoles de la América tropical, el espacio poroso alcanza valores entre el 40% y el 50% del volumen del suelo, del cual aproximadamente dos tercios corresponden a microporos.

En definitiva, se puede establecer que los valores encontrados en la porosidad del suelo en los ensayos realizados en las dos localidades no presentaron valores críticos que indicaran afectación negativa por los tratamientos de manejo realizados.

Estabilidad estructural

Según la FAO, la estructura del suelo se define como la disposición de las partículas elementales del suelo (arena, limo y arcilla) en agregados mayores o terrones que forman cuerpos separados a los agregados vecinos y tienen propiedades diferentes a las partículas elementales sin agregación.

Por otra parte, la estabilidad de la estructura es definida como la resistencia que los agregados del suelo ofrecen a los agentes disgregantes externos. En otras palabras, la estabilidad estructural representa la resistencia a toda modificación de los agregados. El principal agente destructor de la estructura del suelo es el agua.

Según Quiroz (2009),

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).

La degradación de la estructura del suelo depende de factores y condiciones diversas. De ello resulta que los métodos propuestos para determinar esta propiedad sean variados. Baver, Gardner y Gardner (1973) expresaron que la estructura del suelo se evalúa determinando el grado de agregación, la estabilidad de los agregados y la naturaleza del espacio poroso, características que cambian con el laboreo del suelo y los sistemas de cultivo. Por su parte, en 1949 Van Bavel introdujo el concepto del diámetro ponderado medio de los agregados del suelo como índice de agregación.

En la tabla 3 se presenta una clasificación (Montenegro) con los rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al diámetro ponderado medio (DPM).

Tabla 3. Rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al DPM

DPM (mm)	Interpretación
<0,5	Inestable
0,5-1,5	Ligeramente estable
1,5-3,0	Moderadamente estable
3,0-5,0	Estable
Mayor de 5,0	Muy estable

Fuente: Montenegro (2003).

En la tabla 4 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado para las dos localidades. Asimismo, en la figura 5 se observa el comportamiento temporal de la estabilidad de agregados para todos los tratamientos considerados.

Tabla 4. Resultados del análisis estadístico efectuado a la estabilidad de agregados del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Estabilidad de agregados DPM (mm)			
	Media	Media	Media	Media
E100	2,38 a	3,13 a	2,73 a	3,41 a
E80	1,84 b	2,30 b	2,62 a	3,00 ab
N100	1,45 b	1,76 c	2,36 a	2,93 ab
N80	1,75 b	1,49 c	2,28 a	2,47 b

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Así pues, al evaluar la estabilidad estructural teniendo en cuenta el DPM, en el CI La Libertad se evidenció una tendencia, con diferencia significativa de los lisímetros sometidos a tratamientos de riego con ATAEP (E100), a presentar condiciones de suelo moderadamente estable (sin cultivo), y en el caso con cultivo se obtuvo una clasificación estable (3,13 mm). En la localidad de Castilla La Nueva, por otra parte, los tratamientos en lisímetros con agua tratada de producción en condiciones de cultivo presentaron valores de DPM interpretados como estables. En el caso sin cultivo, el DPM se clasificó como moderadamente estable en todos los casos, sin diferencias significativas entre los tratamientos.

En general, se observa que las mejores condiciones de estabilidad de los agregados valorados con el método de DPM las presentan los tratamientos con cultivo y en donde se han utilizado ATAEP para el riego.

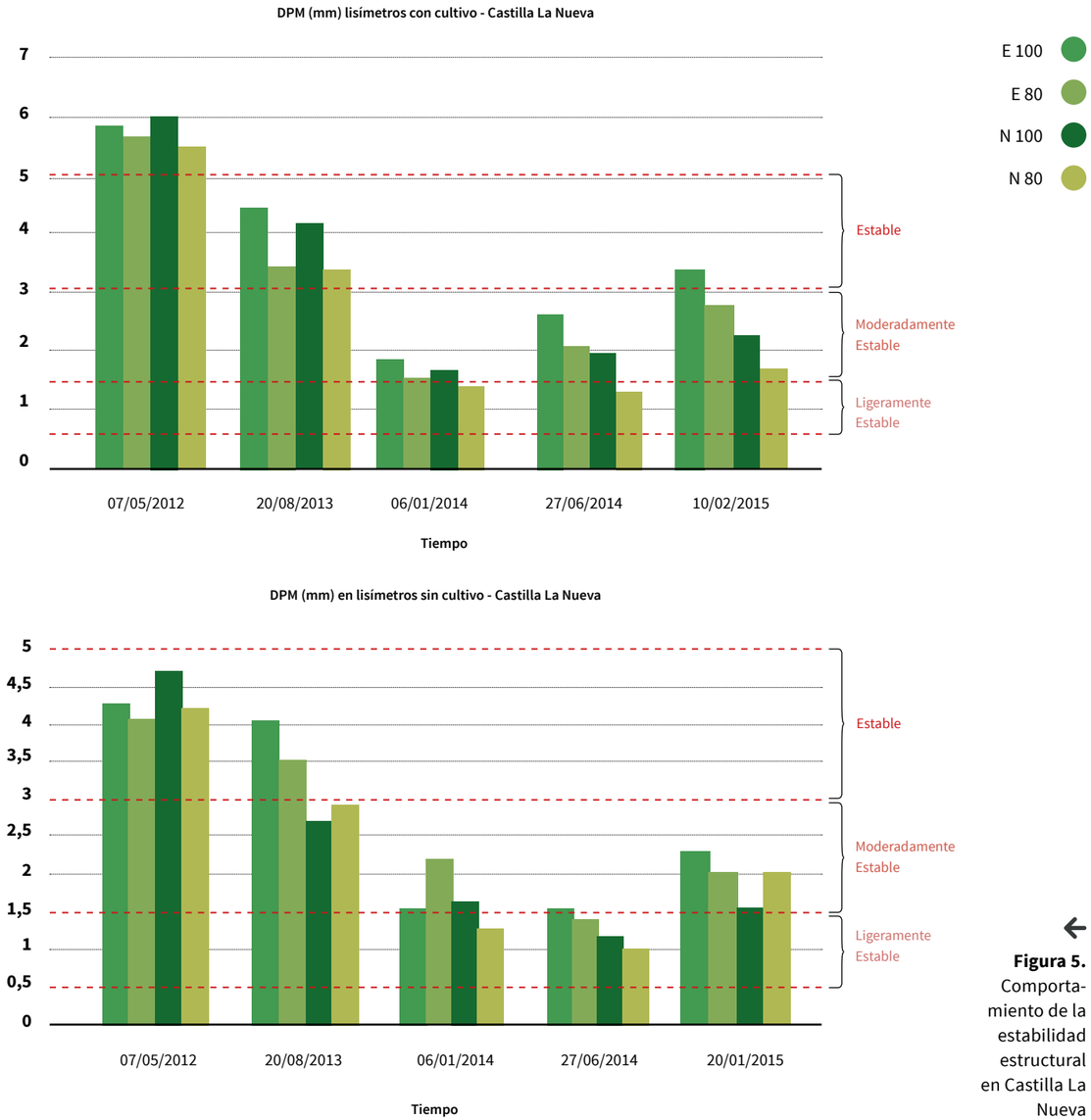


Figura 5. Comportamiento de la estabilidad estructural en Castilla La Nueva

Química de suelos

"La química de suelos se define como aquella parte de la ciencia que estudia la composición, las propiedades y las reacciones químicas que se dan en este recurso" (SSSA, 2008). Los mayores esfuerzos de aplicación de esta rama del saber se dirigen a tratar de comprender, explicar y resolver problemas relacionados con la dinámica de los nutrientes vegetales y con la fertilidad y salud del suelo.

La calidad del suelo se define como "la capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando el desarrollo de plantas, los animales y el ser humano" (http://www.fao.org/soils-portal de suelos).

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 al origen y a las condiciones en que se ha formado. El conocimiento de estas propiedades permite reconocer 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 del recurso.

Calcio

Debido a que el calcio existe como un catión, este nutriente está gobernado por los fenómenos del intercambio catiónico y se mantiene adherido como Ca++ intercambiable en la superficie de los coloides cargados negativamente.

Las concentraciones más bajas de calcio ocurren en suelos muy lavados, con capacidades de intercambio catiónico bajas. Tales condiciones se dan en algunos suelos tropicales que contienen un predominio de arcillas óxidas. En algunos de estos casos puede existir respuesta de los cultivos al calcio como fertilizante, pero la cuestión no se encuentra aún suficientemente documentada.

Para los suelos de los llanos orientales, Amézquita *et al.* (2003) encontraron valores normales de calcio 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 propuso como meta alcanzar en dos años un valor mínimo de 1,5 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$ con miras a garantizar la salud y productividad de este recurso. En este experimento se han registrado valores mayores que la meta planteada por estos investigadores en suelos naturales ácidos con alto contenido de aluminio.

En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis estadístico multitemporal realizado para las dos localidades consideradas. En ambos ámbitos se encontró que los tratamientos de manejo en donde se utilizó ATAEP para riego mostraron diferencias significativas con relación a aquellos en donde se empleó agua normal. Los valores más altos se dieron en los tratamientos con cultivos en relación con los lisímetros en donde no se establecieron cultivos.

Teniendo en cuenta que en el CI La Libertad la textura del suelo encontrada tiene mayor contenido de arena (FArA) que la del de Castilla La Nueva (FAr), se corrobora lo expuesto por Amézquita y colaboradores con relación al mayor contenido de calcio en estos suelos, lo que en cierta forma es una característica de los suelos de la Orinoquia colombiana.

Tabla 5. Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de calcio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Calcio ($cmol^{(+)}.kg^{-1}$)			
	Media	Media	Media	Media
E100	3,31 a	5,04 a	2,34 b	2,35 b
E80	2,80 b	4,18 b	2,90 a	2,70 a
N100	1,82 c	1,64 c	1,57 c	1,16 c
N80	1,91 c	1,68 c	1,48 c	0,90 d

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p<0,05$).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En la figura 6 se presenta la variación temporal del calcio para los tratamientos con y sin cultivo en las dos localidades. Esta gráfica se basa en un sistema de interpretación del tenor de calcio con base en lo descrito por Andrades y Martínez (2014), de la Universidad de La Rioja.

Como se puede observar, existen contenidos mayores de calcio en el muestreo inicial con relación al final en los tratamientos con agua normal (N100-N80), mientras que en los tratamientos con ATAEP (E100-E80) se observa una tendencia a que el contenido aumente en el transcurso del tiempo. Para el caso de los lisímetros con cultivos, este elemento es extraído 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. En los lisímetros sin cultivo, entretanto, se presentó una disminución del calcio en los tratamientos (N) debido a que el agua natural no aporta suficiente calcio con relación a las ATAEP (E).

En el ensayo del CI La Libertad, en los lisímetros con y sin cultivo y en el tratamiento de riego con ATAEP, los contenidos de calcio se mantienen en el transcurso del tiempo en condiciones calificadas por Andrades *et al.* (2014) como bajas; sin embargo, en todos los casos superan los 1,5 $cmol.kg^{-1}$, que es la meta fijada por Amézquita *et al.* (2003) como indicador deseable para los oxisoles de la Orinoquia colombiana.

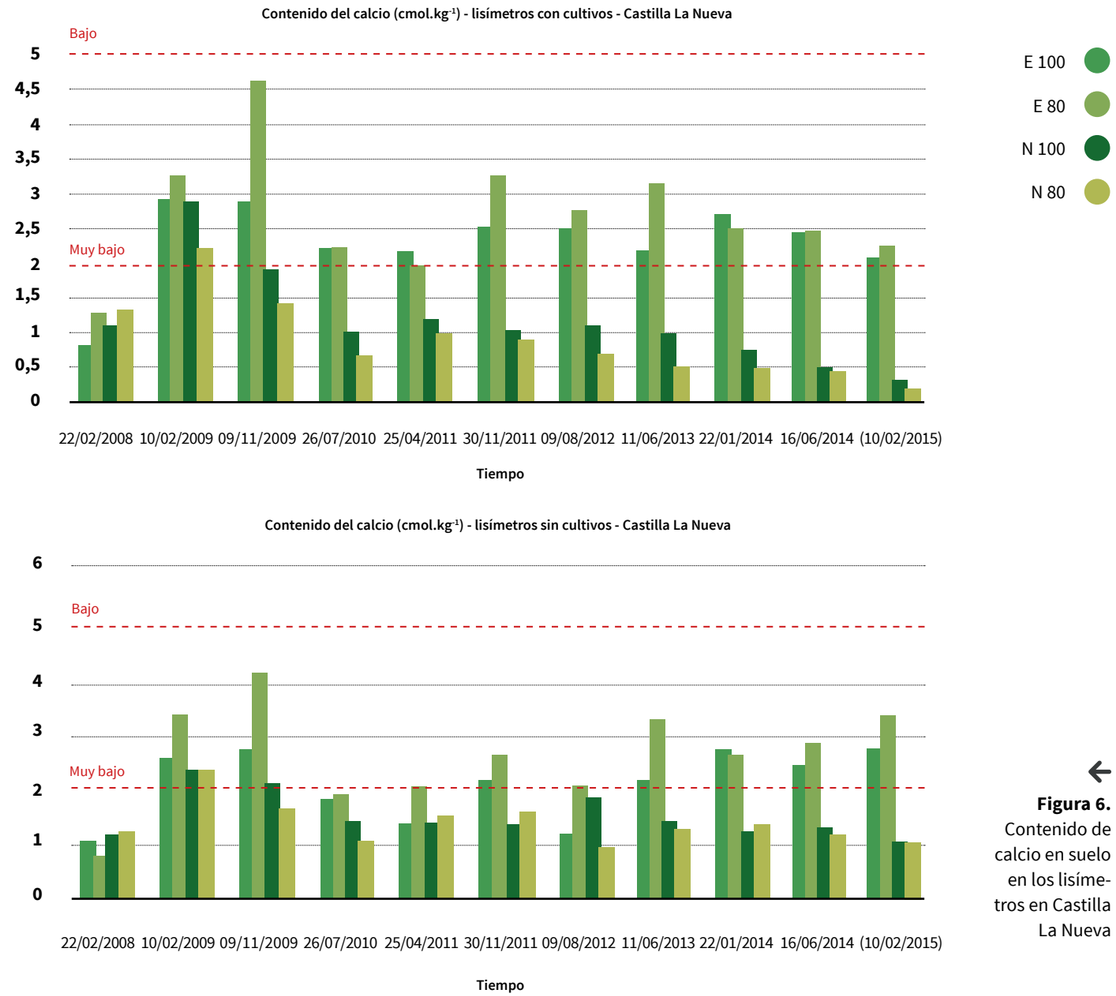


Figura 6. Contenido de calcio en suelo en los lisímetros en Castilla La Nueva

Magnesio

El magnesio es un elemento fundamental para la realización de varias funciones importantes en los vegetales como la síntesis de xantofilas y carotenos. Asimismo, se comporta como activador 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 magnesio se encuentra en el proceso de la fotosíntesis ya que es un componente elemental de la clorofila. Según Salinas y Valencia (1983), el contenido representativo de los oxisoles de la Orinoquia colombiana es de 0,1 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$. Amézquita *et al.* (2003) sitúan este tenor según la textura del suelo entre 0,09 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$ para suelos arcillosos y 0,07 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$ para suelos francos. Según Andrades y Martínez (2014), valores por debajo de 0,25 son considerados muy bajos, y Amézquita *et al.* (2003) consideran 0,6 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$ como un valor aceptable para mantener la salud y fertilidad del suelo (oxisol).

En la tabla 6 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a la información multitemporal de este parámetro del suelo en las dos localidades. Asimismo, en la figura 7 se observa la variación temporal del registro de magnesio.

Tabla 6. Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de magnesio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Magnesio ($cmol^{(+)}.kg^{-1}$)			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,66 a	0,84 a	0,48 a	0,34 ab
E80	0,61 b	0,80 a	0,55 a	0,37 a
N100	0,52 c	0,40 b	0,47 a	0,30 bc
N80	0,47 d	0,43 b	0,39 b	0,25 c

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p<0,05$).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

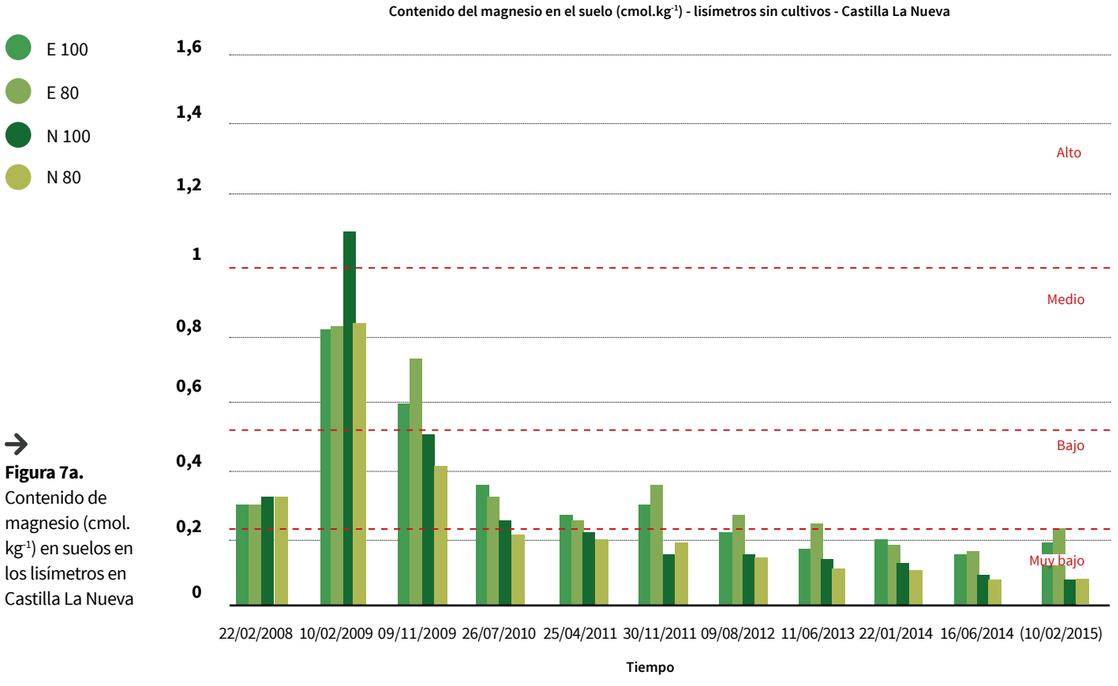


Figura 7a. Contenido de magnesio (cmol. kg^{-1}) en suelos en los lisímetros en Castilla La Nueva

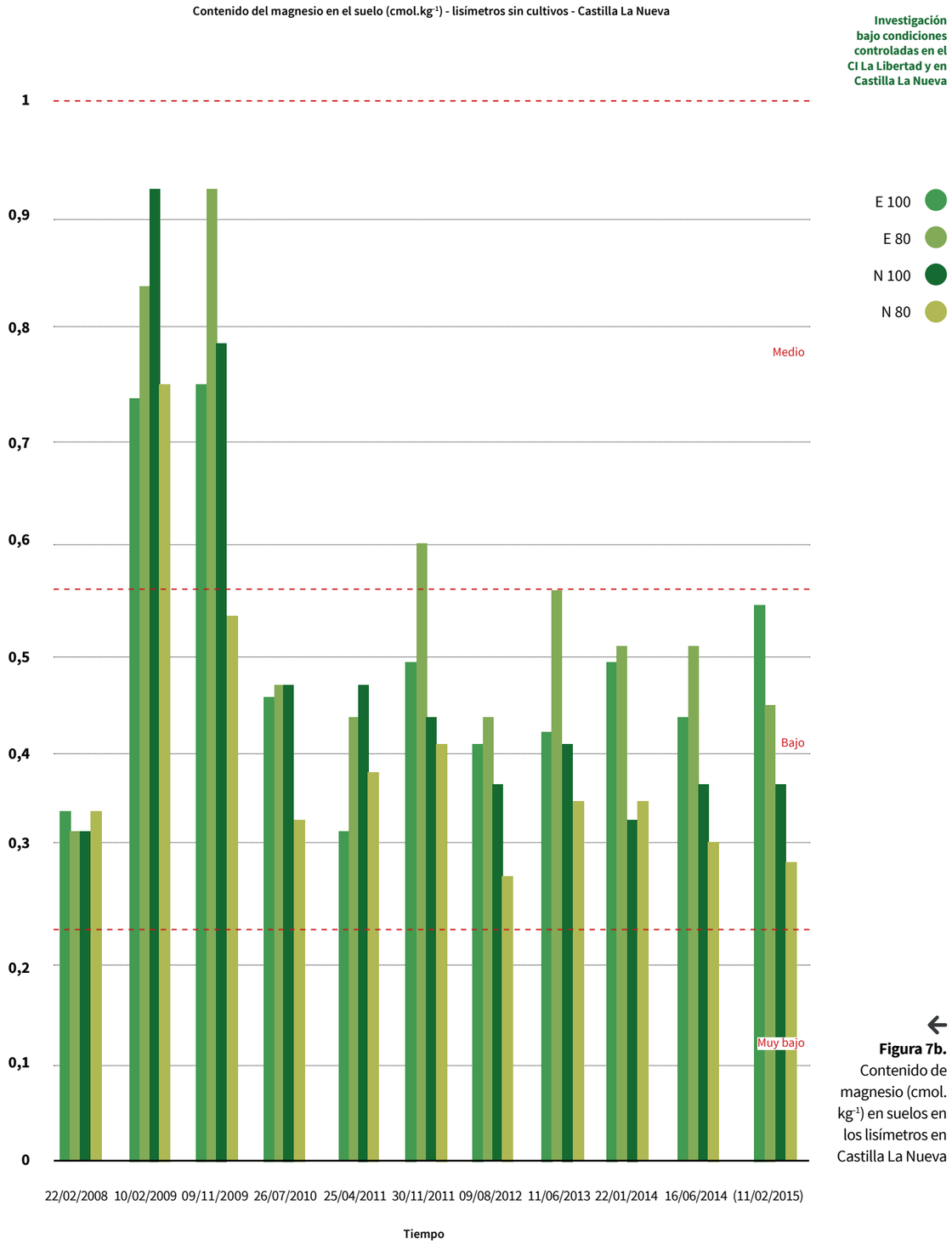


Figura 7b. Contenido de magnesio (cmol. kg^{-1}) en suelos en los lisímetros en Castilla La Nueva

Investigación bajo condiciones controladas en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Los contenidos de magnesio en los lisímetros con cultivo y sin cultivo de las dos localidades presentan disminución a través del tiempo después de la aplicación de las enmiendas, como lo muestra la figura 7. La deficiencia de este nutriente restringe el desarrollo radicular, en especial 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).

Es importante resaltar que en la localidad de Castilla La Nueva el contenido de magnesio se mantiene por debajo del nivel considerado bajo para los tratamientos sin cultivo y fue muy bajo cuando se establecieron cultivos.

En el CI La Libertad, por otro lado, se encontró que los tratamientos regados con agua de producción presentaron niveles medios de magnesio, y los suelos regados con agua normal en los que se establecieron cultivos manifestaron niveles muy bajos del elemento.

En general, solamente los tratamientos regados con ATAEP en el CI La Libertad alcanzaron el criterio esbozado como normal para oxisoles de los llanos colombianos por Amézquita *et al.* (2003) (≥0,6 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}).

Potasio

El potasio 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". El potasio afecta la forma, el tamaño, el color y el sabor de la planta y a 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 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}. Amézquita *et al*. (2003) sitúan este tenor según la textura del suelo entre 0,09 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} para suelos arcillosos y 0,04 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} para suelos francos. Según Andrades y Martínez (2014), valores por debajo de 0,12 son considerados muy bajos. Amézquita *et al*. (2003) consideran 0,15 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} como un un valor aceptable para mantener la salud y fertilidad del suelo (oxisol).

En la tabla 7 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a la información multitemporal de este parámetro del suelo en las dos localidades. Asimismo, en la figura 8 se observa la variación temporal del registro del potasio.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Potasio (cmol$^{(+)}$.kg^{-1})			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,27 a	0,19 b	0,23 b	0,19 a
E80	0,25 a	0,21 a	0,26 a	0,18 a
N100	0,09 b	0,10 c	0,13 c	0,16 a
N80	0,10 b	0,10 c	0,14 c	0,19 a

Tabla 7. Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de potasio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Como se puede observar, existen diferencias significativas en los tratamientos con ATAEP, a excepción de los tratamientos con cultivos en Castilla La Nueva. Por otro lado, para el caso de los tratamientos en los lisímetros sin cultivo para las dos localidades, se evidencia que las ATAEP realizan aportes de este elemento. Con relación a los lisímetros con cultivo se muestra una disminución del potasio a través del tiempo debido a la extracción de este nutriente por la planta. En general, solamente los tratamientos regados con ATAEP en el CI La Libertad lograron la condición esbozada como aceptable por Amézquita *et al.* (2003) (≥0,15 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}), mientras que en Castilla La Nueva todos los tratamientos lograron este nivel, posiblemente influenciados por el tipo de textura encontrada en esta localidad (mayor tenor de arcillas).

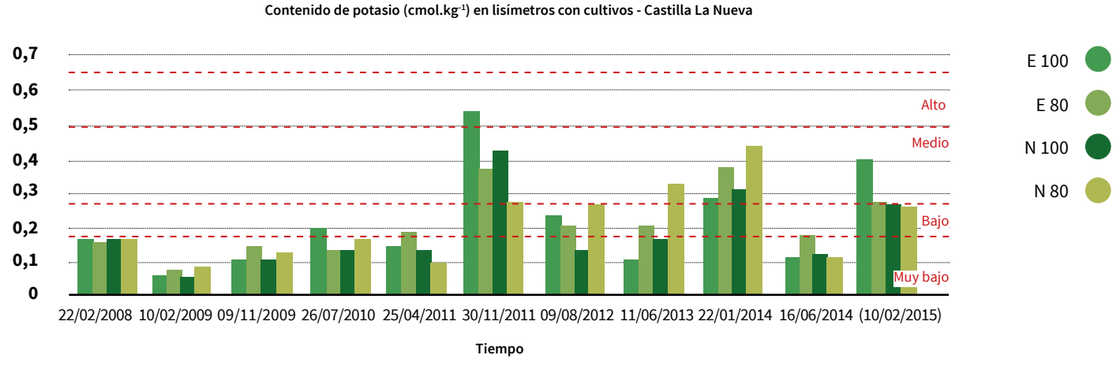


Figura 8. Comportamiento del contenido de potasio en el suelo en Castilla La Nueva

Sodio

Para la mayoría de los cultivos, no se ha demostrado que el sodio sea esencial en 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 sodio 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 sodio puede provocar deficiencias de otros cationes, como potasio, calcio y magnesio.

El efecto perjudicial del sodio 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: el sodio desplaza al calcio y al magnesio 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 sodio intercambiable del suelo, el cual suele ser mayor que el sodio soluble; de hecho, usualmente, es un múltiplo (entre el doble y el quíntuplo) del sodio soluble. Dicho de otra forma, entre un 20% y un 50% del sodio que aparece en los análisis de suelos reportados como sodio intercambiable es extraíble por el agua pura.

En la tabla 8 se presenta el resultado del análisis estadístico multitemporal realizado a este parámetro químico del suelo.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Sodio ($cmol^{(+)}.kg^{-1}$)			
	Media	Media	Media	Media
E100	1,88 a	1,76 a	0,72 b	2,24 a
E80	1,93 a	1,80 a	0,83 a	2,01 a
N100	0,12 b	0,11 b	0,12 c	0,18 b
N80	0,10 b	0,09 b	0,13 c	0,10 b

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p<0,05$).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Tabla 8. Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de sodio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

La concentración de sales confiere al suelo unas propiedades muy particulares con efectos nocivos para los cultivos. Este fenómeno se puede deber a causas naturales o a acciones antrópicas, y se distinguen dos situaciones, con morfologías, propiedades, génesis y usos de los suelos muy diferentes, según el catión predominante en el complejo de cambio: Na^{+} o Ca^{++}.

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 floculante 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.

Al proceso de acumulación de sales en los suelos con predominio de calcio y de magnesio se le denomina salinización, y cuando es el sodio el que predomina netamente, en el suelo se desarrolla un proceso llamado alcalinización. Existen importantes cantidades de sales sódicas neutras carentes de propiedades alcalinizantes (principalmente cloruros y sulfatos) y sales de calcio y magnesio.

En la figura 9 se observa, para todos los tratamientos y en las dos localidades, el comportamiento temporal del contenido de sodio en el suelo de los lisímetros. Se advierte que en todos los casos considerados los tratamientos E100 y E80 cuentan con los niveles de sodio más altos debido a que los contenidos de sodio de ATAEP son más altos que los del agua natural (N100-N80). Sin embargo, este contenido de sodio en ATAEP se considera bajo (95 mg.l en promedio), teniendo en cuenta que el limite permisible de la norma de reúso (Resolución 1207) es de 200 $mg.l^{-1}$. Adicionalmente, en los tratamientos en donde se regó con agua normal el contenido de sodio se clasifica como bajo y muy bajo.

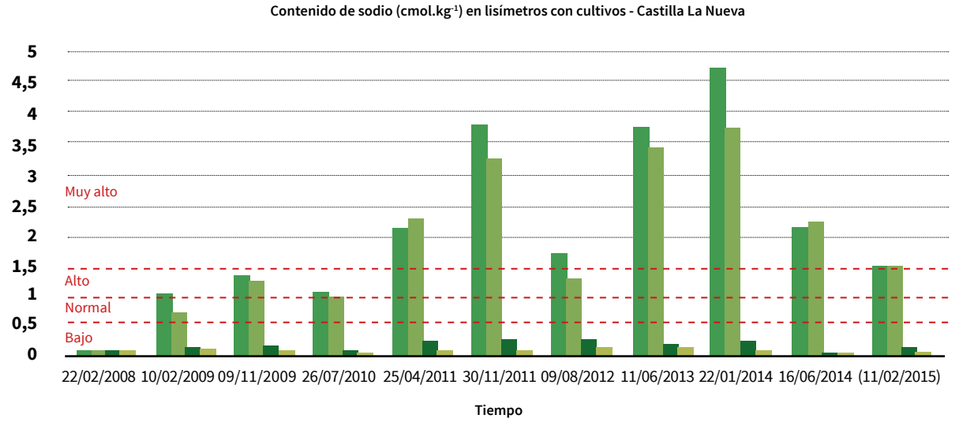


Figura 9. Comportamiento del contenido de sodio ($cmol.kg^{-1}$) en Castilla La Nueva

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CEs) ha sido el parámetro más extendido y el más 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 $dS.m^{-1}$ (dS=deciSiemens). Por tanto, la CEs refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

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, pues, aplicado).

Con base en la CEs, el United States Salinity Laboratory de Riverside establece los siguientes grados de salinidad:

0-2 Suelos normales.
2-4 Quedan afectados los rendimientos de los cultivos muy sensibles. Suelos ligeramente salinos.
4-8 Quedan afectados los rendimientos de la mayoría de los cultivos. Suelos salinos.
8-16 Solo se obtienen rendimientos aceptables en los cultivos tolerantes. Suelos fuertemente salinos.
> 16 Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables. Suelos extremadamente salinos.

En la tabla 9 se presenta el resultado del análisis estadístico multitemporal realizado a la conductividad eléctrica del suelo en las dos localidades.

Tabla 9. Resultados del análisis estadístico efectuado al valor de la conductividad eléctrica en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Conductividad eléctrica (dS.m^{-1})			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,48 a	0,72 a	0,87 a	2,93 a
E80	0,54 a	0,73 a	1,12 a	2,59 a
N100	0,09 d	0,20 b	0,34 b	0,46 b
N80	0,13 c	0,16 b	0,35 b	0,59 b

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En el CI La Libertad y en Castilla La Nueva se encontró diferencia significativa en la conductividad eléctrica para los tratamientos con diferentes calidades de agua. En estos se registraron valores por debajo de 2 dS.m^{-1}, que según la clasificación del United States Salinity Laboratory de Riverside corresponden a "suelos normales", excepto para la localidad de Castilla La Nueva en lisímetros con cultivo y con tratamientos de riego con base en ATAEP, los cuales se clasificaron como "suelos moderadamente salinos" (2-4 dS.m^{-1}).

En la figura 10 se presenta la variación temporal de la conductividad eléctrica para todos los tratamientos en las dos localidades. 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. Por su parte, en Castilla La Nueva, el tratamiento de suelo con cultivo y riego con ATAEP ha presentado clasificación de conductividad eléctrica oscilante entre suelos salinos y ligeramente salinos. En los tratamientos sin cultivo, la CEs se ha clasificación como suelo normal en todos los tiempos y tratamientos de riego considerados.

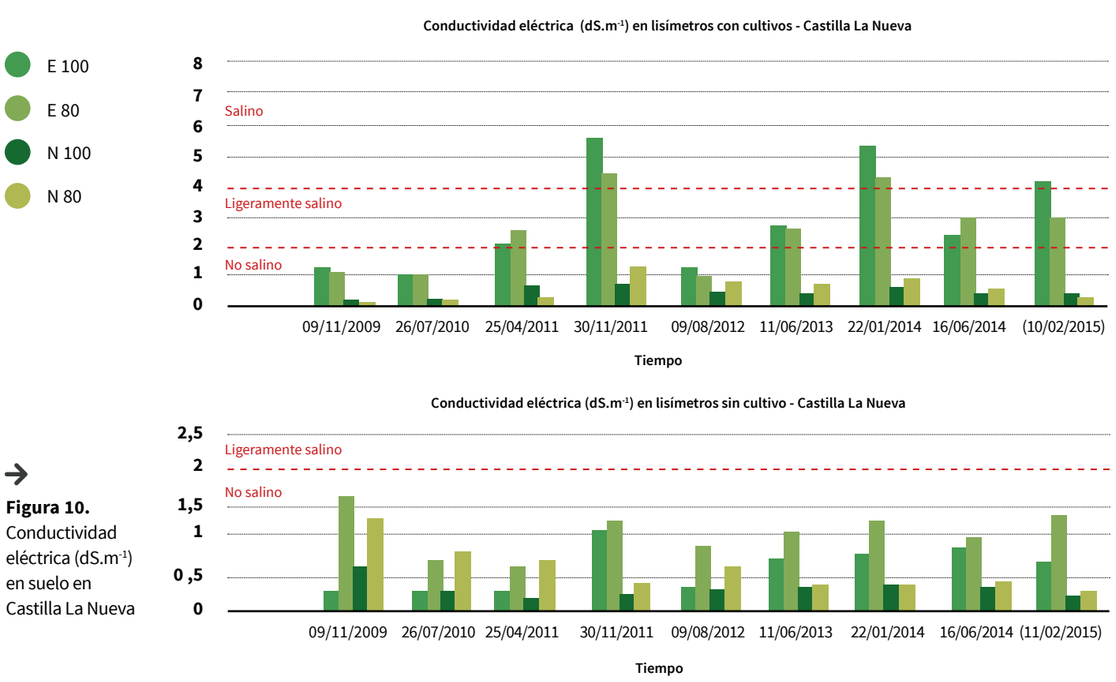


Figura 10. Conductividad eléctrica (dS.m^{-1}) en suelo en Castilla La Nueva

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 abrosbidos por las 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 distinta 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 cualquier caso, el crecimiento y el funcionamiento radicular pueden ser directamente afectados por un pH de 5 e inferiores, dependiendo de la especie considerada. Entre pH 5 y 8, el crecimiento suele ser satisfactorio, pero a pH 9 pueden darse efectos directos del OH- o HCO_3-, sobre la absorción de fósforo, hierro, molibdeno y otros.

Los siguientes son los valores utilizados en la clasificación del pH:

3 Representa pH extremo en suelos turbosos.

5 - 7 Valores frecuentes de pH en suelos minerales de regiones húmedas.
7 - 9 Valores frecuentes de pH en suelos minerales de regiones áridas.
11 Valores para suelos alcalinos minerales, sodio de adsorción.

La cantidad de hierro, aluminio y manganeso soluble en muchos suelos aumenta con la acidez. Tanto el hierro como el aluminio forman compuestos de baja solubilidad con los fosfatos. En los suelos de pH 5 hacia abajo los fosfatos de hierro y aluminio se pueden formar, pero su baja solubilidad no proporciona fósforo a las plantas. El pH de las soluciones entre 4 y 9 no tiene una influencia marcada sobre la absorción de iones, y 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 calcio en el complejo coloidal, llega a ser agotado, y es entonces cuando hay principio para opinar que la deficiencia de calcio 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.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Conductividad eléctrica (dS.m^{-1})			
	Media	Media	Media	Media
E100	6,66 a	6,65 a	4,96 a	4,94 a
E80	6,53 b	6,47 a	5,19 a	5,00 a
N100	5,29 c	4,75 b	4,44 b	4,41 b
N80	5,07 d	4,67 b	4,49 b	4,16 c

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Tabla 10. Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del pH del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

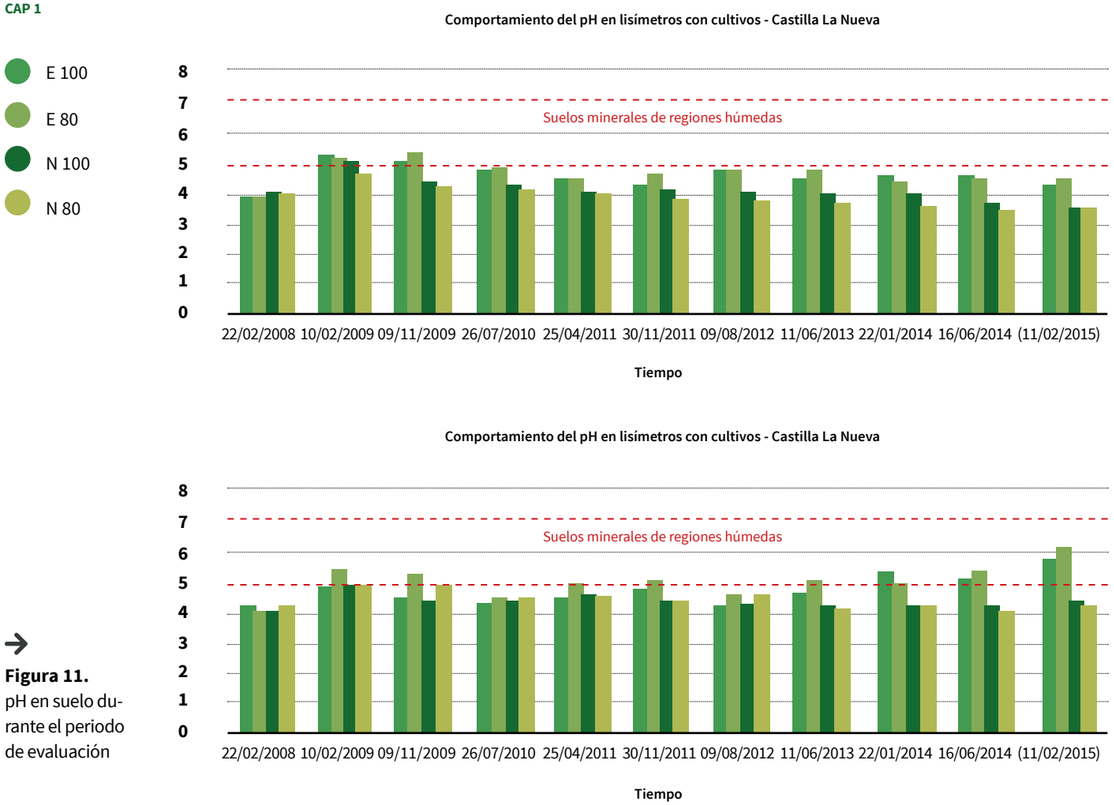


Figura 11. pH en suelo durante el periodo de evaluación

El comportamiento del pH en los suelos de las dos localidades consideradas mostró cambios estadísticamente significativos por la aplicación de los tratamientos de calidad de agua (tabla 10). Los suelos de Castilla La Nueva se conservan más ácidos en comparación con los suelos del CI La Libertad.

En la figura 11 se presenta el comportamiento temporal del pH durante el periodo de la evaluación. En el CI La Libertad, los mayores cambios en este parámetro se manifiestan en condiciones de lisímetros con cultivo, si bien en todos los casos los registros se encuentran en el rango normal para suelos minerales de región húmeda.

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.

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:

A. De forma directa: efecto del metal o metales sobre la actividad microbiana del suelo.

B. De forma indirecta: afectando a las plantas que crecen en el 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 tabla 11 se presenta un resumen de esta guía con los indicadores seleccionados para esta investigación.

Tabla 11. Límites permisibles en suelos (mg.kg^{-1}) de substancias peligrosas según la norma canadiense (2007)

Substancia	Año de revisión	mg.kg^{-1}
Bario	2003	760
Cadmio	1999	1,4
Cromo	1997	64
Plomo	1999	70

En la tabla 12, por otro lado, se presenta el resultado del análisis estadístico realizado a estas substancias presentes en los suelos en donde se aplicaron los diferentes tratamientos de agua. Al comparar estos valores con los de la guía canadiense (tabla 11), se ve claramente que los niveles máximos permisibles de las substancias catalogadas peligrosas se encuentran muy alejados de los valores reales encontrados en esta investigación.

Metales pesados – Castilla La Nueva

Tratamiento	Sin cultivo (mg.kg^{-1})				Con cultivo (mg.kg^{-1})			
	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario
	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
E100	0,05 a	28,16 a	6,41 a	70,74 a	0,07 a	30,86 a	6,54 a	96,28 a
E80	0,05 a	26,92 a	6,18 ab	54,98 ab	0,07 a	30,26 a	6,41 a	75,37 a
N100	0,05 a	26,00 a	5,88 ab	28,33 b	0,07 a	27,71 a	6,41 a	49,11 a
N80	0,05 a	25,49 a	5,70 b	28,03 b	0,07 a	27,45 a	6,29 a	33,58 a

Metales pesados – CI La Libertad

Tratamiento	Sin cultivo (mg.kg^{-1})				Con cultivo (mg.kg^{-1})			
	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario
	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
E100	0,05 a	25,75 a	6,14 a	53,79 a	0,18 a	25,87 a	6,71 a	56,98 a
E80	0,05 a	25,50 a	5,88 a	33,48 ab	0,17 a	25,15 a	6,39 a	52,34 a
N100	0,05 a	24,41 a	5,80 a	21,96 b	0,12 a	24,70 a	6,34 a	22,84 b
N80	0,05 a	22,83 a	5,42 a	20,02 b	0,10 a	23,71 a	6,26 a	21,43 b

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Tabla 12. Resultados del análisis estadístico efectuado a los valores de metales pesados y bario del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

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).

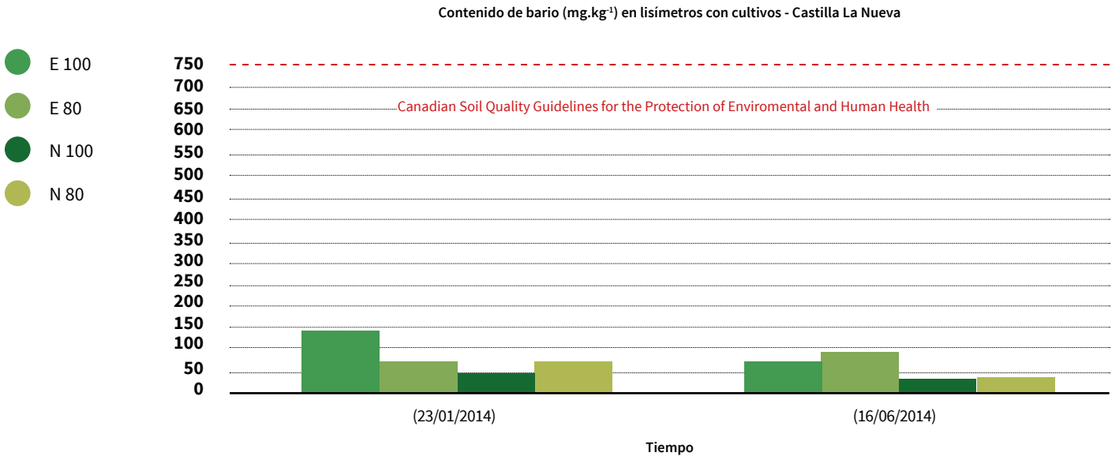
Para el caso de la investigación realizada en los lisímetros, se observa en la tabla 13 una diferencia significativa en los contenidos de este elemento en la localidad del CI La Libertad para los tratamientos de riego con ATAEP. En el tiempo (figura 12), no se observan incrementos de este elemento.

Tabla 13. Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del bario del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Bario (mg.kg^{-1})			
	Media	Media	Media	Media
E100	53,79 a	56,98 a	70,74 a	96,28 a
E80	33,48 ab	52,34 a	54,98 ab	75,37 a
N100	20,02 b	21,43 b	28,33 b	33,58 a
N80	21,96 b	22,84 b	28,03 b	49,11 a

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

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 96,2 mg.kg^{-1}, en la localidad de Castilla La Nueva: en todo caso, valores por debajo del contenido medio normal de este elemento en suelos agrícolas (500 mg.kg^{-1}).



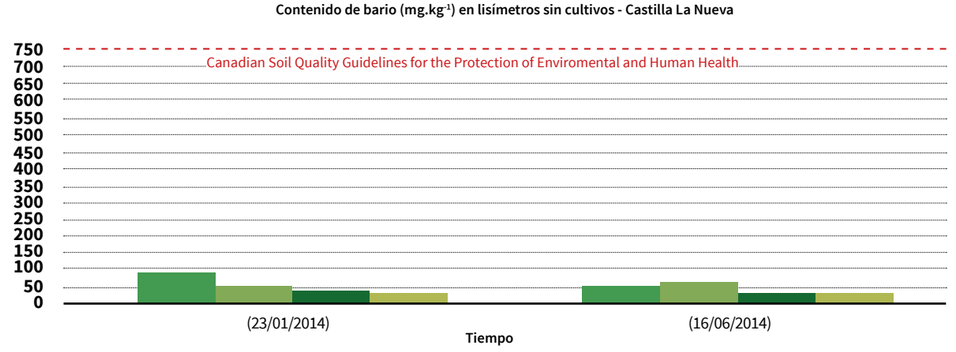


Figura 12. Comportamiento del contenido de bario (mg.kg^{-1}) en lisímetros en Castilla La Nueva

Plomo

El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11,4 a 16 °C —61 °F—), de color azuloso, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad, (327,4 °C) y hierve a 1.725 °C. Las valencias químicas normales son 2 y 4. 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 órganos metálicos.

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 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).

En la tabla 14 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a los registros obtenidos durante la investigación relacionados con el contenido de plomo en el suelo. Por otro lado, la figura 13 muestra el comportamiento temporal de este elemento durante el estudio en las dos localidades.

Tabla 14. Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del plomo del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Plomo (mg.kg^{-1})			
	Media	Media	Media	Media
E100	5,42 a	6,34 a	5,88 ab	6,41 a
E80	5,80 a	6,39 a	6,18 ab	6,41 a
N100	5,88 a	6,71 a	5,70 b	6,54 a
N80	6,14 a	6,26 a	6,41 b	6,29 a

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

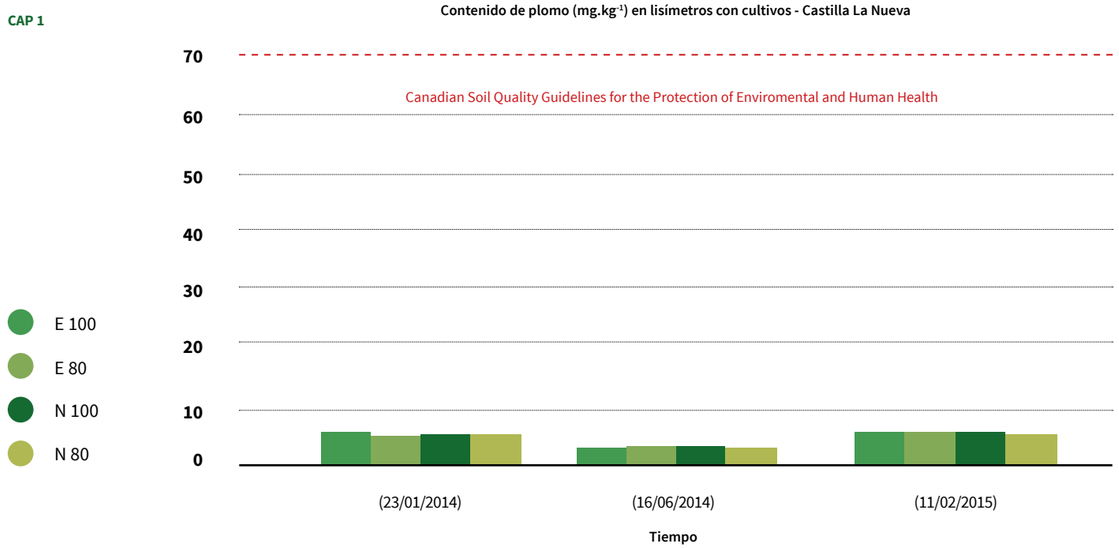


Figura 13. Comportamiento del contenido de plomo en el suelo en los lisímetros en Castilla La Nueva

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 en el CI La Libertad (6,71 mg.kg^{-1}) (a nivel mundial el contenido normal de plomo en suelos es alrededor de 30 mg.kg^{-1}). En general, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas de la presencia de este elemento atribuibles a los tratamientos considerados, y respecto a la variabilidad temporal de plomo en los diferentes tratamientos, tampoco se observan cambios marcados.

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. El cromo hexavalente se encuentra muy frecuentemente en naturaleza como Cr_2O_4Fe, 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 cáncer. 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 15 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado a este parámetro para los suelos tratados en el marco de la presente investigación.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Plomo (mg.kg^{-1})			
	Media	Media	Media	Media
E100	22,83 a	25,15 a	26,00 a	30,86 a
E80	24,41 a	24,70 a	26,92 a	27,45 a
N100	25,75 a	25,87 a	25,49 a	30,26 a
N80	25,50 a	23,71 a	28,16 a	27,71 a

Tabla 15. Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del cromo del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Como se observa, en las dos localidades no se presentan diferencias en el contenido de cromo en el suelo de los diferentes lisímetros sometidos a los tratamientos de agua.

Según Sierra (2007), el fondo geoquímico del cromo o herencia de la roca madre de las rocas ácidas está entre los niveles de 4 y 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 14 se presenta el comportamiento temporal del contenido de cromo edáfico en las dos localidades y 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.

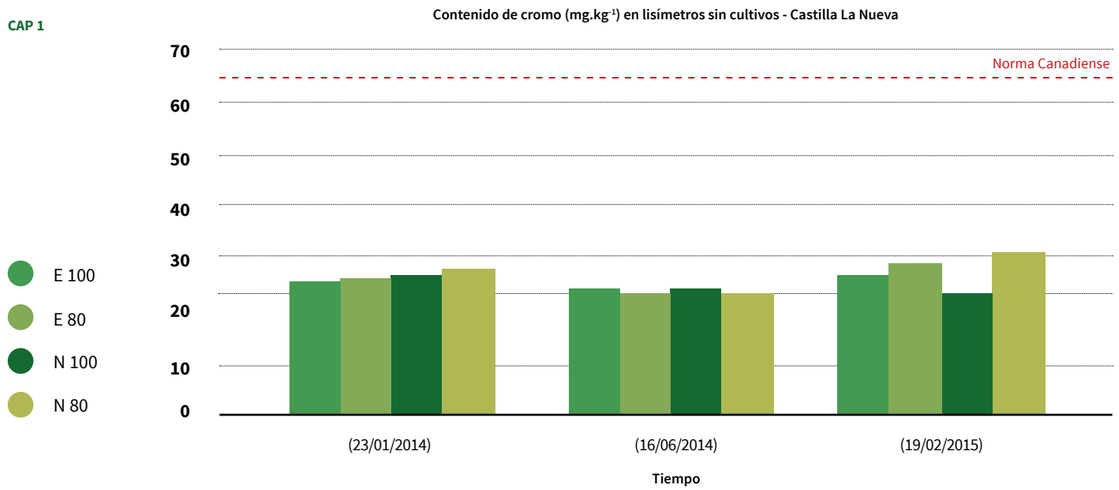


Figura 14. Comportamiento del contenido de cromo en el suelo en lisímetros en Castilla La Nueva

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, y se usa principalmente en la fabricación de soldaduras, aleaciones, revestimientos metálicos y minerales plásticos.

La contaminación con este elemento reduce el rendimiento de algunas plantas. Por ejemplo, al producirse un aumento en los niveles de cadmio en los suelos de 50 ppm, se ha observado que el rendimiento del trigo declina en un 25%, y se han registrado pérdidas aún mayores en la productividad cuando el nivel de cadmio aumentó. 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 y 0,20 $mg.kg^{-1}$ de suelo.

En la tabla 16 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado a este elemento, mientras que en la figura 15 se observa su comportamiento temporal. Nótese que no se presentan diferencias significativas debidas a los tratamientos, con niveles un poco por debajo del rango propuesto por Sierra (2005) y muy por debajo de los niveles críticos considerados por la norma canadiense (1,4 $mg.kg^{-1}$).

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Cadmio ($mg.kg^{-1}$)			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,05 a	0,18 a	0,05 a	0,07 a
E80	0,05 a	0,17 a	0,05 a	0,07 a
N100	0,05 a	0,12 a	0,05 a	0,07 a
N80	0,05 a	0,10 a	0,05 a	0,07 a

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p<0,05$).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Tabla 16. Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del cadmio del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

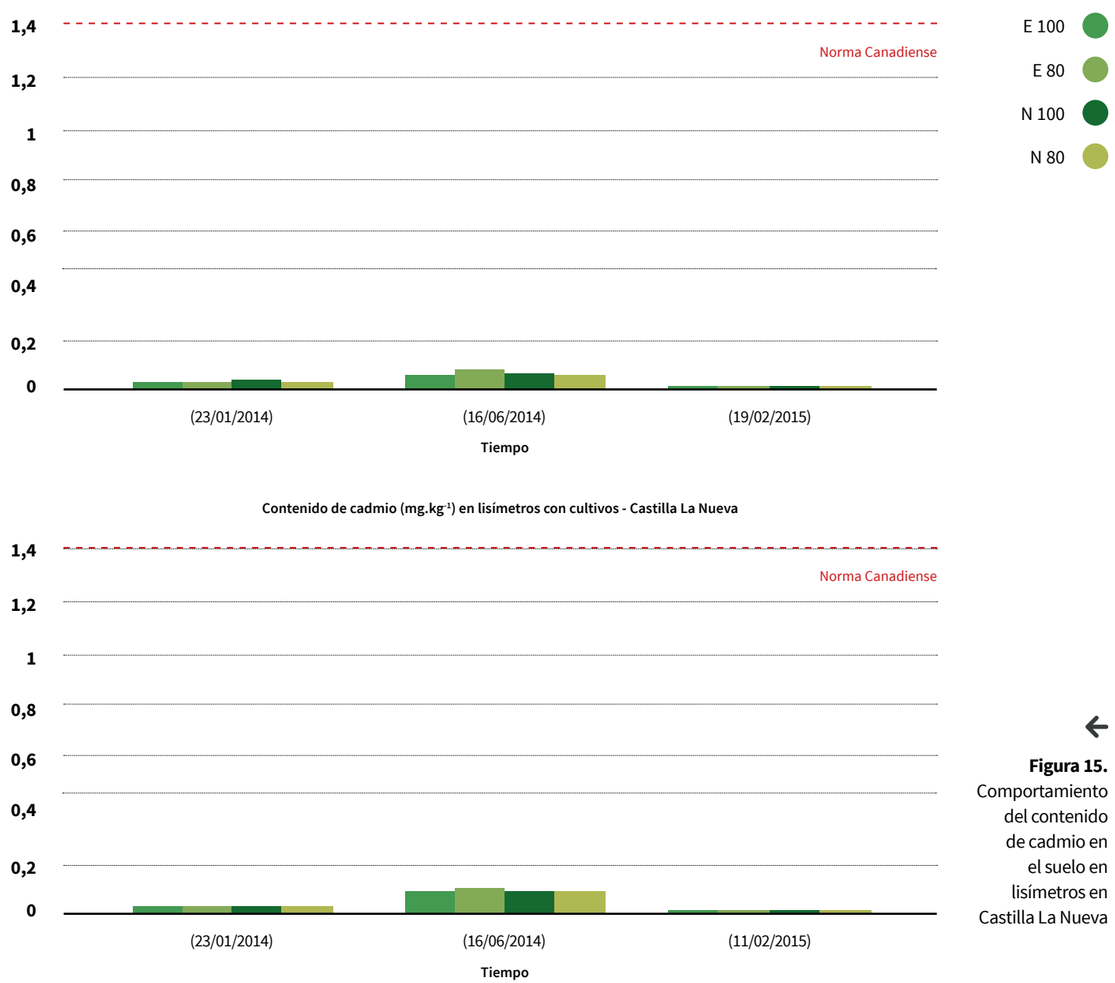


Figura 15. Comportamiento del contenido de cadmio en el suelo en lisímetros en Castilla La Nueva

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:

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

A continuación se hace una descripción del comportamiento encontrado de las bacterias, los actinomicetos y los hongos en la investigación según el tratamiento, la cobertura y la localidad.

Bacterias

Las bacterias son uno de los grupos de los microorganismos del suelo clave en la transformación de la materia mineral y orgánica del suelo que contribuye a su fertilidad. Estas tienen una amplia diversidad bioquímica, 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), la cantidad adecuada de bacterias en el suelo para suelos ácidos (oxisoles) se ha establecido en 54 x 10^6 UFC.g^{-1} de suelo.

En la tabla 17 se presentan los resultados del análisis estadístico efectuado a la información consignada en el conteo de unidades formadoras de colonias de bacterias (UFC) por gramo de suelo durante el desarrollo de la investigación.

Tabla 17. Resultados del análisis estadístico efectuado a la cantidad de bacterias en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	(LN (UFC.g^{-1} de suelo))			
	Media	Media	Media	Media
E100	15,23 a	15,43 a	13,37 a	13,92 b
E80	14,44 b	14,79 a	13,01 a	15,38 a
N100	14,39 b	15,28 a	12,71 a	13,99 b
N80	13,93 c	14,90 a	13,43 a	14,34 ab

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. LN: logaritmo natural.

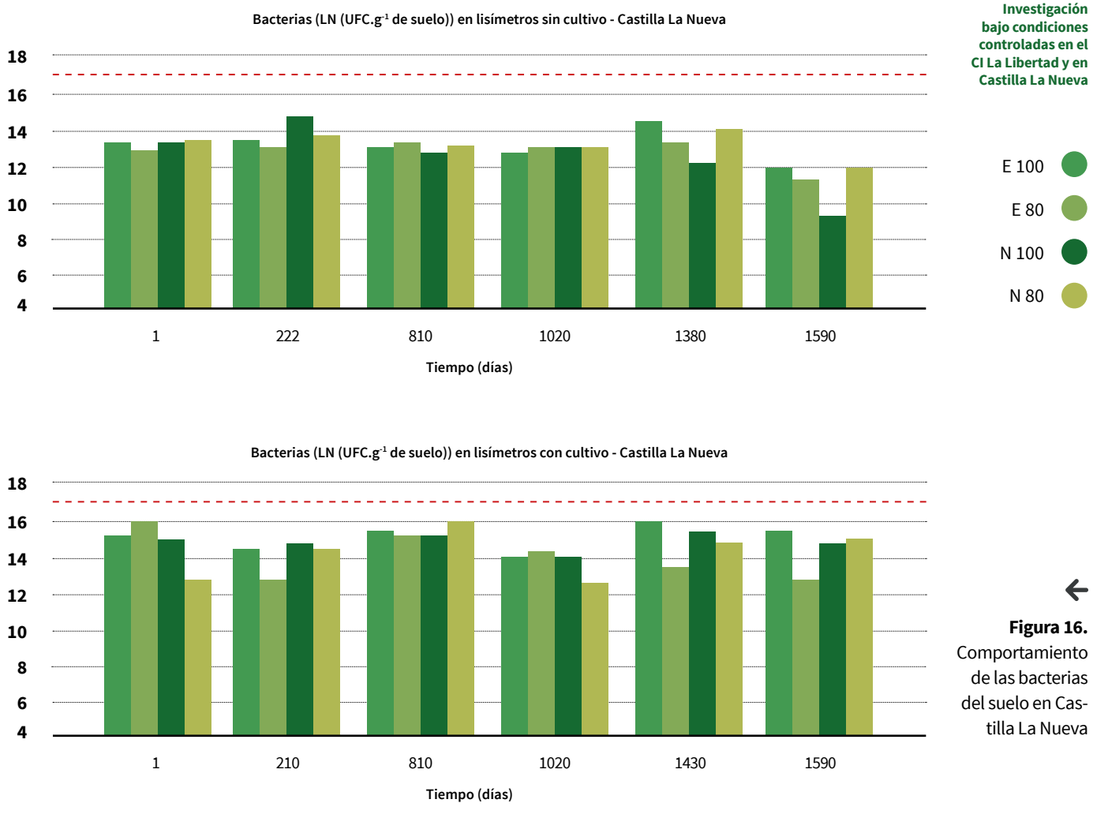


Figura 16. Comportamiento de las bacterias del suelo en Castilla La Nueva

En la figura 16 se presenta el resultado de la variación temporal por tratamiento del conteo de bacterias en las dos localidades y en condiciones de cultivo y sin cultivo. Los valores más altos en el conteo de bacterias corresponden a los tratamientos en donde se establecieron cultivos en las dos localidades. No es claro el efecto de los tratamientos de agua de riego en el conteo de las bacterias del suelo.

Los contenidos de bacterias registrados en este trabajo se presentan un poco por debajo del valor reportado como normal por Osorio (2012) para los suelos ácidos, es decir, 54 x 10^6 UFC.g^{-1} de suelo. Analizando la figura 16, se observa que la población de bacterias en los lisímetros de las dos localidades no refleja variabilidad notoria a través del tiempo en el número de unidades formadoras de colonias (UFC (LN)) con relación al efecto de los tratamientos e igualmente con relación a la cobertura (con y sin cobertura). Sin embargo, todos los resultados se presentan cerca del rango óptimo de poblaciones para este tipo de suelos.

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. Debido a su amplia distribución, se pueden encontrar en superficies rocosas y en suelos rizosféricos, ricos en humus, hojarasca y estiércol, así como también en sedimentos marinos.

En la tabla 18 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a los registros de conteo de actinomicetos en los diferentes tratamientos y localidades.

Tabla 18. Resultados del análisis estadístico efectuado al conteo de actinomicetos en el suelo utilizando un programa SAS (ANOVA y prueba de significancia de Tukey)

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Actinomicetos (LN (UFC.g^{-1} de suelo))			
	Media	Media	Media	Media
E100	8,69 a	7,35 ab	7,64 a	9,82 a
E80	8,68 a	6,88 b	7,34 a	9,97 a
N100	8,48 a	8,12 a	7,10 a	9,13 a
N80	8,24 a	7,58 ab	7,85 a	9,46 a

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. LN: logaritmo natural.

Como se puede apreciar, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Asimismo, los valores de conteo de unidades formadoras de colonias de actinomicetos se hallan en niveles próximos a los normales para este tipo de suelos.

En la figura 17, por otra parte, se presenta el comportamiento temporal de los actinomicetos del suelo para todos los tratamientos en Castilla La Nueva. Los conteos bajos corresponden a los suelos con el pH más ácido.

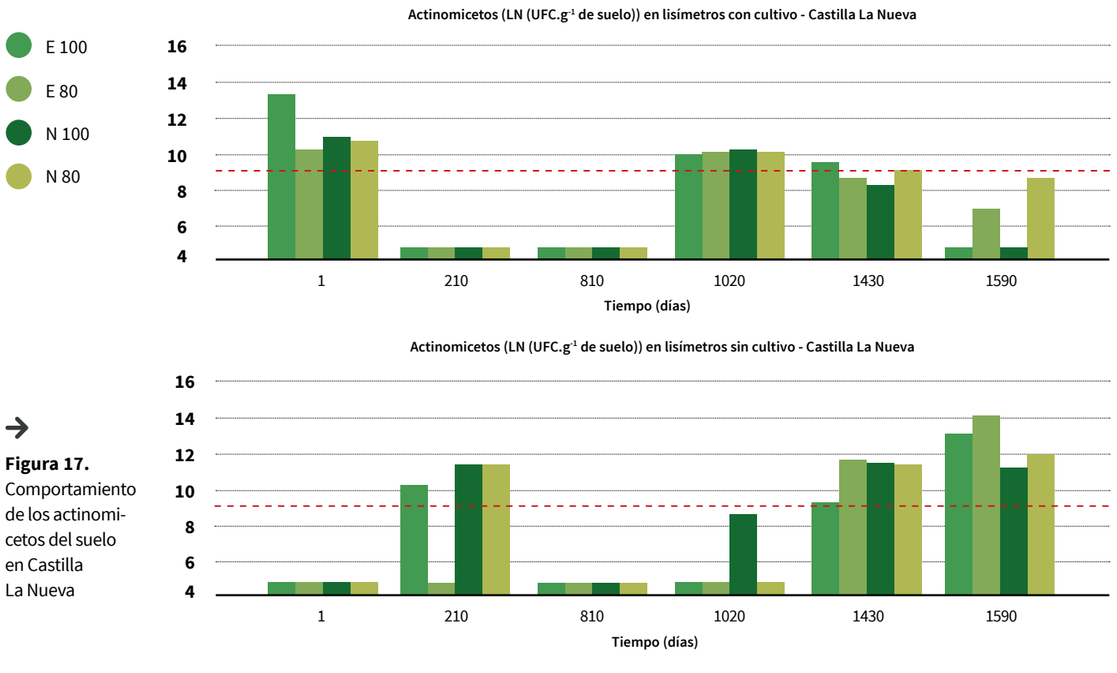


Figura 17. Comportamiento de los actinomicetos del suelo en Castilla La Nueva

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.

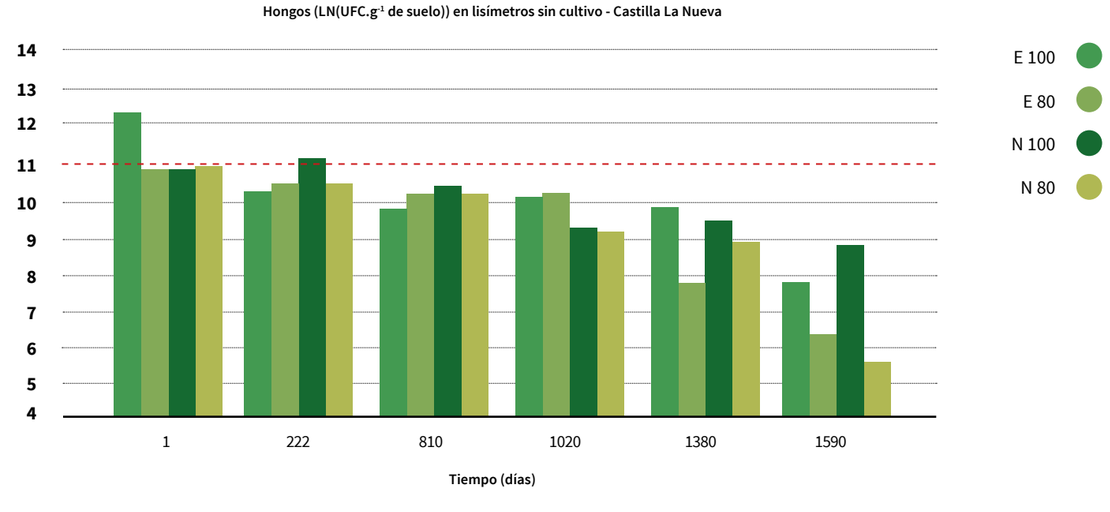
Estos organismos se desarrollan bien en pH variado, pero prefieren los ácidos, donde las bacterias y actinomicetos no pueden competir. Asimismo, son importantes descomponedores de residuos en suelos forestales ácidos. Su población va de 100.000 a un millón por gramo de suelo.

En la tabla 19 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado al conteo de hongos del suelo en los tratamientos considerados en las dos localidades. Como se observa, no se presentaron diferencias significativas debidas a los tratamientos.

Tabla 19. Resultados del análisis estadístico efectuado al conteo de hongos en el suelo utilizando un programa SAS (ANOVA y prueba de significancia de Tukey)

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Hongos (LN (UFC.g^{-1} de suelo))			
	Media	Media	Media	Media
E100	8,97 a	10,31 a	10,08 a	10,54 a
E80	9,12 a	10,23 a	9,23 a	10,62 a
N100	9,05 a	10,21 a	10,03 a	10,77 a
N80	8,71 a	10,05 a	9,19 a	10,64 a

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. LN: logaritmo natural.



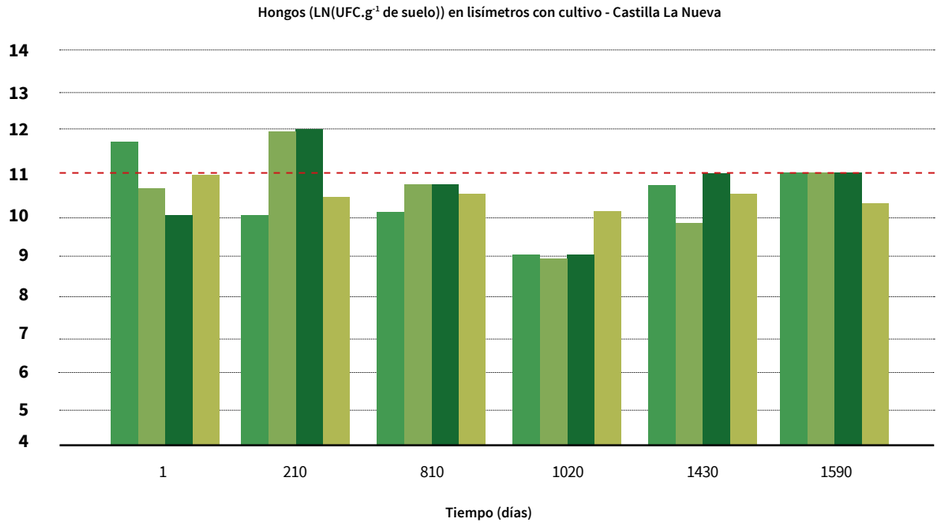


Figura 18. Comportamiento de los hongos del suelo en Castilla La Nueva

En la figura 18 se presenta la variación temporal de los hongos en todos los tratamientos para las dos localidades. Los lisímetros en donde se establecieron los cultivos son los que presentan un mayor conteo de unidades formadoras de colonias (alrededor de 100.000) por gramo de suelo.

Según Osorio (2012), la cantidad adecuada de hongos en el suelo se ha establecido en 11 (10^4 a 10^5 UFC). Según esta referencia, todos los tratamientos, las localidades y los tipos de coberturas se encuentran en un rango 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, 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.

Muchos de estos productos tienen un olor característico a gasolina, kerosén o aceite. 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.

Cuando hay escapes o derrames de TPH directamente al agua, algunas fracciones de los TPH flotarán en el agua y formarán una capa delgada en la superficie. Otras fracciones más pesadas se acumularán en el sedimento del fondo, lo que puede afectar a peces y a otros organismos que se alimentan en el fondo. Algunos organismos en el agua (principalmente bacterias y hongos) pueden degradar algunas de las fracciones de los TPH.

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.

En el mundo actualmente existe un gran número de sitios contaminados, principalmente con hidrocarburos del petróleo. Este hecho ha generado interés de las instituciones gubernamentales y privadas por la legislación y remediación de estos lugares. En ese sentido, el conocimiento del tipo de contaminación y su concentración es fundamental, pues permite establecer las condiciones del sitio, el riesgo que representa 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 se publicó en 2005 la Norma Oficial Mexicana NOM-Semarnat/SS-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. En esta norma se establecen los límites en función de las fracciones ligera, media y pesada, así como del uso del suelo (tabla 20). Con esto en mente, en la tabla 21 se relacionan los resultados del contenido de hidrocarburos totales en suelos en los lisímetros de las dos localidades en estudio.

Tabla 20. Límites máximos permisibles en México para fracciones de hidrocarburos en suelo

Fracción de hidrocarburos	Uso del suelo
	Agrícola (mg.kg^{-1})
Ligera	200
Media	1.200
Pesada	3.000

Tabla 21. Aspectos ambientales del suelo en lisímetros de CI La Libertad y Castilla La Nueva (2015)

Tratamiento	Hidrocarburos totales (%) (extracción por ultrasonido/ infrarrojo)	
	CI La Libertad	Castilla La Nueva
E100	<0,00625	<0,00625
E80	<0,00625	<0,00625
N100	<0,00625	<0,00625
N80	<0,00625	<0,00625

E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Método: Standard Methods for The Examination of Water & Wastewater (22nd edition 2012), NMX-AA-145-SCFI-200 8 Y SM 5520 CF

Los valores obtenidos en la valoración de los TPH, tanto para el CI La Libertad como para Castilla La Nueva, se encuentran por debajo del rango detectable: <0,00625% o 62,5 mg.kg^{-1}, por el método de extracción por ultrasonido/infrarrojo del laboratorio Antek S. A. Esto demuestra que el uso de ATAEP como riego no generó respuesta en relación con el contenido de los TPH del suelo.

Efectos en plantas

Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), es una planta monocotiledónea que pertenece a la familia de las gramíneas. Como pasto perenne que es, puede multiplicarse a partir de semilla verdadera, yemas nodales y, en algunos casos, rizomas. 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 que requiere 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, fósforo 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), edáficos (características de los suelos) y técnicos (relacionados con el manejo del cultivo). El estudio de estos factores permite determinar su influencia sobre la bioproductividad de la caña en una zona agroclimática dada; de este modo es posible entonces ubicar las variedades de acuerdo con su grado de adaptación al medio ecológico y en función de los rendimientos deseados.

Localidad Castilla La Nueva

Los parámetros de crecimiento se evaluaron en los lisímetros con cultivo. El cultivo se tuvo en dos ciclos diferentes. Los resultados del análisis estadístico y los valores medios de las mediciones sobre altura de planta y diámetro del tallo se presentan en las tablas 22 y 23 y en las figuras 19 y 20.

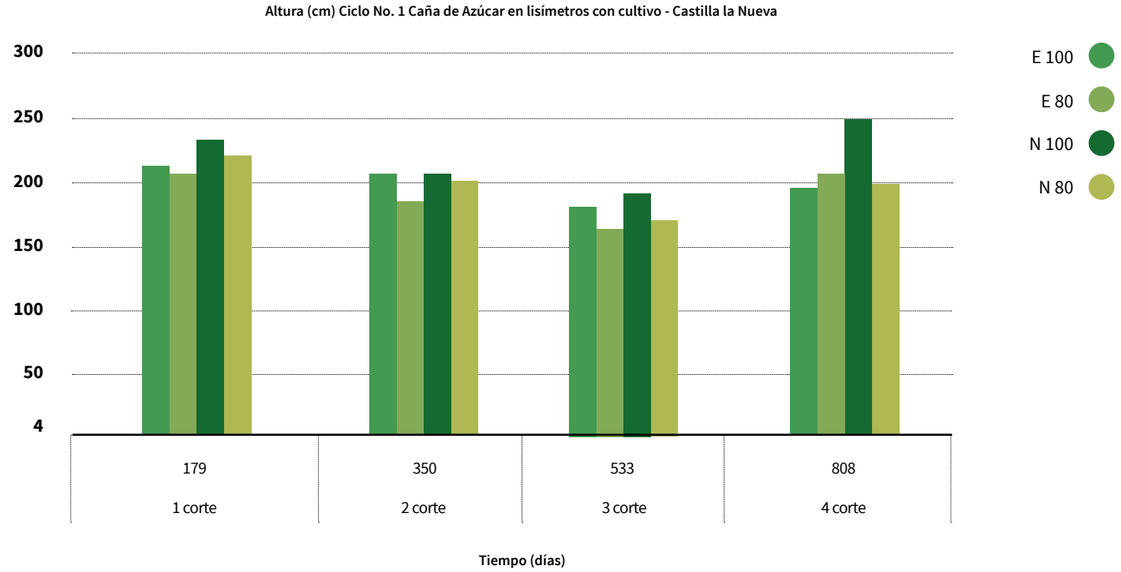
Altura (cm) caña de azúcar – Castilla La Nueva

	Ciclo 1			
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte
	179 días	350 días	533 días	808 días
	Media	Media	Media	Media
E100	213,58 ab	211,25 a	182,33 ab	198,58 b
E80	209,75 b	191,75 a	164,50 b	209,92 ab
N100	233,67 a	209,50 a	190,50 a	251,08 a
N80	223,42 ab	208,17 a	169,00 ab	201,83 ab
	Ciclo 2			
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte
	235 días	465 días	741 días	983 días
	Media	Media	Media	Media
E100	171,03 a	144,13 ab	113,44 a	132,58 a
E80	147,92 a	123,27 b	109,25 a	154,42 a
N100	200,83 a	183,38 a	164,13 a	120,58 a
N80	201,12 a	149,25 ab	128,38 a	136 a

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Tabla 22. Comportamiento de la altura de planta en los dos ciclos de producción de caña de azúcar en Castilla La Nueva

En cuanto a la altura de planta medida en la inserción de la última hoja abierta, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de calidad de agua y de dosis de riego.Los valores hallados se encuentran un poco por debajo de los reportados como normales (300 cm) para la variedad CC 8592 con un ciclo de doce meses en suelos fértiles del Valle del Cauca (Vertic Ustropept), según lo reportado por Cenicaña (2002).



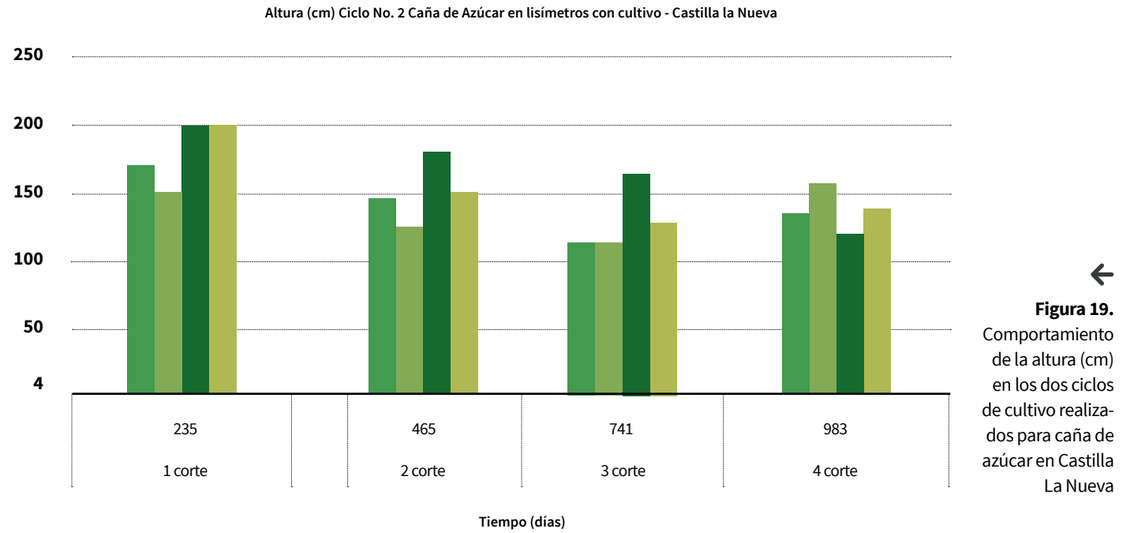


Figura 19. Comportamiento de la altura (cm) en los dos ciclos de cultivo realizados para caña de azúcar en Castilla La Nueva

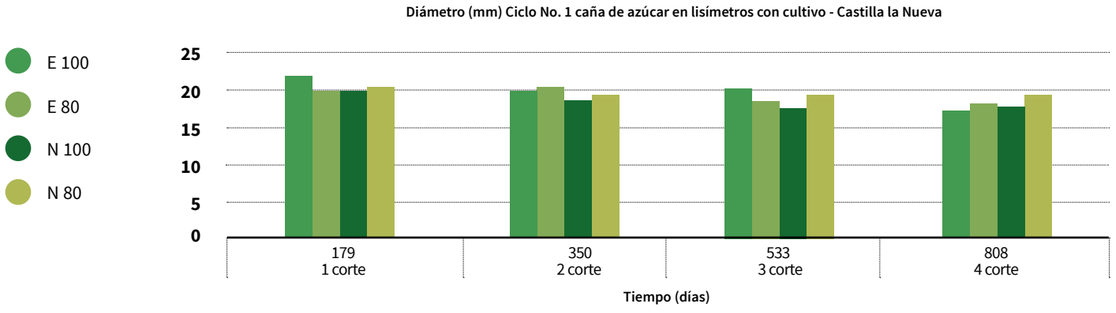
En el tiempo se advierte una disminución de la altura, principalmente en los tratamientos con agua normal, aunque no muy marcada debido básicamente a que los periodos entre cortes fueron distintos.

Diámetro (mm) caña de azúcar – Castilla La Nueva				
	Ciclo 1			
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte
	179 días	350 días	533 días	808 días
	Media	Media	Media	Media
E100	22,17 a	20,03 a	20,42 a	17,50 a
E80	20,00 a	20,50 a	18,92 a	18,42 a
N100	20,17 a	18,97 b	17,75 a	18,00 a
N80	20,75 a	19,83 a	19,83 a	19,42 a
	Ciclo 2			
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte
	235 días	465 días	741 días	983 días
	Media	Media	Media	Media
E100	25,83 a	24,31 a	23,6 a	22,83 a
E80	25,08 a	23,81 a	23 a	21,67 a
N100	24,25 a	22 a	22,2 a	24,83 a
N80	22,42 a	18,81 a	22,8 a	22,83 a

Tabla 23. Comportamiento del diámetro del tallo en los dos ciclos de producción de caña de azúcar en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En cuanto al comportamiento del diámetro del tallo en los dos ciclos de producción de caña de azúcar de Castilla La Nueva, no se observa que los tratamientos de agua tengan influencia significativa.



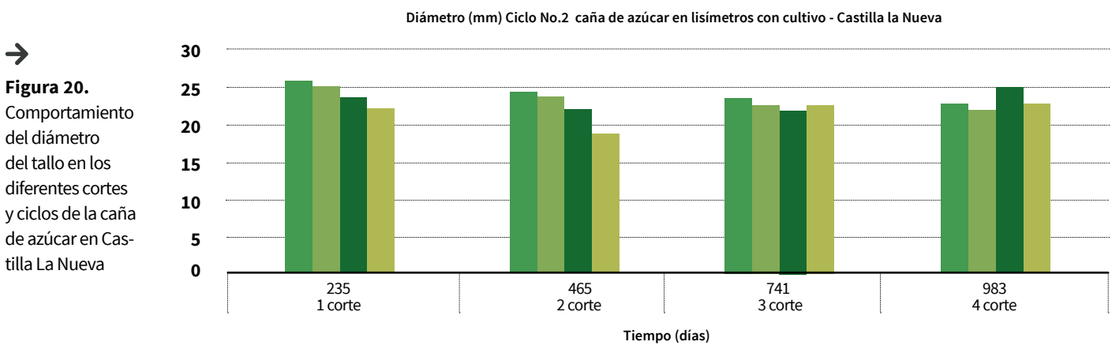


Figura 20. Comportamiento del diámetro del tallo en los diferentes cortes y ciclos de la caña de azúcar en Castilla La Nueva

En el tiempo y para los dos ciclos, en la medida en que se hacen los cortes, el diámetro de las plantas va disminuyendo. Esta medición también está influenciada por los periodos irregulares en que se realizaron las cosechas.

Los parámetros de crecimiento (altura y diámetro) de los dos ciclos de establecimiento del cultivo de caña de azúcar muestran un comportamiento similar entre tratamientos y cortes respecto a lo reportado en la literatura.

Por otro lado, en la tabla 24 y en la figura 21 se presentan los rendimientos encontrados expresados en t.ha^{-1} de caña (materia verde y húmeda TCH). Al respecto cabe anotar que, para las condiciones del Valle del Cauca, la cosecha se presenta entre los 10 a 14 meses en promedio. En el primer ciclo de Castilla La Nueva, la primera cosecha en plantilla se realizó a los 209 días, y para el segundo ciclo, a los 243 días (siete y ocho meses respectivamente), lo cual demuestra el rápido crecimiento del cultivo en las condiciones edafoclimáticas a las que fue sometido.

Cenicaña ha definido que el rendimiento promedio para la variedad estudiada, CC 8592, oscila entre 120 y 130 TCH. Como se observa en la tabla 24 y en la figura 21, tanto en el primer ciclo como en el segundo se encontraron rendimientos superiores a estos promedios. También se ve claramente que en el tiempo la producción decrece con los cortes.

Rendimiento de materia verde (t.ha^{-1}) caña de azúcar – Castilla La Nueva				
	Ciclo 1			
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte
	209 días	405 días	612 días	988 días
	Media	Media	Media	Media
E100	206,6 a	125,2 a	118,3 a	79,6 a
E80	202,2 a	117,5 a	113,7 a	81,8 a
N100	190,5 a	100,9 a	101,7 ab	92,4 a
N80	212,2 a	111,4 a	85,7 b	81,7 a
	Ciclo 2			
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte
	243 días	490 días	813 días	1.075 días
	Media	Media	Media	Media
E100	117,9 a	110,9 a	115,8 a	69,9 a
E80	136,4 a	86,8 a	108 a	86,1 a
N100	146,7 a	130,8 a	154,3 a	95 a
N80	92 a	102,6 a	121,8 a	63,1 a

Tabla 24. Rendimiento medio (TCH) por corte y para los dos ciclos de caña de azúcar en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En general, se ha establecido en términos económicos que es necesario renovar el cultivo cuando el TCH haya caído en más del 18% con respecto al potencial productivo en la plantilla, o sea, el 18% de 120 TCH (Riopaila-Castilla, 2007).

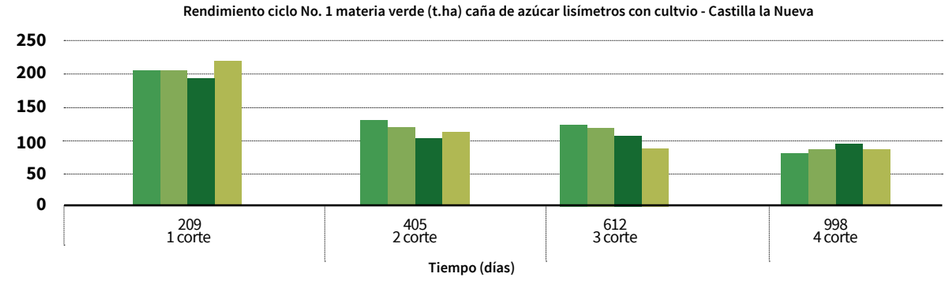
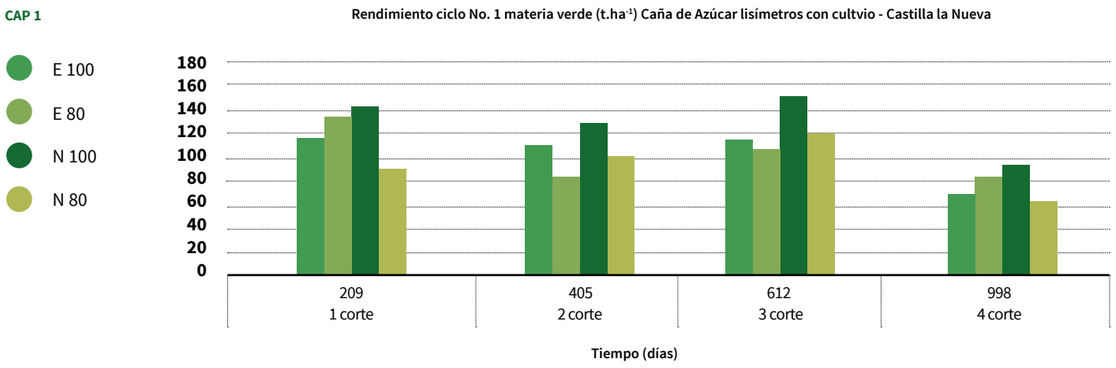


Figura 21. Comportamiento temporal del rendimiento en materia verde, expresado en t.ha, durante los ciclos 1 y 2 en caña de azúcar en Castilla La Nueva



Con el objeto de establecer el comportamiento en el tiempo de esta variable cuando proviene de plantilla y de soca, se realizó un modelamiento matemático (figura 22) con los resultados de producción. En esta labor se consideró generar ecuaciones polinómicas de grado dos para la información de los cuatro tratamientos en los dos ciclos estudiados. El mejor ajuste se encontró en el ciclo 1 con R2 superiores a 0,9 para todos los tratamientos. Según el criterio establecido (línea roja), después de la tercera cosecha económicamente se hace necesario renovar para evitar pérdidas económicas o baja significativa de los ingresos.

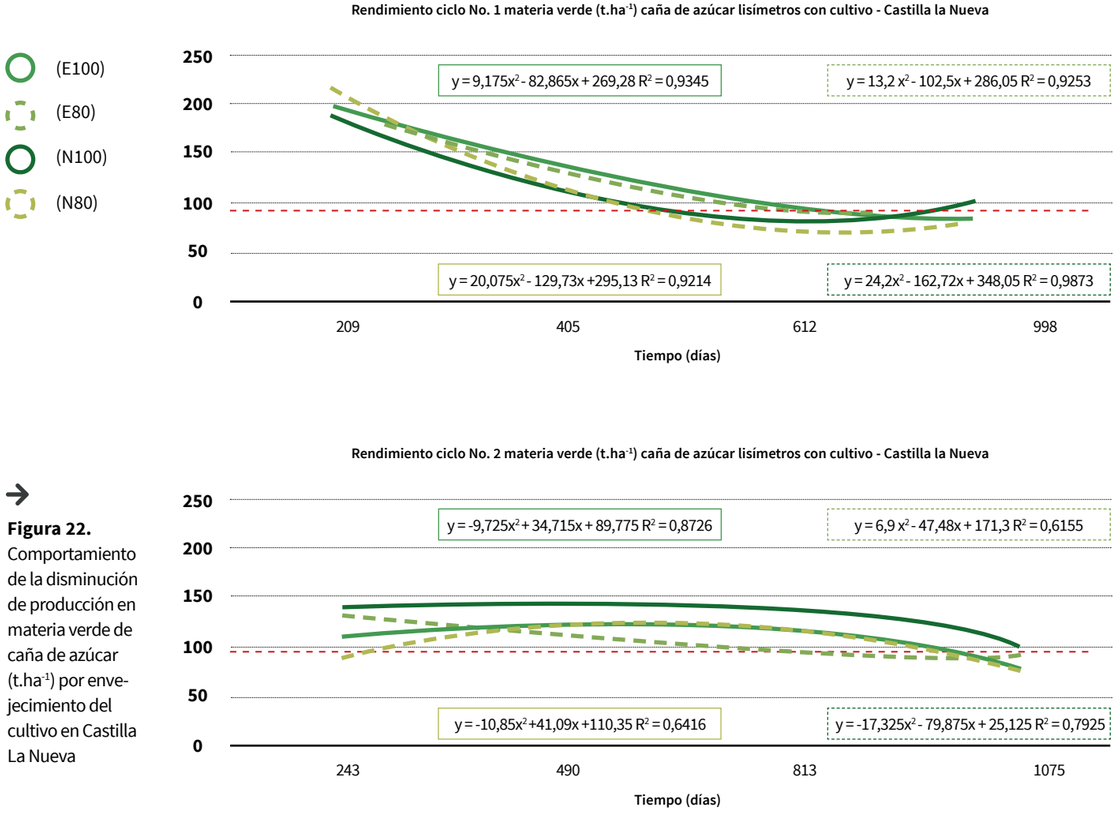


Figura 22. Comportamiento de la disminución de producción en materia verde de caña de azúcar (t.ha^{-1}) por envejecimiento del cultivo en Castilla La Nueva

La información que más se ajusta a este modelo en el ciclo 2 corresponde al tratamiento de ATAEP en la mayor dotación de riego (R2 de 0,87). En la figura se observa la línea que marca el límite admitido para considerar la renovación del cultivo.

Es interesante observar, con el modelamiento realizado en esta localidad, el efecto que tiene la cantidad del agua aplicada o dotación de riego cuando se aplicaron los tratamientos E100 y N100 (mantener el suelo a capacidad de campo) en la producción.

En el ciclo 2 también se observó que, después de la tercera cosecha, es recomendable renovar el cultivo para evitar baja en los ingresos producidos por esta actividad. Finalmente, vale la pena resaltar la productividad experimental obtenida para los tipos de suelo utilizados (oxisoles de baja fertilidad), que brindaron rendimientos similares a los encontrados en los vertisoles del Valle del Cauca.

Pasto elefante

(Pennisetum purpureum Schumacher)

Pennisetum purpureum Schumacher, también llamado pasto elefante (PE), napier grass, king grass o linya mungu, es una gramínea perenne cespitosa estival de la tribu paniceae gigante, originaria de África tropical y húmeda, particularmente de Uganda, y naturalizada en América tropical y subtropical. La mayoría de los tipos son de altos y robustos tallos (superiores a 3 m) aunque se ha 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.

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, de 35-40 t.ha^{-1}/año de materia seca, con seis cortes al año (Segura y Norato, 1994). Estudios realizados en Puerto Rico mostraron que el pasto elefante, con una producción de materia seca por año de 25.200 kg, extrae del suelo 302 kg de nitrógeno (11,98 kg por tonelada de materia seca producida), 64 kg de fósforo (2,53 kg.t^{-1} de materia seca), 504 kg de potasio (20 kg.t^{-1}), 96 kg de calcio (3.81 kg.t^{-1}) y 63 kg de magnesio (2,50 kg.t^{-1}) (Ceniap, 2001).

El valor nutritivo de la especie varía con la época de corte y la edad. Los contenidos de proteína, calcio y fósforo disminuyen con el incremento de la edad, mientras aumenta la materia seca. En general se puede decir que el pasto tiene un 14,86% de materia seca, 4,38% de proteína, 0,19% de calcio y 0,44% de fósforo.

Localidad Castilla La Nueva

Los parámetros de crecimiento se evaluaron en los lisímetros con cultivo. Los resultados del análisis estadístico y los valores medios de las mediciones sobre altura de planta y diámetro de planta se presentan en la tabla 25 y en la figura 23. Como se observa, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de las dos variables de crecimiento y desarrollo analizadas.

Altura (cm) pasto elefante – Castilla La Nueva

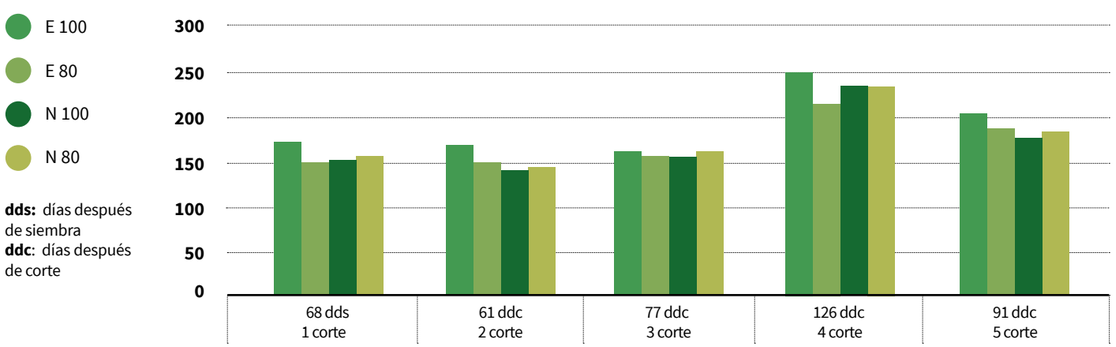
	Ciclo 1				
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte	5.º corte
	68 dds	61 ddc	77 ddc	126 ddc	91 ddc
	Media	Media	Media	Media	Media
E100	167,1 a	163,2 a	158,7 a	243,7 a	198,6 a
E80	142,8 a	145,7 a	152,3 a	210,4 a	182,2 a
N100	147,7 a	138,1 a	150,6 a	229,5 a	173,6 a
N80	151,3 a	140,2 a	158,6 a	231,2 a	179,2 a

Diámetro (mm) pasto elefante

	Ciclo 1				
Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte	5.º corte
	68 dds	61 ddc	77 ddc	126 ddc	91 ddc
	Media	Media	Media	Media	Media
E100	15,92 b	13,25 a	11,5 a	11,08 a	13,83 a
E80	15,5 b	13,92 a	10,5 a	10,61 a	14,67 a
N100	19,83 a	13,25 a	10,92 a	11,67 a	13,67 a
N80	18,5 a	12,92 a	11,83 a	11,08 a	13 a

Tabla 25. Comportamiento de la altura (cm) y del diámetro del tallo (mm) en el primer ciclo de cultivo del pasto elefante en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. dds: días después de siembra. ddc: días después de corte.



dds: días después de siembra
ddc: días después de corte

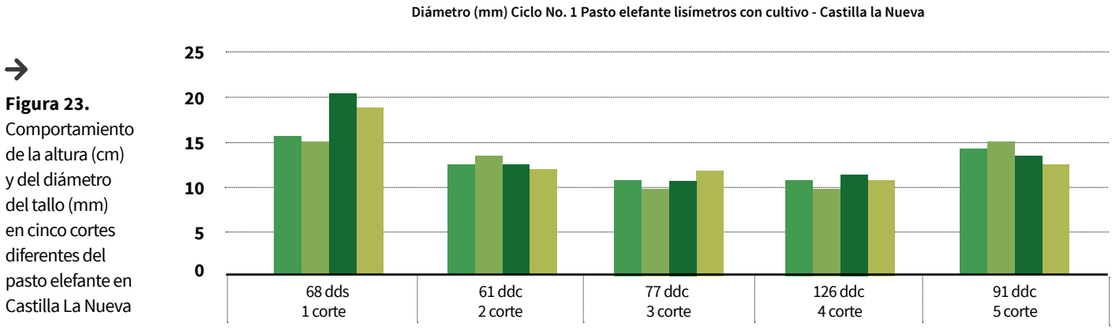


Figura 23. Comportamiento de la altura (cm) y del diámetro del tallo (mm) en cinco cortes diferentes del pasto elefante en Castilla La Nueva

Con relación al comportamiento de la altura y diámetro de planta para el mismo material genético evaluado en Castilla La Nueva y en el CI La Libertad, se observó que inicialmente el desarrollo del cultivo en Castilla fue privilegiado, condición probablemente asociada a la fertilidad del suelo y a la textura con un mayor contenido de arcillas.

Considerando la altura de planta, no se evidenciaron cambios significativos debidos a los tratamientos. Por otra parte, las alturas registradas se encuentran en los rangos (2-3 m de altura) reportados por Peters, Franco, Schmidt e Hincapié (2011). Es de anotar que el rápido crecimiento de esta especie en las condiciones edafoclimáticas y de manejo del invernáculo de Castilla restringieron un poco el normal desarrollo de la investigación.

En la tabla 26 se presenta el resultado del análisis estadístico efectuado a los registros de producción, donde no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. En la figura 24, por otro lado, se presenta el comportamiento de la producción, expresado en t.ha de materia verde, para todos los tratamientos y cortes realizados.

Rendimiento ciclo 1 materia verde pasto elefante – Castilla La Nueva

Tratamiento	1.er corte	2.º corte	3.er corte	4.º corte	5.º corte
	70 dds	70 ddc	89 ddc	162 ddc	98 ddc
	Media	Media	Media	Media	Media
E100	155,2 a	138 ab	87,8 a	107,1 b	75,4 b
E80	142,1 a	151,5 a	104,5 a	116,9 ab	93,9 a
N100	153,5 a	125,6 b	101,1 a	136,5 ab	83,8 ab
N80	146,6 a	139 ab	92 a	147,2 a	92,3 ab

Tabla 26. Rendimiento medio, expresado en t.ha^{-1}, del pasto elefante en Castilla La Nueva

* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. dds: días después de siembra. ddc: días después de corte.

Los rendimientos medios obtenidos en los cortes se encuentran por debajo de lo descrito por Cardona, Ríos y Peña (2012), quienes plantean que plantas de pasto elefante pueden llegar a tener producciones que oscilen entre 80-100 t.ha^{-1}/corte.

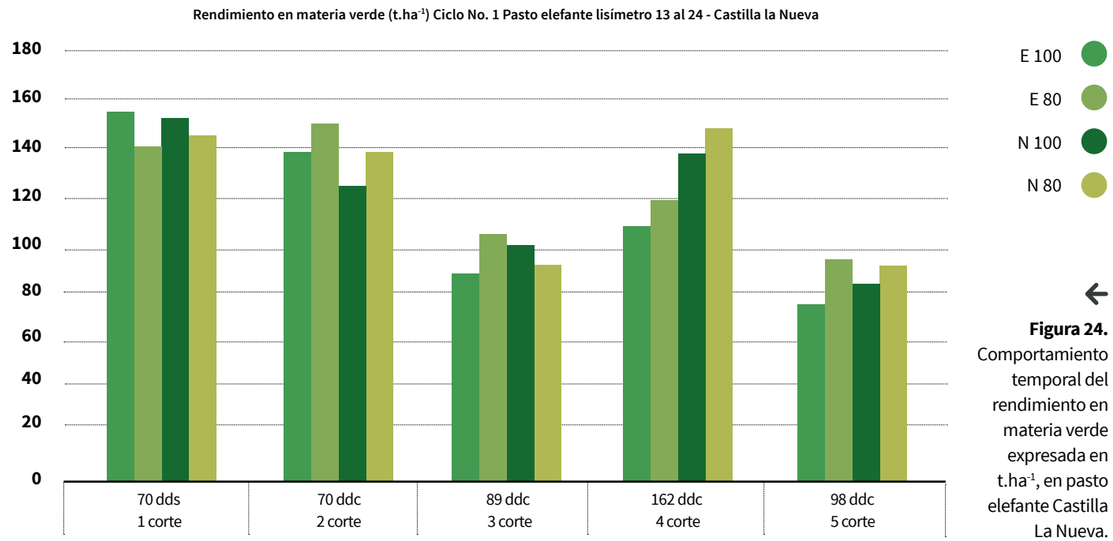


Figura 24. Comportamiento temporal del rendimiento en materia verde expresada en t.ha^{-1}, en pasto elefante Castilla La Nueva.

Análisis de tejido vegetal

El análisis de tejido vegetal es una técnica que determina el contenido de los nutrientes en tejidos de plantas de un cultivo muestreado en un momento o etapa de desarrollo determinado (Munson y Nelson, 1986; Campbell, 2000). Esta herramienta se basa en los mismos principios que el análisis del suelo, asumiendo que la concentración de nutrientes en la planta está directamente relacionada con la habilidad del suelo para proporcionarlos y, a su vez, con la productividad de las plantas. En la tabla 27 se presentan los resultados obtenidos de tejido vegetal para las dos especies y las dos localidades estudiadas.

Análisis de tejido vegetal en lisímetros con cultivo

Cultivo	Localidad	Tratamiento	Concentración en porcentaje (%)					
			N	P	K	Ca	Mg	Na
Caña de azúcar	CI La Libertad	E100	0,43	0,13	0,65	0,08	0,05	0,02
		E80	0,34	0,12	0,41	0,10	0,05	0,02
		N100	0,31	0,11	0,26	0,14	0,04	0,01
		N80	0,34	0,08	0,17	0,18	0,04	0,01
	Castilla La Nueva	E100	0,63	0,08	0,56	0,15	0,05	0,04
		E80	0,31	0,06	0,24	0,05	0,03	0,04
		N100	0,19	0,06	0,12	0,07	0,02	0,02
		N80	0,19	0,06	0,24	0,05	0,02	0,01
Pasto elefante	CI La Libertad	E100	1,43	0,21	1,26	0,25	0,20	0,02
		E80	1,17	0,16	1,26	0,17	0,15	0,01
		N100	1,08	0,14	1,19	0,21	0,13	0,00
		N80	1,05	0,16	1,15	0,18	0,11	0,00
	Castilla La Nueva	E100	1,20	0,15	1,52	0,37	0,19	0,02
		E80	0,82	0,14	1,31	0,39	0,18	0,02
		N100	1,04	0,17	1,19	0,34	0,17	0,02
		N80	0,90	0,13	0,78	0,40	0,23	0,02

Tabla 27. Análisis de tejido para caña de azúcar y pasto elefante sembrados en los lisímetros con cultivo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

* E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Caña de azúcar

Considerando la información consignada en la tabla 27, se encuentra para las dos localidades que el nitrógeno (N) es mayor en las plantas de caña de azúcar que fueron regadas con ATAEP que en las que fueron mantenidas con agua normal. Los valores encontrados, según los rangos establecidos por Bennet, Anderson y Jones, se catalogan como deficientes (<1,6%).

La tendencia observada para el nitrógeno también se advierte para el fósforo (P) y para el potasio (K), donde los tratamientos regados con ATAEP mostraron los valores más altos, aunque también para todos los casos están en niveles de deficiencia según las tres escalas consideradas.

Para el calcio (Ca) se reportan valores en el rango 0,05-0,18% (el valor crítico de deficiencia es <1%), y los valores menores registrados corresponden a la localidad de Castilla La Nueva. Por otro lado, los niveles más altos de magnesio (Mg) se presentan en los tratamientos en donde se utilizó ATAEP, con un valor medio de 0,05%, mientras que que las escalas de evaluación consideradas sitúan el nivel crítico de este nutriente en valores inferiores a 0,08%.

El sodio (Na) se encuentra poco reportado en resultados de análisis foliar para caña de azúcar. Solo estudios recientes han comenzado a dilucidar la importancia de este elemento en la nutrición de las plantas C4, asociándolo a importantes procesos fisiológicos que se suceden en este tipo de vegetales. Bennett (1993) indica que el valor de suficiencia de este elemento está en el rango de 1-10%. Los valores encontrados en el CI La Libertad están entre 0,01-0,02%, siendo el mayor valor para los tratamientos de riego con ATAEP. La misma tendencia se observó en Castilla La Nueva, pero con valores de 0,04% para tratamientos E y 0,02% para los tratamientos N.

En términos generales, en los análisis foliares de caña de azúcar se encontraron valores menores de todos los nutrientes relacionándolos con los criterios establecidos para este cultivo. Sin embargo, es importante resaltar que los suelos en donde se realizó la investigación (oxisoles) son considerados pobres y de muy baja fertilidad. Por lo tanto, en el análisis de tejido vegetal del cultivo no se observó efecto alguno de los tratamientos de agua para riego empleados.

Pasto elefante

Para el cultivo de pasto elefante se compararon los resultados obtenidos con la información reportada por Escobar y Ronquillo (2012). Así pues, mientras que el nivel de nitrógeno reportado como óptimo es de 1,5%, en esta investigación se encontró que este nutriente, en tejido vegetal, estaba en el rango de 1,43-1,05%, siendo los valores más altos para los tratamientos con ATAEP (E) en el CI La Libertad. El potasio también se mostró más elevado en los tratamientos con ATAEP, con un rango de valores de 1,26-1,15%, siendo el nivel óptimo de referencia 1%. El valor más alto se registró en Castilla La Nueva.

En el CI La Libertad se presentaron valores más altos de fósforo que en Castilla La Nueva. El rango de este nutriente en tejido vegetal osciló entre 0,21-0,14% y entre 0,17-0,13% para cada localidad respectivamente, en tanto que el nivel óptimo reportado es de 0,2%. En Castilla La Nueva se presentaron los valores más elevados de calcio, los cuales se ubicaron en el rango entre 0,4-0,34%. En el CI La Libertad este rango se presentó entre 0,25-0,17%. En ambos casos, los niveles de calcio se consideran bajos si se comparan con el valor óptimo de referencia, que se sitúa en 0,5%.

El pasto elefante en las dos localidades presentó niveles del magnesio inferiores a los considerados óptimos (2,0%), con valores registrados en el rango de 0,11-0,23%.

Finalmente, el contenido de sodio en tejido vegetal de este cultivo osciló entre 0-0,02% (el valor 0% se registró para los tratamientos regados con agua normal en la localidad del CI La Libertad). Cabe anotar que, por ser el pasto elefante una planta C4, se espera que el sodio en los contenidos reportados actúe más como un nutriente que como un elemento tóxico. Los resultados discutidos permiten inferir que no se encontró efecto alguno en el tejido vegetal del pasto elefante por la calidad y los tratamientos de agua utilizados en este estudio.

Análisis bromatológicos (proximales)

El propósito principal de un análisis proximal es determinar, en un producto, el contenido de humedad, grasa, proteína y cenizas.

Análisis proximales en lisímetros con cultivo

Cultivo	Localidad	Tratamiento	Concentración en porcentaje (%)			
			Proteína cruda	Ceniza	FDN	Extracto etéreo
Caña de azúcar	CI La Libertad	E100	1,8	3,1	46,2	2,0
		E80	1,8	2,9	44,6	2,1
		N100	2,2	2,0	55,5	1,9
		N80	2,0	2,0	59,8	1,2
	Castilla La Nueva	E100	3,3	3,3	65,6	1,4
		E80	3,1	3,1	51,7	2,1
		N100	3,2	2,4	52,4	2,3
		N80	3,1	2,2	47,6	2,0
Pasto elefante	CI La Libertad	E100	6,1	9,2	55,0	2,3
		E80	6,1	8,6	85,6	2,0
		N100	4,8	6,7	70,2	2,0
		N80	6,1	7,7	70,2	1,7
	Castilla La Nueva	E100	5,7	9,2	71,3	2,0
		E80	4,4	8,1	74,2	2,0
		N100	4,4	6,7	74,7	2,0
		N80	4,8	5,9	73,3	1,0

Tabla 28. Análisis bromatológico (proximal) para caña de azúcar y pasto elefante sembrados en los lisímetros con cultivo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

* E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Estos procedimientos químicos son excelentes para realizar control de calidad y determinar si los productos suministrados alcanzan los estándares establecidos para garantizar su uso. En la tabla 28 se presentan los resultados obtenidos de los análisis proximales realizados para las dos especies y las dos localidades consideradas.

Caña de azúcar

Para el cultivo de caña de azúcar se encontraron valores más altos de proteína cruda en la localidad de Castilla La Nueva (>2%). Sin embargo en los tratamientos que fueron regados con ATAEP en el CI La Libertad este valor fue un poco menor (1,8%). Si se compara con la información de referencia (Laredo, 1988; Zamora y Solano, 1994; INTA Argentina, 2012), todos los valores encontrados son inferiores a los niveles de referencia (4,5%).

La ceniza en los tratamientos de caña de azúcar que fue regada con ATAEP se presentó en una proporción superior a la de los tratamientos con agua normal en ambas localidades. El rango de valores encontrado para este parámetro de evaluación estuvo entre 2,0-3,3%, mientras que la información referencia sitúa este parámetro en valores alrededor de 5%.

En cuanto a la fibra en detergente neutro FDN, todos los valores registrados para caña de azúcar en las dos localidades presentan valores superiores al suministrado como referencia (30,5% según Laredo, 1988). En el CI La Libertad los valores mayores se dan en los tratamientos con agua normal; lo opuesto sucede en Castilla La Nueva.

El extracto etéreo para plantas de caña de azúcar debe ser, según referencia, menor de 2% (INTA Argentina, 2012; Zamora y Solano, 1994). Los valores encontrados para todos los tratamientos se presentan alrededor de este valor, de manera que los datos obtenidos coinciden con los reportados por la literatura.
En definitiva, según los resultados de los análisis bromatológicos efectuados, no se observó influencia en los cultivos de los tratamientos de riego utilizados.

Pasto elefante

Para el cultivo de pasto elefante, Rodríguez (1973), reporta un valor referencia de proteína cruda de 5,34%. La información encontrada en este experimento se encuentra en el rango de 4,4-6,1%, donde los valores más altos corresponden a los tratamientos en donde se utilizó ATAEP para el riego en la localidad del CI La Libertad.

Por otra parte, los mayores valores de cenizas, en ambas localidades, se registraron en los tratamientos donde se utilizó ATAEP para riego. Estas proporciones son ligeramente inferiores a las reportadas como referencia (12%, según Rojas, 2009).
Con relación a la fibra en detergente neutro FDN, todos los valores registrados para pasto elefante en las dos localidades presentan valores superiores al de referencia (30%, según Rojas, 2009 y Rodríguez, 1973).

Finalmente, el extracto etéreo para plantas de pasto elefante está alrededor de 1,8%, que es el valor referencia seleccionado para este caso (Rodríguez, 1973). Los valores encontrados para todos los tratamientos se presentan en el rango entre 1-2,3%, donde los valores mayores corresponden a los tratamientos de riego con ATAEP (E) en ambas localidades.

En definitiva, con los resultados totales de los análisis proximales obtenidos para los cultivos en los dos sitios de experimentación, no se observan cambios significativos en los parámetros evaluados debidos al uso de ATAEP. Los cambios observados se deben principalmente a las condiciones edafoclimáticas propias de cada localidad. Para este caso en particular, los análisis de tejido foliar y proximales se realizaron al final de cada periodo de cosecha sobre muestras totales de plantas y no solamente en hojas.

Análisis de condiciones climáticas

Para analizar las condiciones climáticas a las que estuvieron sometidos los cultivos, se obtuvieron 4.860 registros diarios de nueve parámetros climáticos de importancia para el control de la experimentación y el riego en el CI La Libertad, lo cual totaliza 43.740 observaciones entre los años 2012 y 2015. Tales parámetros fueron las temperaturas máxima, mínima y media del aire, las temperaturas máxima, mínima y media del suelo, la humedad relativa, la radiación y la evapotranspiración. En la figura 25 se presenta en forma gráfica el comportamiento mensual multianual de cinco parámetros climáticos considerados los más relevantes.

La temperatura del aire máxima media registrada en el invernáculo fue de 31,7 °C, con oscilaciones entre 29,8-33,5 °C (las máximas temperaturas se obtuvieron en los tres primeros meses del año). Entretanto, la temperatura media multianual dentro del invernáculo fue de 25,8 °C, la cual varió entre 24,5-27,4 °C.

La humedad relativa media multianual fue de 80,2%, considerada alta. Los meses más húmedos fueron junio, julio y agosto, y los más secos, enero, febrero y marzo. La temperatura edáfica media multianual registrada fue de 27,5 °C, con una oscilación menor a un grado durante todo el año. El mes con mayor temperatura del suelo fue octubre.

La evapotranspiración anual multianual registrada por la estación climática fue de 763,1 mm. Los meses de mayor evapotranspiración fueron octubre, septiembre y enero.

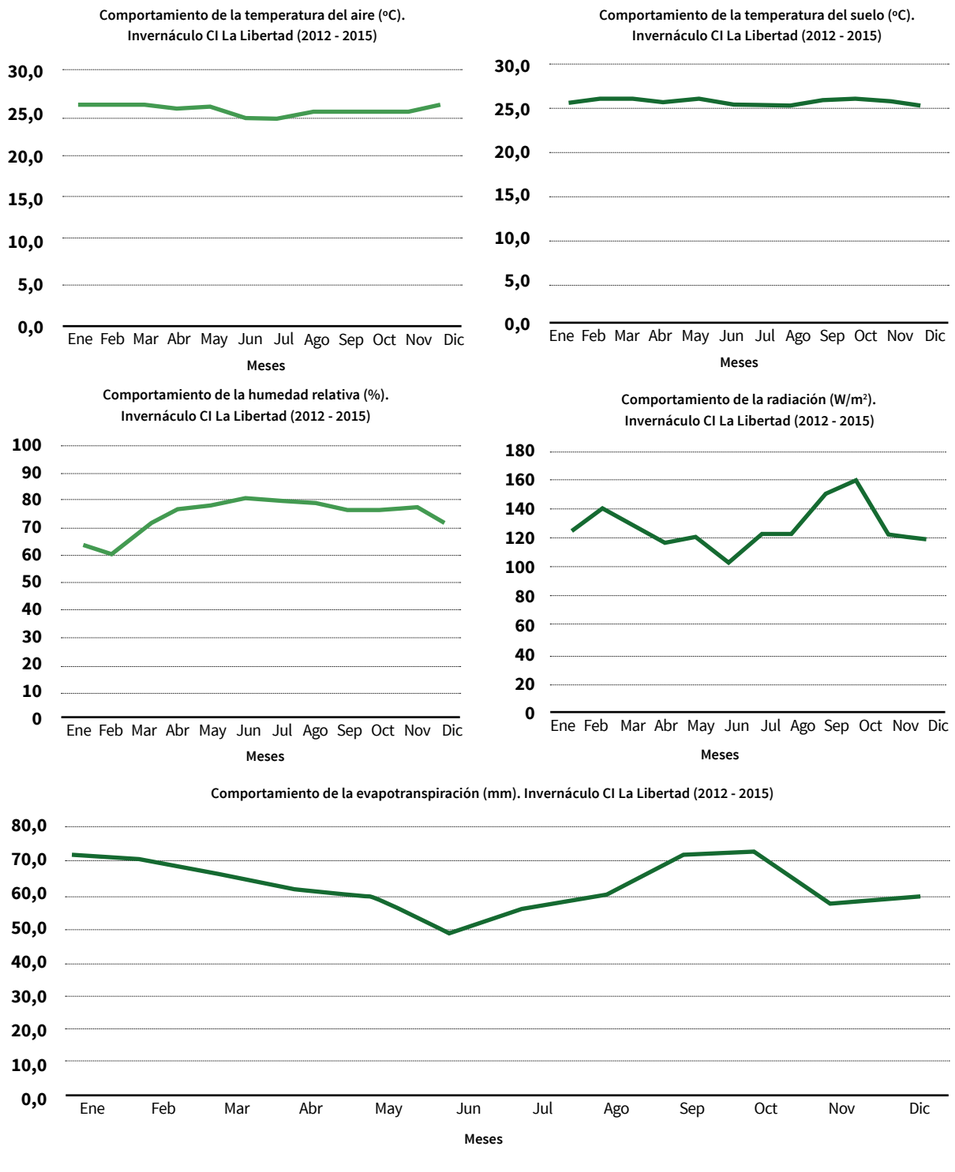


Figura 25. Condiciones medias de clima en el invernáculo del CI La Libertad (2012-2015)

Efectos en agua

Volúmenes de agua aplicada

En la tabla 29 se presentan las cantidades de agua aplicadas en las dos localidades y en los sistemas (con cultivo y sin cultivo). El volumen de agua de riego se determinó en función de los registros tomados diariamente con un medidor de humedad del suelo tipo TDR, a una profundidad de 20 cm desde la superficie.

Tabla 29. Volúmenes de agua aplicada en las dos localidades

Litros aplicados por lisímetro		
Dotación del 100%		
Lisímetros	CI La Libertad (2.699 días)	Castilla La Nueva (2.544 días)
Sin cultivo	14.208	13.980
Con cultivo	19.331	16.041

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 7,2 mm/día. La transpiración del cultivo fue entonces de 2 mm/día o 730 mm/año, que corresponde aproximadamente a la evapotranspiración calculada con la fórmula de Penman Monteith con la que trabaja la estación automática.

Para Castilla La Nueva, en los lisímetros sin cultivo se aplicaron 5,4 mm, y en los lisímetros con cultivo, 6,4 mm. La diferencia de consumo con el CI La Libertad radica principalmente en el tipo de suelo, con un mayor contenido de arcilla, lo cual permite un mayor almacenamiento de agua.

Calidad del agua

En este aparte se considera que las ATAEP de la industria petrolera, antes de ser usadas para el riego en sistemas agropecuarios, cumplen con todas las condiciones legales actuales que regulan esta actividad, es decir, se ajustan a la normatividad legal vigente en el país (Decreto 1594 de 1984, Decreto 3930 de 2010 y Resolución 1207 de 2014). Las actividades realizadas en cuanto al registro de la calidad de agua utilizada en los experimentos básicamente consisten en el monitoreo de algunos parámetros básicos entre 2012 y 2015:

- ***pH:*** las aguas normales (N) en algunas ocasiones están por debajo de un pH de 6, especialmente en el último año de registro. Las aguas tratadas de Ecopetrol (E) solamente en una ocasión se ubicaron por fuera del rango establecido por la norma (figura 26).

- ***Conductividad eléctrica:*** en general, la conductividad eléctrica de las aguas evaluadas está por debajo del límite permisible establecido por la Resolución 1207 de 2014 sobre reúso de aguas (1.500 µS.cm^{-1} o 1,5 dS.m^{-1}) (figura 27).

- ***Salinidad:*** los valores encontrados de salinidad para el agua normal (línea verde claro en la figura 28) muestran la ausencia total de sales; para las aguas tratadas de Ecopetrol (línea verde oscuro en la figura 28), se observan oscilaciones alrededor de 0,5 ppt (partes por mil), con un promedio durante toda la experimentación de 0,48 ppt que la colocan en el rango de agua dulce. Los puntos fluctuantes superiores se dieron ocasionalmente, y en esos momentos el agua queda clasificada en el límite inferior del tipo agua salobre oligohalina (0,5 a 3,0 ppt).

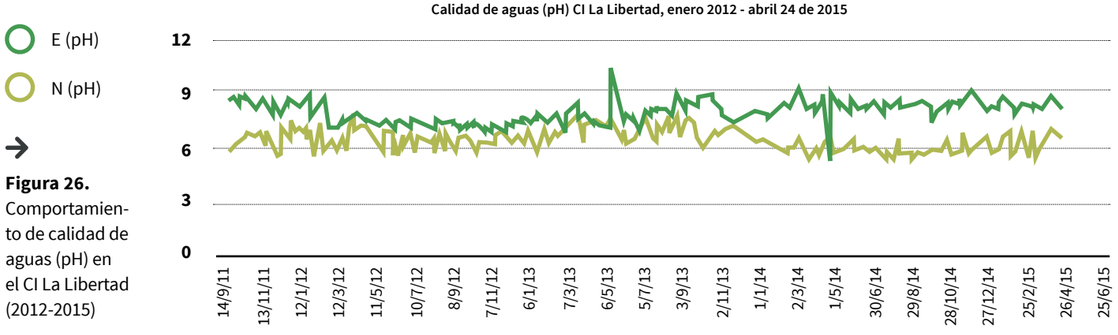


Figura 26. Comportamiento de calidad de aguas (pH) en el CI La Libertad (2012-2015)

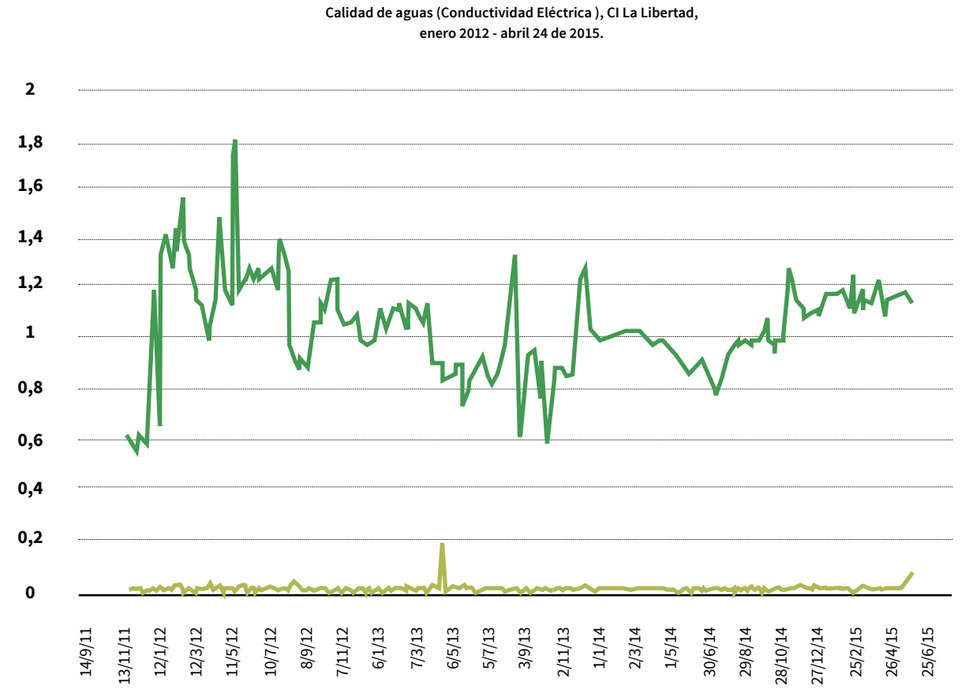


Figura 27. Comportamiento de calidad de aguas (CE dS.m^{-1}) en el CI La Libertad (2012-2015)

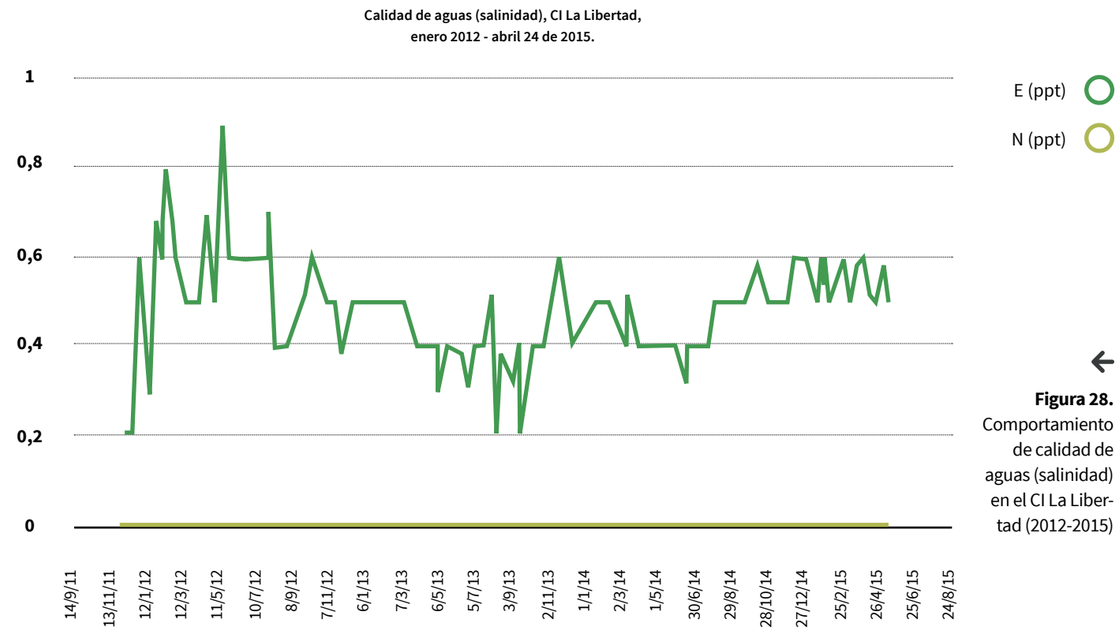


Figura 28. Comportamiento de calidad de aguas (salinidad) en el CI La Libertad (2012-2015)

02

Efecto del uso de las aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo en el suelo, el agua y las especies vegetales de interés económico en condiciones de campo

Édgar Fernando Almansa Manrique
Julián Andrés Peláez Montoya
Ricardo Botero Quintero
Milady Ruiz Nieves
Gloria Estefanía Pastrana Aguirre

En este capítulo se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas durante cuatro años y siete meses relacionadas con el desarrollo y la adaptabilidad de diferentes especies vegetales establecidas en el Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA) del municipio de Acacías (Meta) sometidas a un manejo de agricultura bajo riego (superficial) con ATAEP. El agua para el riego provino del STAP del bloque de explotación petrolera Cubarral-Castilla.

Los siguientes resultados del monitoreo por especie en cuanto a parámetros de desarrollo muestran la variabilidad temporal de la altura total, el diámetro a la atura del pecho y una valoración aproximada por hectárea del volumen de madera, la biomasa acumulada y la captura de carbono. Asimismo, y con el objetivo de contextualizar las condiciones en las cuales se adelantó la presente investigación, por cada especie se presentan las características químicas, físicas y microbiológicas de suelo, así como la cantidad de agua aplicada por año y el manejo agronómico realizado. Por último, se presentan las características climáticas de la zona.

Materiales y métodos

A continuación se enumeran las especies vegetales evaluadas, el diseño experimental implementado en las diferentes áreas de monitoreo y las metodologías usadas en la estimación de algunos parámetros.

Ubicación

El ASA se encuentra localizada en la cuenca del río Orotoy, en la vereda La Unión del municipio de Acacías, en el departamento del Meta. Sus coordenadas geograficas son 04º 35’ 56,57” latitud norte y 74º 04’ 51,30” latitud oeste (figura 29). Esta área se ubica en un paisaje de piedemonte, sobre terrazas medias con predominio de suelos clase VI según el IGAC, de buen drenaje, poca compactación, alta presencia de elementos como hierro y aluminio y poca presencia de bases (pobre fertilidad).
El clima característico de la zona es cálido húmedo, con régimen de lluvia monomodal, 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 ºC, y la evapotranspiración se ubica alrededor de los 3,5-4,0 mm/día.

Figura 29. Ubicación geográfica del ASA



Especies evaluadas

Las especies vegetales establecidas se seleccionaron con base en dos criterios: por un lado, el potencial en la generación de bioenergía y, por otro lado, la adaptabilidad al ecosistema de la zona. De este modo se eligieron nueve especies vegetales: seis con potencial de producción de biomasa, una industrial (látex) y dos con potencial en la producción de biocombustibles (tabla 30).

Tabla 30. Especies vegetales evaluadas

Nombre común	Nombre científico	Ciclo vegetativo
Acacia (biomasa)	*Acacia mangium*	Perenne
Melina (biomasa)	*Gmelina arborea*	Perenne
Caucho (industrial)	*Hevea brasiliensis*	Perenne
Pino (biomasa)	*Pinus caribeae*	Perenne
Eucalipto (biomasa)	*Eucalyptus pellita*	Perenne
Eucalipto (biomasa)	*Eucalyptus urograndis*	Perenne
Palma africana (biocombustible)	*Elaeis guineensis*	Perenne
Yopo (biomasa)	*Anadenathera peregrina*	Perenne
Piñón de purga (biocombustible)	*Jatropha curcas*	Perenne

Las especies relacionadas en la tabla 30 se establecieron bajo diferentes tipos de diseño experimental con el fin de conocer el comportamiento y desarrollo agronómico de cada una. Sin embargo, en la presente publicación solo se reportará lo relacionado con cinco de las especies con potencial de producción de biomasa (acacia, melina, pino, eucalipto *pellita* y yopo) y la de uso industrial (caucho).

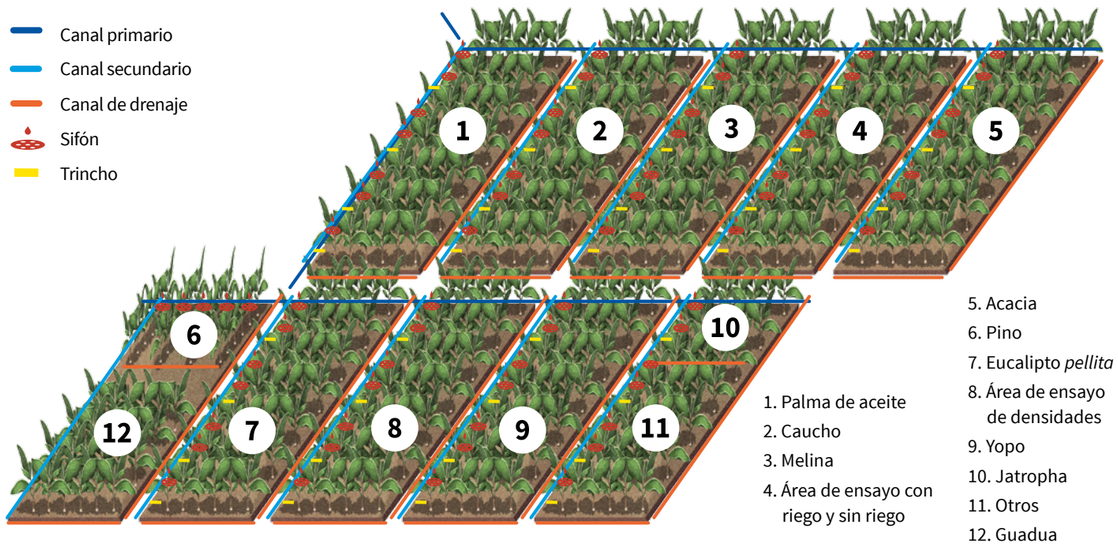
Sistema de riego

Para el riego implementado en el ASA se aplicó el método de gravedad a través de un sistema de superficie por melgas rectangulares, en el cual se aprovechó la pendiente del terreno para distribuir el agua en la mayor área posible dentro de la zona experimental. El caudal de diseño fue de 129 litros por segundo, durante las 24 horas del día, los siete días de la semana (cumpliendo con la normatividad exigida por la autoridad ambiental).

Los componentes del sistema de riego son los siguientes (figura 30):

- Dos módulos o bloques de riego: uno en el que se establecieron las parcelas de palma de aceite, caucho, melina y acacia, y otro con las de pino, eucalipto *pellita*, eucalipto urograndis, yopo y Jatropha.
- Un canal de riego principal para cada módulo de riego, que conducía el agua a través de todo el módulo.
- Canales de riego secundario, los cuales distribuían el agua a cada parcela para su posterior aplicación.
- Dos zanjas de drenaje por parcela (encargadas de evacuar los excesos de agua).
- Trinchos: estructuras conformadas por paredes de cemento y tablas de plástico que se ubicaron sobre cada canal de riego secundario en función de las curvas de nivel. El objetivo de estos trinchos era dar la altura necesaria al agua para que esta ingresara por los sifones, los cuales tenían a su vez la función de direccionar el líquido dentro de las melgas ubicadas a lo largo de la línea de árboles.

Figura 30. Plano del sistema de riego por gravedad implementado en el ASA y disposición de trinchos sobre canal de riego secundario



Variables y frecuencia de monitoreo de las especies forestales

Se contemplaron dos componentes de evaluación con interés agronómico para todas las áreas de monitoreo: el componente suelo y el componente forestal. El primero incluyó el muestreo y análisis de características químicas, físicas, microbiológicas y ambientales para cada bloque o repetición según fuera el caso. El segundo contempló el monitoreo directo a través del tiempo de las variables altura total del árbol y diámetro a la altura del pecho. Con base en esta información se estimaron indirectamente las variables volumen de madera, biomasa y carbono por hectárea para cada especie (figura 31).

La frecuencia de monitoreo se estableció de conformidad con la dinámica de la variable que se fuera a medir. Así, las variables pertenecientes al 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 poca presencia de lluvias. Las variables pertenecientes al componente forestal se evaluaron inicialmente de manera mensual durante el primer año de desarrollo y, posterior a esta etapa, se realizó una medición cada seis meses hasta la finalización del tiempo de evaluación.

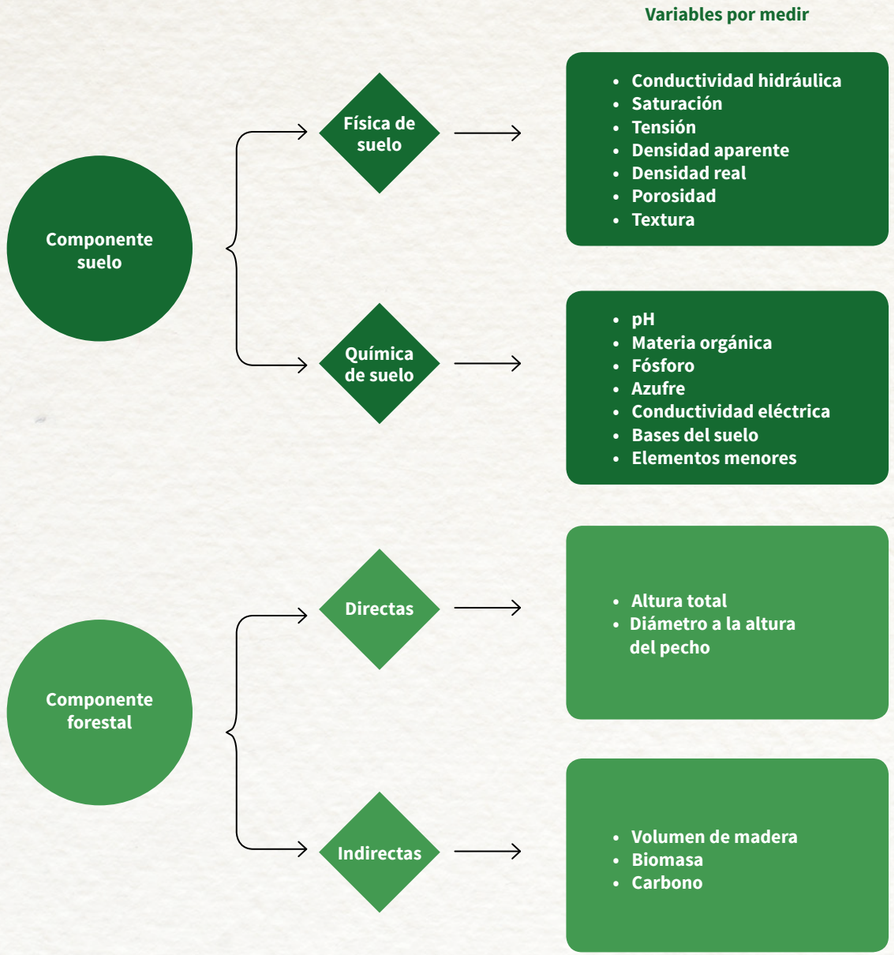


Figura 31. Variables monitoreadas a través del tiempo en la evaluación

Área de seguimiento

Esta área fue conformada por siete unidades experimentales, de las cuales cinco tuvieron un área aproximada de 10.000 m^2 y dos tuvieron un área aproximada de 2.500 m^2. La distribución en campo de estas unidades se realizó sobre los dos bloques de riego detallados anteriormente: uno con palma africana, caucho, melina y acacia, cada una en una parcela grande, y otro con eucalipto y yopo, cada una en una parcela grande, y pino y piñón de purga, cada una en una parcela pequeña.

El diseño experimental considerado fue el de parcelas divididas en el tiempo, tomando como factor principal el aporte de riego y como factor secundario el comportamiento de los componentes individualmente durante cada periodo de evaluación.

Internamente, las unidades experimentales se dividieron en tres y dos repeticiones según fuesen parcelas grandes o parcelas pequeñas respectivamente. En cada repetición se ubicaron dos zonas de muestreo, cada una con un área de 300 m^2, para un área total de muestreo por especie de 1.800 m^2 en parcelas grandes y de 1.200 m^2 en parcelas pequeñas.

La característica principal del área de seguimiento fue la implementación de riego frecuente durante el tiempo en que duró la evaluación.

Metodologías de medición

Monitoreo de altura total y diámetro a la altura del pecho del árbol

La altura total de cada árbol ubicado dentro de la zona de muestreo en cada parcela se tomó utilizando una pértiga o hipsómetro vertex laser. Posteriormente, con el total de las mediciones registradas se estimó la altura total promedio de cada especie forestal correspondiente a cada fecha de monitoreo. Asimismo, se midieron los diámetros con cinta diamétrica, ubicándose a los 1,30 m de altura en el caso de árboles que superaran los 2 m, mientras que en árboles más pequeños se estableció la medición a la mitad de la altura total del árbol.
Debido a que en las primeras etapas de desarrollo los cambios en los parámetros de altura y diámetro son significativos, inicialmente las mediciones se realizaron con frecuencia mensual hasta la terminación de la época juvenil (un año). Superada esta etapa, se continuó la medición una vez cada seis meses.

Estimación del volumen de madera de árboles en pie, biomasa y carbono aéreo por hectárea

Para determinar el volumen de madera de los árboles en pie por hectárea para cada especie forestal se utilizaron ecuaciones alométricas, las cuales relacionaron la altura total de árbol, el diámetro a la altura del pecho y el factor de forma de la copa (tabla 31).

Por otra parte, para establecer la biomasa y la captura de carbono aéreo por especie se relacionó el volumen de madera previamente estimado con el factor de expansión de la madera (extraído de fuentes bibliográficas) y la densidad básica de la madera (extraído de tablas elaboradas por el IPCC). La metodología utilizada para la estimación de los tres parámetros fue la indicada por la FAO (1981).

Tabla 31. Valores de factor de forma de copa, factor de expansión de la madera y densidad básica de la madera utilizados para la estimación de volumen, biomasa y carbono por especie

Especie	Factor de forma	Factor de expansión de biomasa	Densidad básica
Acacia	0,5	1,70	0,69
Melina	0,5	1,52	0,62
Caucho	0,5	1,60	0,52
Pino	0,5	1,46	0,51
Eucalipto	0,5	2,33	0,67
Yopo	0,5	1,70	0,72

Resultados y discusión

Acacia

Nombre científico: *Acacia mangium (wild).*
Familia: *Mimosaceae.*
Ciclo vegetativo: *perenne.*
Origen: Australia, Papúa Nueva Guinea e Indonesia.
Usos: múltiple. Puede emplearse de cerca viva y como madera para postes, sombra, forraje, carbón y leña. También tiene aplicaciones en ebanistería, para puertas y ventanas.
Fecha de siembra: 24 de septiembre de 2010.
Fecha de última evaluación: 9 de marzo de 2015.
Ciclo de desarrollo: 1.723 días después de siembra.
Cobertura asociada: Brachiaria humidicola.

Agua suministrada

La cantidad total de agua aportada fue de 5.840 mm. El mayor aporte de agua de riego se realizó para el año 2014, con un total de 2.800 mm (tabla 32).

Tabla 32. Riego suministrado a plantas de acacia

Cantidad de agua aportada	2013	2014	2015	Total
Kc	0,75-0,70	0,70-0,65	0,65-0,60	
m^3	16.784,6	26.386,4	5.387,6	48.558,6
mm	2.343	2.800	696,9	5.839,9



Los valores del coeficiente de cultivo para riego (Kc) de esta especie fueron disminuyendo en el tiempo (de 0,75 a 0,60), lo que indica una menor demanda de agua por la especie. Sin embargo, para el año 2013 la cantidad de agua aportada fue menor que para el año 2014 como resultado de diferentes épocas con poca disponibilidad del recurso.

Química de suelos

En la tabla 33 se presenta el comportamiento de la química de suelos en el área en donde se estableció la parcela de acacia.

Tabla 33. Química de suelos inicial y final de la parcela de acacia

Fecha	pH	MO%	P	S	AL+H	Sat. Al%
			$mg.kg^{-1}$		cmol.kg	
2010	4,3	5,3	5,8	6,0	2,1	56,4
2015	6,1	3,5	4,5	4,5	0,0	0,0

Fecha	Al	Ca	Mg	K	NA	CICE
	$cmol.kg^{-1}$					
2010	1,5	0,3	0,1	0,1	0,1	2,7
2015	0,0	2,7	0,5	0,2	0,2	3,5

Fecha	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B
	ds.m	$mg.kg^{-1}$				
2010	0,2	114,0	0,8	5,9	0,5	0,1
2015	0,2	97,1	1,3	11,7	0,6	0,1

Fuente: Laboratorio Nacional de Suelos Agrosavia

El pH aumentó de 4,3 a 6,1, disminuyendo la concentración del aluminio (Al) en el suelo de 1,2 a 0,0 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$. De igual forma, la concentración de hierro (Fe) disminuyó de 114,0 a 97,1 $mg.kg^{-1}$. Estas disminuciones facilitaron una mayor disponibilidad de fósforo (P) y otros elementos para las plantas.
La dinámica de la capacidad de intercambio catónico efectivo (CICE) en el suelo aumentó de 2,7 a 3,5 $cmol^{(+)}.kg^{-1}$ como resultado del incremento en la concentración de elementos como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na).
Por otro lado, elementos como cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn) aumentaron su concentración, si bien se encontraron en el nivel crítico mínimo.
Por último, actualmente elementos como fósforo (P) y azufre (S) se encuentran en menor concentración en el suelo, al igual que el contenido de materia orgánica (MO).

Física de suelos

Tabla 34. Física de suelo inicial y final de la parcela de acacia

Fecha	%	Tensión (bares)					DA	DR	Poros	Textura			
	Saturación	0,1	0,3	1,5	3,0	15,0	g.cm^{-3}	g.cm^{-3}	Total (%)	Arena	Limo	Arcilla	Clase
2010	35,9	30,9	25,1	24,5	23,5	20,7	1,4	2,6	47,2	62,2	22,0	15,8	FA
2015	31,6	24,8	23,8	23,6	23,2	22,8	1,5	2,6	43,4	61,5	17,2	21,3	FArA

Fuente: Laboratorio Física de Suelos CI La Libertad Agrosavia.

En la tabla 34 se presentan los resultados de los análisis físicos de suelos. La lámina de agua aprovechable por las plantas en los primeros 20 cm de profundidad del suelo inicialmente fue de 28,5 mm, y la densidad aparente tuvo un ligero incremento de 1,4 a 1,5 g.cm^{-3}, asociado a la disminución de la materia orgánica en el suelo. Por otra parte, la disminución de la porosidad total del suelo de 47,2% a 43,4% no evidencia fenómeno de compactación en el suelo.

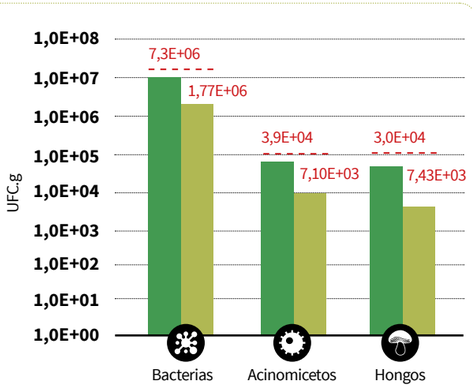
La clase textural del suelo indica una alta permeabilidad y una retención de humedad que puede variar entre mediana y baja.

Microbiología

Tabla 35. Conteo de microorganismos en acacia (ASA)

2012
2014

Fecha	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
2012	7,3E+06	3,9E+0,4	3,0E+0,4
2014	1,77E+06	7,10E+0,3	3,43E+03



Fuente: Laboratorio Control de Calidad de Inoculantes Agrosavia

Los resultados de los análisis microbiológicos de suelos se presentan en la tabla 35. El conteo realizado inicialmente en la parcela de investigación mostró que todas las poblaciones de microorganismos evaluados se encontraban cerca a sus niveles óptimos de unidades formadoras de colonia en el suelo, lo que indica una buena dinámica poblacional.

Para el conteo final, los niveles poblacionales de cada grupo de microorganismos disminuyeron, alejándose de su nivel óptimo, como respuesta a cambios en las condiciones físicas y químicas del suelo. La población de bacterias se redujo 5,53E + 06 UFC.g^{-1} de suelo, la población de actinomicetos, 3,14E + 04 UFC.g^{-1}, y la población de hongos, 2,66E + 04 UFC.g^{-1}.

Fitometría

Volumen de madera

El volumen de madera por hectárea para la especie de *Acacia mangium* (tabla 36) se incrementó en el tiempo, relacionándose con el incremento en altura y diámetro de los árboles. Actualmente, el volumen total de madera por hectárea para esta especie se estima en 198,2 m^3.ha^{-1}. El mayor incremento de volumen de madera por hectárea se presentó entre el tercer año de evaluación y el cuarto (73,41 m^3.ha^{-1}).

Año	Volumen madera (m^3.ha^{-1}) Total (m^3.ha^{-1})	Incremento (m^3.ha^{-1})
1	7,31	7,31
2	40,56	33,26
3	99,14	58,58
4	167,75	68,60
4,5	198,24	30,49

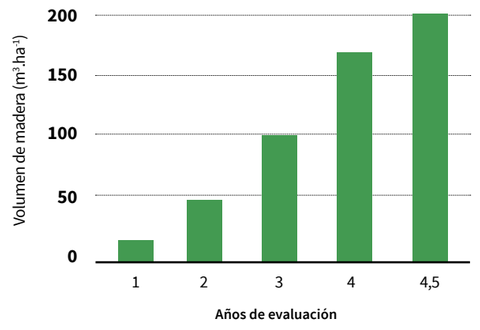


Tabla 36. Volumen de madera de árboles en pie de acacia bajo condiciones del ASA (2015)

Biomasa y carbono

Durante los años evaluados, la especie de *Acacia mangium* alcanzó en promedio 239,2 t.ha de biomasa, lo cual equivale a 119,6 t.ha^{-1} de carbono y ubica a esta como la segunda especie con mayor contenido de biomasa por área. El mayor incremento de biomasa y carbono por hectárea se registró entre el tercer año y el cuarto (tabla 37).

Año	Biomasa (t.ha) Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})	Carbono (t.ha) Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})
1	8,70	8,70	4,35	4,35
2	49,15	40,45	24,58	20,22
3	121,00	71,85	60,50	35,92
4	203,44	82,44	101,72	41,22
4,5	239,18	35,74	119,59	17,87

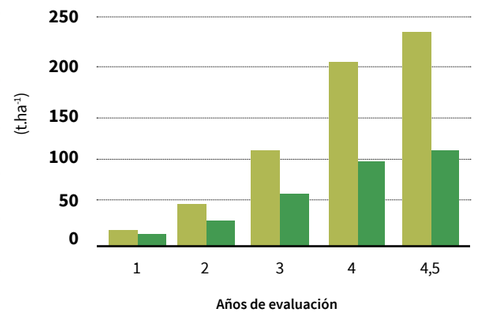


Tabla 37. Biomasa y carbono aéreo en acacia bajo condiciones del ASA (2015)

Melina

Nombre científico: *Gmelina arborea* (Roxb).
Familia: Verbenaceae.
Ciclo vegetativo: perenne.
Origen: India, Tailandia, Camboya, Sumatra e Indonesia.

Uso: múltiple. Puede emplearse de cerca viva y como maderable para construcción, melífera, forraje, leña y pulpa de papel.
Fecha de siembra: 25 de septiembre de 2010.
Fecha de última evaluación: 9 de marzo de 2015.
Ciclo de desarrollo: 1.722 días después de siembra.
Cobertura asociada: *Brachiaria humidicola*.

Agua suministada

La cantidad total de agua aportada es de 4.105,3 mm. El mayor aporte de agua de riego se realizó para el año 2014, con un total de 1.899 mm (tabla 38).

Los valores de Kc para esta especie fueron ido disminuyendo en el tiempo (de 0,73 a 0,64), lo que indica una menor demanda de agua por la especie. La cantidad de agua aportada para la especie durante el 2013 y el 2014 fue similar.

Tabla 38. Riego suministrado a plantas de melina

Cantidad de agua aportada	2013	2014	2015	Total
Kc	0,73-0,71	0,71-0,66	0,66-0,64	
m^3	13.778,6	16.588	2.656,7	33.023,3
mm	1.896	1.899	310,3	4.105,3



Química de suelos

Tabla 39. Química de suelos inicial y final de la parcela de melina

Fecha	pH	MO%	P	S	AL+H	Sat. Al%
			mg.kg^{-1}		cmol.kg	
2010	4,4	5,1	5,1	3,0	1,7	56,0
2015	5,7	3,0	2,3	6,3	0,2	6,2
Fecha	Al	Ca	Mg	K	NA	CICE
	cmol.kg^{-1}					
2010	1,4	0,5	0,1	0,1	0,0	2,5
2015	0,2	1,5	0,3	0,1	0,3	2,4
Fecha	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B
	ds.m	mg.kg^{-1}				
2010	0,1	85,0	1,1	10,4	0,5	0,1
2015	0,2	77,0	1,6	10,8	0,3	0,0

Fuente: Laboratorio Nacional de Suelos Agrosavia

En la tabla 39 se presenta el comportamiento de la química de suelos en el área en donde se estableció la parcela de melina. El pH aumentó de 4,4 a 5,7, disminuyendo la concentración del aluminio en el suelo de 1,4 a 0,2 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}. De igual forma, la concentración de hierro disminuyó de 85,0 a 77,0 mg.kg^{-1}. Estas disminuciones facilitaron una mayor disponibilidad de fósforo y otros elementos para las plantas.

La dinámica de la CICE en el suelo disminuyó de 2,5 a 2,4 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} como resultado de la alta precipitación del aluminio.

Por otro lado, elementos como cobre y manganeso aumentaron su concentración, si bien se encontraron en el nivel crítico mínimo. Asimismo, elementos como zinc y boro disminuyeron su concentración. Actualmente, elementos como fósforo y azufre se encuentran en menor concentración en el suelo, al igual que el contenido de MO, lo cual puede estar relacionado con una mayor actividad microbiana y el desarrollo del cultivo.

Física de suelos

Tabla 40. Física de suelo inicial y final de la parcela de melina

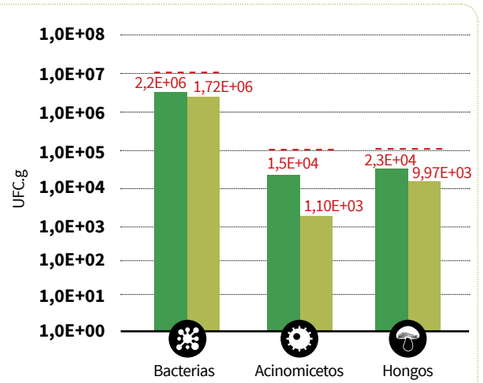
Fecha	%	Tensión (bares)				
	Saturación	0,1	0,3	1,5	3,0	15,0
2010	34,0	31,5	27,6	26,8	25,9	23,7
2015	35,8	25,7	24,5	24,0	23,1	22,5
Fecha	DA	DR	Poros	Textura			
	g.cm^3	g.cm^3	Total	Arena	Limo	Arcilla	Clase
2010	1,4	2,6	47,0	68,2	16,0	15,8	FArA
2015	1,4	2,6	45,9	59,5	19,2	21,3	FArA

Fuente: Laboratorio Física de Suelos CI La Libertad Agrosavia

Los resultados de los análisis físicos de suelos se presentan en la tabla 40. La lámina de agua aprovechable por las plantas en los primeros 20 cm de profundidad del suelo fue inicialmente de 21,6 mm, y la densidad aparente no muestra incremento. Por otra parte, la disminución de la porosidad total del suelo de 47,0% a 45,9% no indica fenómeno de compactación en el suelo.

Microbiología

Fecha	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
2012	2,2E+06	1,5E+0,4	2,3E+0,4
2014	1,72E+06	1,10E+0,3	9,97E+03



Efecto del uso de las aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo en el suelo, el agua y las especies vegetales de interés económico en condiciones de campo

2012

2014

Tabla 41. Conteo de microorganismos en melina (ASA)

Fuente: Laboratorio Control de Calidad de Inoculantes Agrosavia

Los resultados de los análisis microbiológicos de suelos se presentan en la tabla 41. El conteo realizado inicialmente en la parcela de investigación mostró que todas las poblaciones de microorganismos evaluados se encontraban cerca a sus niveles óptimos de unidades formadoras de colonia en el suelo.

Para el conteo final, los niveles poblacionales de actinomicetos disminuyeron 1,40E+04 UFC.g^{-1} respecto a su valor inicial, alejándose de su nivel óptimo. Sin embargo, las poblaciones de bacterias y hongos, aunque mostraron disminución, en estos casos no fueron significativas. Cabe recordar al respecto que la dinámica poblacional de los microorganismos está íntimamente relacionada a cambios en las condiciones físicas y químicas del suelo. Así, la población de bacterias se redujo 4,8E+05 UFC.g^{-1} de suelo, y la población de hongos 1,30E+04 UFC.g^{-1}.

Fitometría

Volumen de madera

El volumen de madera por hectárea para la especie de *Gmelina arborea* incrementó en el tiempo, relacionándose con el aumento en altura y diámetro de los árboles. Actualmente, el volumen total de madera por hectárea para esta especie se estima en 212,2 m^3.ha^{-1}, siendo la especie que registra el mayor cubicaje de madera por área.

El mayor incremento de volumen de madera por hectárea se presentó entre el segundo año de evaluación y el tercero (70,17 m^3.ha^{-1}) (tabla 42).

Volumen madera (m^3.ha)		
Año	Total (m^3.ha^{-1})	Incremento (m^3.ha^{-1})
1	14,67	14,67
2	72,19	57,51
3	142,35	70,17
4	195,02	52,67
4,5	212,20	17,18

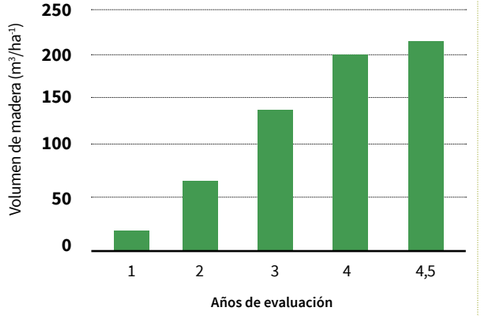


Tabla 42. Volumen de madera de árboles en pie de melina bajo condiciones del ASA (2015)

Biomasa y carbono

Durante los años evaluados, la especie de *Gmelina arborea* alcanzó en promedio 199,3 t/ha^{-1} de biomasa, lo cual equivale a 99,6 t.ha^{-1} de carbono (tabla 43). El mayor incremento de biomasa y carbono por hectárea se registró entre el segundo año y el tercero, guardando relación con el incremento en volumen de madera.

Año	Biomasa (t.ha^{-1})		Carbono (t.ha^{-1})	
	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})
1	8,33	8,33	4,17	4,17
2	60,29	51,95	30,14	25,98
3	133,87	73,58	66,93	36,79
4	184,65	50,79	92,33	25,39
4,5	199,28	14,62	99,64	7,31

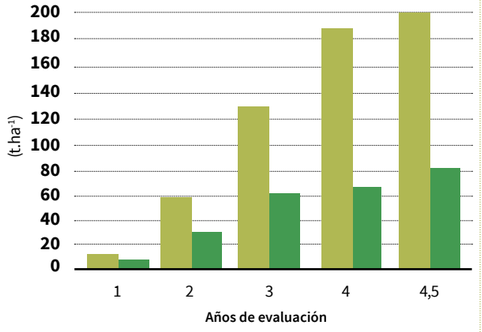


Tabla 43. Biomasa y carbono aéreo en melina bajo condiciones del ASA (2015)

Caucho

Nombre científico: *Hevea brasiliensis* (Muell).
Familia: Euphorbiaceae.
Ciclo vegetativo: perenne.
Origen: cuenca hidrográfica del río Amazonas.
Uso: múltiple. Puede emplearse de cerca viva o en carpintería general, como madera laminada encolada y en producción de látex, tableros de fibras y tableros de partículas.
Fecha de siembra: 25 de septiembre de 2010.
Fecha de última evaluación: 9 de marzo de 2015.
Ciclo de desarrollo: 1.722 días después de siembra.
Cobertura asociada: *Arachis pintoi* (maní forrajero).



Agua suministrada

La cantidad total de agua aportada fue de 2.512 mm, y el mayor aporte de agua de riego se realizó para el año 2014, con un total de 1.199 mm (tabla 44). La cantidad de agua aportada para la especie durante el 2013 fue menor a la de 2014 debido a una menor disponibilidad del recurso.

Los valores de Kc para esta especie fueron disminuyendo en el tiempo (de 0,68 a 0,51), lo que indica una menor demanda de agua por la especie, que es, de hecho, la de menor consumo de agua entre el eslabón forestal.

Cantidad de agua aportada	2013	2014	2015	Total
Kc	0,68-0,75	0,75-0,62	0,62-0,51	
m^3	8.262,3	10.483,6	2.269,5	21.015,4
mm	1.019	1.199	294	2.512

Tabla 44. Riego suministrado a plantas de caucho

Química de suelos

Tabla 45. Química de suelos inicial y final de la parcela de caucho

Fecha	pH	MO%	P	S	Al+H	Sat Al%	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B
			mg.kg^{-1}		cmol.kg^{-1}		cmol.kg^{-1}						dS.m^{-1}	mg.kg^{-1}				
2010	4,7	3,9	4,2	25,0	0,7	30,9	0,6	1,0	0,1	0,1	0,0	1,9	0,3	196,0	1,0	31,6	0,5	0,1
2015	6,1	2,7	6,3	4,7	0,0	0,0	0,0	1,8	0,4	0,1	0,4	2,6	0,2	92,7	2,1	10,1	0,8	0,1

Fuente: Laboratorio Nacional de Suelos Agrosavia

En la tabla 45 se presenta el comportamiento de la química de suelos en el área en donde se estableció la parcela de caucho. El pH aumentó de 4,4 a 6,1, disminuyendo la concentración del aluminio en el suelo de 0,6 a 0,0 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}. De igual forma, la concentración de hierro disminuyó de 196,0 a 92,7 mg.kg^{-1}. Estas disminuciones facilitaron una mayor disponibilidad de fósforo y otros elementos para las plantas.

La dinámica de la CICE en el suelo aumentó de 1,9 a 2,6 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} como resultado del incremento de elementos como el calcio, el magnesio y el sodio. Por otro lado, elementos como cobre y zinc aumentaron su concentración, si bien se encontraron en el nivel crítico mínimo.

Por último, actualmente elementos como fósforo y azufre se encuentran en menor concentración en el suelo, al igual que el contenido de MO. Esto puede estar relacionado con una mayor actividad microbiana o de consumo por la especie dominante y la cobertura establecida en el área.

Física de suelos

Tabla 46. Física de suelo inicial y final de la parcela de caucho

Fecha	%	Tensión (bares)					DA	DR	Poros	Textura			
	Saturación	0,1	0,3	1,5	3,0	15,0	g.cm^{-3}	g.cm^{-3}	Total (%)	Arena	Limo	Arcilla	Clase
2010	31,3	29,1	25,6	25,2	24,4	22,5	1,4	2,6	45,6	52,2	32,0	15,8	FA
2015	33,5	26,0	24,6	24,2	23,4	22,8	1,5	2,7	44,0	64,2	15,9	20,0	FA

Fuente: Laboratorio Física de Suelos CI La Libertad Agrosavia

Los resultados de los análisis físicos de suelos se presentan en la tabla 46. La lámina de agua aprovechable por las plantas en los primeros 20 cm de profundidad del suelo fue de 19,0 mm, y la densidad aparente muestra un leve incremento de 1,4 a 1,5 g.cm^{-3}. A su vez, la disminución de la porosidad total del suelo de 45,6% a 44% no indica fenómeno de compactación notorio en el suelo. Finalmente, la clase textural del suelo se asocia a una alta permeabilidad y a una baja retención de humedad.

2012
2014

Microbiología

Fecha	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
2012	2,4E+06	2,6E+0,4	2,5E+0,4
2014	9,03E+05	1,47E+0,4	6,47E+03

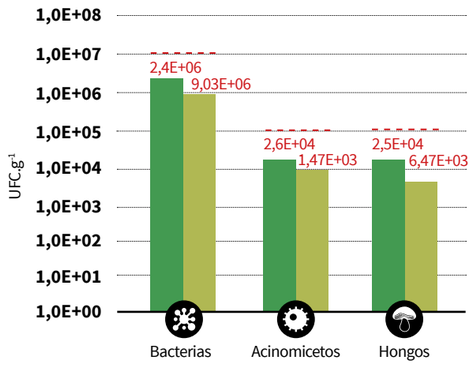


Tabla 47. Conteo de microorganismos en caucho (ASA)

Fuente: Laboratorio Control de Calidad de Inoculantes Agrosavia

Los resultados de los análisis microbiológicos de suelos se presentan en la tabla 47. El conteo realizado inicialmente en la parcela de investigación mostró que todas las poblaciones de microorganismos evaluados se encontraban cerca a sus niveles óptimos de unidades formadoras de colonia en el suelo, sobresaliendo la población de bacterias y hongos.

Para el conteo final, los niveles poblacionales de hongos disminuyeron 1,80E+04 UFC.g^{-1} respecto a su valor inicial, alejándose de su nivel óptimo. Esta dinámica fue similar en las poblaciones de bacterias (disminuyendo 1,54E+06 UFC.g^{-1}). Además, la población de actinomicetos, aunque mostró disminución (1,08E+04), no fue significativa respecto a los otros grupos evaluados.

Fitometría

Volumen de madera

El volumen de madera por hectárea para la especie de *Hevea brasiliensis* incrementó en el tiempo, relacionándose con el aumento en altura y diámetro de los árboles. Actualmente, el volumen total de madera por hectárea para esta especie se estima en 35,32 m^3.ha^{-1}.

Es de resaltar que a partir del tercer año el incremento en volumen de madera fue mayor. Sin embargo, el aumento de volumen de madera por hectárea más significativo se presentó entre el tercer año de evaluación y el cuarto (16,93 m^3.ha^{-1}).

Año	Volumen madera (m^3.ha^{-1}) Total (m^3.ha^{-1})	Incremento (m^3.ha^{-1})
1	0,21	0,21
2	1,92	1,71
3	11,00	9,08
4	27,92	16,93
4,5	35,32	7,39

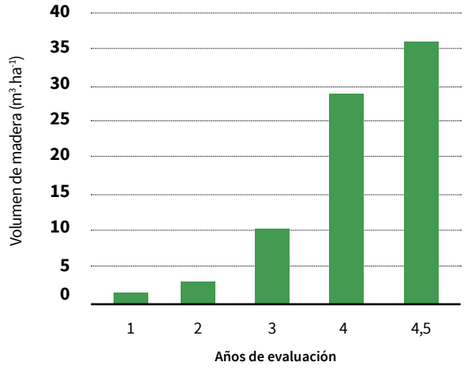
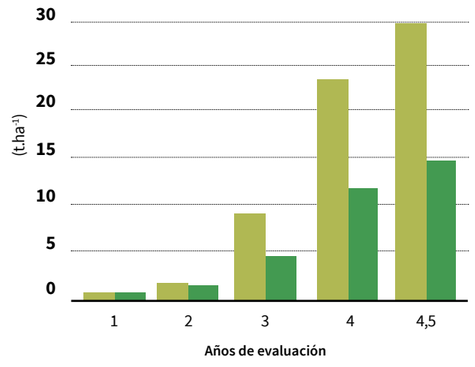


Tabla 48. Volumen de madera árboles en pie de caucho bajo condiciones del ASA (2015)

Biomasa y carbono

Durante los años evaluados, la especie de *Hevea brasiliensis* alcanzó en promedio 29,3 t.ha^{-1} de biomasa, lo cual equivale a 14,6 t.ha^{-1} de carbono. El mayor incremento de biomasa y carbono por hectárea se registró entre el tercer año y el cuarto, relacionándose con el mayor incremento en volumen de madera por área (tabla 49).

Año	Biomasa (t.ha) Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})	Carbono (t.ha) Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})
1	0,40	0,40	0,20	0,20
2	2,06	1,66	1,03	0,83
3	8,94	6,88	4,47	3,44
4	23,42	14,48	11,71	7,24
4,5	29,33	5,90	14,66	2,95



Efecto del uso de las aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo en el suelo, el agua y las especies vegetales de interés económico en condiciones de campo

Biomasa
Carbono

Tabla 49. Biomasa y carbono aéreo en caucho bajo condiciones del ASA (2015)

Eucalipto *pellita*

Nombre científico: *Eucalyptus pellita*.
Familia: Myrtaceae.
Ciclo vegetativo: perenne.
Origen: Australia.
Uso: múltiple. Puede emplearse como rompevientos, en postes para cerca y como madera para construcción, leña y pulpa de papel.
Fecha de siembra: 22 de septiembre de 2010.
Fecha de última evaluación: 9 de marzo de 2015.
Ciclo de desarrollo: 1.725 días después de siembra.
Cobertura asociada: *Brachiaria humidicola*.

Agua suministrada

La cantidad total de agua aportada fue de 6.372,3 mm. El mayor aporte de agua de riego se realizó para el año 2014, con un total de 3.278 mm, y la cantidad de agua aportada para la especie durante el 2013 fue menor debido épocas de poca disponibilidad del recurso (tabla 50).

Los valores de Kc para esta especie fueron disminuyendo en el tiempo (de 0,75 a 0,65), lo que indica una menor demanda de agua por la especie, que es la segunda de mayor consumo de agua entre el eslabón forestal.

Cantidad de agua aportada	2013	2014	2015	Total
Kc	0,75-0,72	0,72-0,67	0,67-0,65	
m^3	18.058,8	31.792,5	4.875,7	54.727
mm	2.555	3.278	539,3	6.372,3



Tabla 50. Riego suministrado a plantas de eucalipto *pellita*

Química de suelos

Tabla 51. Química de suelos inicial y final de la parcela de eucalipto *pellita*

Fecha	pH	MO%	P	S	Al+H	Sat	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B
			mg.kg^{-1}		cmol.kg^{-1}	Al%	cmol.kg^{-1}						dS.m^{-1}	mg.kg^{-1}				
2010	4,5	3,6	3,8	5,0	1,2	45,9	0,9	0,5	0,2	0,1	0,1	2,0	0,1	90,0	0,7	8,4	0,4	0,1
2015	5,8	2,5	3,8	5,1	0,0	0,0	0,0	1,6	0,3	0,1	0,3	2,3	0,2	67,0	1,6	9,7	1,3	0,0

Fuente: Laboratorio Nacional de Suelos Agrosavia

En la tabla 51, se presenta el comportamiento de la química de suelos en el área en donde se estableció la parcela de eucalipto *pellita*. El pH aumentó de 4,5 a 5,8, disminuyendo la concentración del aluminio en el suelo de 0,9 a 0,0 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}. De igual forma, la concentración de hierro disminuyó de 90,0 a 67,0 mg.kg^{-1}. Estas disminuciones facilitaron una mayor disponibilidad de fósforo y otros elementos para las plantas.

La dinámica de la CICE en el suelo aumentó de 2,0 a 2,3 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} como resultado del incremento de elementos como el calcio, magnesio y sodio. Por otro lado, elementos como cobre, manganeso y zinc aumentaron su concentración, si bien se encontraron en el nivel crítico mínimo. La concentración de boro, por otra parte, disminuyó, lo que generó una deficiencia marcada del elemento en el suelo.

La concentración actual de elementos como fósforo y azufre no registra variación, aunque el contenido de MO ha disminuido.

Física de suelos

Tabla 52. Física de suelo inicial y final de la parcela de eucalipto *pellita*

Fecha	%	Tensión (bares)				DA	DR	Poros	Textura			
	Saturación	0,1	0,3	1,5	3,0	15,0	g.cm^{-3}	g.cm^{-3}	Total (%)	Arena	Limo	Arcilla	Clase
2010	23,0	20,4	18,6	17,3	16,6	15,1	1,6	2,7	38,8	69,0	19,2	11,8	FA
2015	33,6	25,2	24,4	23,8	22,3	21,3	1,5	2,7	44,9	58,8	19,9	21,3	F Ar A

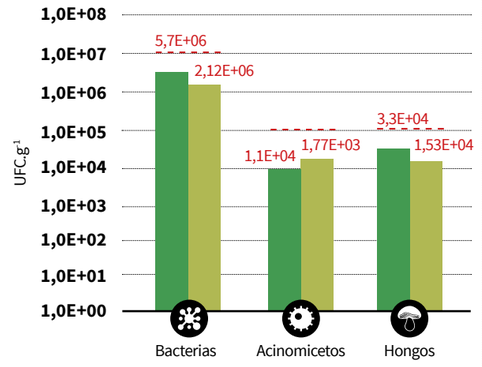
Fuente: Laboratorio Física de Suelos CI La Libertad Agrosavia

Los resultados de los análisis físicos de suelos se presentan en la tabla 52. La lámina de agua aprovechable por las plantas en los primeros 20 cm de profundidad del suelo fue inicialmente de 17,4 mm, y la densidad aparente disminuyó de 1,6 a 1,5 g.cm^{-3}. La porosidad total del suelo, por otro lado, incrementó de 38,8% a 44,9%, lo que indica que no existió compactación en el suelo que limitara el desarrollo radicular de la especie.

La clase textural del suelo se asocia a una permeabilidad de moderada a alta y a una retención de humedad de media a baja.

Microbiología

Fecha	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
2012	5,7E+06	1,1E+0,4	3,3E+0,4
2014	2,12E+06	1,77E+0,4	1,53E+04



Efecto del uso de las aguas tratadas asociadas a la extracción de petróleo en el suelo, el agua y las especies vegetales de interés económico en condiciones de campo

2012
2014

Tabla 53. Conteo de microorganismos en eucalipto *pellita* (ASA)

Fuente: Laboratorio Control de Calidad de Inoculantes Agrosavia

Los resultados de los análisis microbiológicos de suelos se presentan en la tabla 53. El conteo realizado inicialmente en la parcela de investigación mostró que todas las poblaciones de microorganismos evaluados se encontraban cerca a sus niveles óptimos de unidades formadoras de colonia en el suelo, sobresaliendo la población de bacterias y hongos.

Para el conteo final, el nivel poblacional de actinomicetos aumentó 7,12E+03 UFC.g^{-1} respecto a su valor inicial, acercándose a su nivel óptimo. Sin embargo, la dinámica en las poblaciones de bacterias y hongos fue distinta ya que disminuyeron 3,53E+06 UFC.g^{-1} y 1,77E+04 respectivamente.

Fitometría

Volumen de madera

El volumen de madera por hectárea para la especie de *Eucalyptus pellita* incrementó en el tiempo, relacionándose con el aumento en altura y diámetro de los árboles (tabla 54). Actualmente, el volumen total de madera por hectárea para esta especie se estima en 182,8 m^3.ha^{-1}.

El mayor incremento de volumen de madera por hectárea se presentó entre el tercer año de evaluación y el cuarto (67,15 m^3.ha^{-1}).

Año	Volumen madera (m^3.ha^{-1})	
	Total (m^3.ha^{-1})	Incremento (m^3.ha^{-1})
1	4,27	4,27
2	31,05	26,79
3	86,28	55,23
4	153,44	67,15
4,5	182,85	29,42

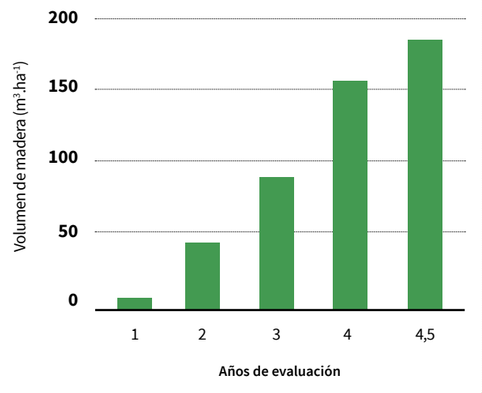


Tabla 54. Volumen de madera árboles en pie de eucalipto *pellita* bajo condiciones del ASA (2015)

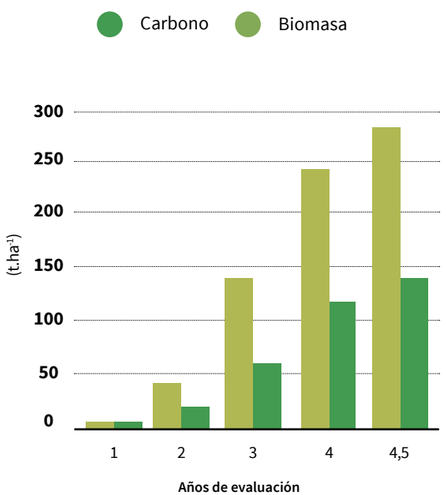
Biomasa y carbono

Durante los años evaluados, la especie de *Eucalyptus pellita* alcanzó en promedio 284,5 t.ha^{-1} de biomasa, lo cual equivale a 142,3 t.ha^{-1} de carbono. Esta es la especie que presenta mayor cantidad de biomasa por área.

El mayor incremento de biomasa y carbono por hectárea se registró entre el tercer año y el cuarto, relacionándose con la época de mayor aumento en volumen (tabla 55).

Tabla 55. Biomasa y carbono aéreo en eucalipto *pellita* bajo condiciones del ASA (2015)

	Biomasa (t.ha^{-1})		Carbono (t.ha^{-1})	
Año	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})
1	4,98	4,98	2,49	2,49
2	44,41	39,43	22,20	19,71
3	134,06	89,65	67,03	44,83
4	240,77	106,71	120,38	53,35
4,5	284,51	43,74	142,26	21,87



Yopo

Nombre científico: *Anadenathera peregrina*.
Familia: Mimosaceae.
Ciclo vegetativo: perenne.
Origen: Caribe y América del Sur.
Uso: múltiple. Puede emplearse como rompevientos, en postes para cerca y como madera para construcción, leña, vigas, plataformas y pisos.
Fecha de siembra: 23 de septiembre de 2010.
Fecha de última evaluación: 9 de marzo de 2015.
Ciclo de desarrollo: 1.724 días después de siembra.
Cobertura asociada: *Brachiaria humidicola*.

Agua suministrada

La cantidad total de agua aportada fue de 9.425,3 mm, y el mayor aporte de agua de riego se realizó para el año 2014, con un total de 5.407 mm. La cantidad de agua aportada para la especie durante el 2013 fue menor debido épocas de poca disponibilidad del recurso (tabla 56).

Los valores de Kc para esta especie fueron aumentando en el tiempo (de 0,75 a 0,83), lo que indica una mayor demanda de agua por la especie, que es la que registra el mayor consumo de agua del componente forestal.

Tabla 56. Riego suministrado a plantas de yopo

Cantidad de agua aportada	2013	2014	2015	Total
Kc	0,75-0,79	0,79-0,82	0,82-0,83	
m^3	17.875,8	35.147,8	5.682,5	58.706,1
mm	3.091	5.407	927,3	9.425,3



Química de suelos

Tabla 57. Química de suelos inicial y final de la parcela de yopo

Fecha	pH	MO%	P	S	Al+H	Sat	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B
			mg.kg^{-1}		cmol.kg^{-1}	Al%	cmol.kg^{-1}						dS.m^{-1}	mg.kg^{-1}				
2010	4,4	5,6	4,6	3,0	1,7	58,8	1,4	0,4	0,1	0,1	0,0	2,4	0,1	94,0	1,2	13,2	0,9	0,1
2015	5,4	2,7	2,6	7,8	0,4	10,9	0,3	1,5	0,3	0,1	0,3	2,5	0,2	151,7	1,6	13,3	0,4	0,1

Fuente: Laboratorio Nacional de Suelos Agrosavia

En la tabla 57 se presenta el comportamiento de la química de suelos en el área en donde se estableció la parcela de yopo. El pH aumentó de 4,4 a 5,4, disminuyendo la concentración del aluminio en el suelo de 1,4 a 0,3 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}, mientras que la dinámica de la CICE en el suelo aumentó de 2,4 a 2,5 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} como resultado del incremento de elementos como el calcio, el magnesio y el sodio. Asimismo, se registró un incremento en la concentración de hierro de 94,0 a 151,7 mg.kg^{-1}, el cual puede insolubilizar elementos como el fósforo y el azufre.
Por otro lado, elementos como cobre y manganeso aumentaron su concentración, si bien se encontraron en el nivel crítico mínimo. La concentración de zinc, en cambio, disminuyó, generándose una deficiencia del elemento en el suelo.

Finalmente, la concentración actual de fósforo disminuyó, al igual que la de la MO, y el azufre incrementó su concentración de 3,0 a 7,8 mg.kg^{-1}.

Física de suelos

Tabla 58. Física de suelo inicial y final de la parcela de yopo

Fecha	%	Tensión (bares)				
	Saturación	0,1	0,3	1,5	3,0	15,0
2010	26,0	23,3	20,4	19,3	18,6	16,7
2015	34,2	27,7	27,0	26,4	25,3	24,5

Fecha	DA	DR	Poros	Textura			
	g.cm^{-3}	g.cm^{-3}	Total	Arena	Limo	Arcilla	Clase
2010	1,6	2,7	40,9	65,0	17,2	17,8	FA
2015	1,4	2,7	47,6	56,1	19,2	24,7	FArA

Fuente: Laboratorio Física de Suelos CI La Libertad Agrosavia

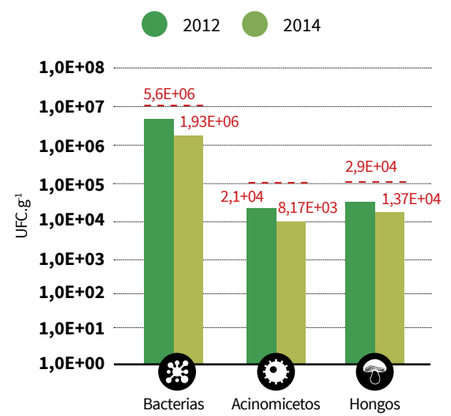
Los resultados de los análisis físicos de suelos se presentan en la tabla 58. La lámina de agua aprovechable por las plantas en los primeros 20 cm de profundidad del suelo fue inicialmente de 20,6 mm, y la densidad aparente disminuyó de 1,6 a 1,4 g.cm^{-3}, mientras que la porosidad total del suelo incrementó de 40,9% a 47,6%, lo que sugiere que no existía compactación en el suelo que limitara el desarrollo radicular.

La clase textural del suelo se asocia a una permeabilidad de moderada a alta y a una retención de humedad de media a baja.

Microbiología

Tabla 59. Conteo de microorganismos en yopo (ASA)

Fecha	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
2012	5,6E+06	2,1E+0,4	2,9E+0,4
2014	1,93E+06	8,17E+0,3	1,37E+04



Fuente: Laboratorio Control de Calidad de Inoculantes Agrosavia

Los resultados de los análisis microbiológicos de suelos se presentan en la tabla 59. El conteo realizado inicialmente en la parcela de investigación mostró que todas las poblaciones de microorganismos evaluados se encontraban cerca a sus niveles óptimos de unidades formadoras de colonia en el suelo, sobresaliendo la población de bacterias y hongos.

Para el conteo final, los niveles poblacionales de bacterias disminuyeron 3,67E+06 UFC.g^{-1} respecto a su valor inicial, alejándose de su nivel óptimo. Esta dinámica fue similar en la población de hongos (disminuyendo 1,53E+04 UFC.g^{-1}). Asimismo, si bien la población de actinomicetos mostró disminución (1,28E+04), esta no fue significativa respecto a los otros grupos evaluados.

Fitometría

Volumen de madera

El volumen de madera por hectárea para la especie de *Anadenathera peregrina* incrementó en el tiempo, relacionándose con el aumento en altura y diámetro de los árboles. Actualmente, el volumen total de madera por hectárea para esta especie se estima en 69,56 m^3.ha.

El mayor incremento de volumen de madera por hectárea se presentó entre el segundo año de evaluación y el tercero (22,3 m^3.ha^{-1}).

	Volumen madera (m^3.ha^{-1})	
Año	Total (m^3.ha^{-1})	Incremento (m^3.ha^{-1})
1	5,63	5,63
2	23,40	17,77
3	45,67	22,27
4	64,37	18,70
4,5	69,56	5,19

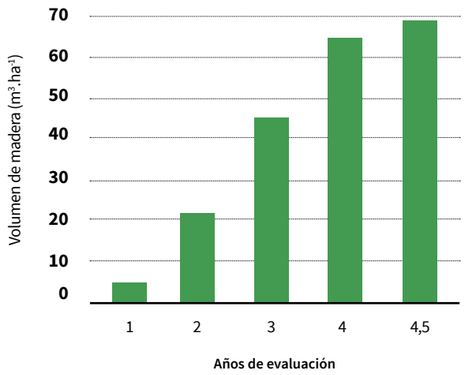


Tabla 60. Volumen de madera árboles en pie de yopo bajo condiciones del ASA (2015)

Biomasa y carbono

Durante los años evaluados la especie de *Anadenanthera peregrina* alcanzó en promedio 85,32 t.ha^{-1} de biomasa, lo cual equivale a 42,7 t.ha^{-1} de carbono. El mayor incremento de biomasa y carbono por hectárea se registró entre el segundo año y el tercero (tabla 61).

	Biomasa (t.ha^{-1})		Carbono (t.ha^{-1})	
Año	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})
1	7,71	7,71	3,85	3,85
2	29,24	21,53	14,62	10,77
3	55,88	26,64	27,94	13,32
4	78,62	22,74	39,31	11,37
4,5	85,32	6,70	42,66	3,35

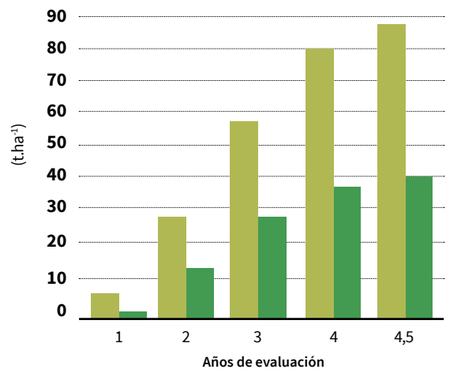


Tabla 61. Biomasa y carbono aéreo en yopo bajo condiciones del ASA (2015)

Pino

Nombre científico: *Pinus caribaea* var. *caribaea*.
Familia: Pinaceae.
Ciclo vegetativo: perenne.
Origen: Centro América, Cuba.
Uso: múltiple. Puede emplearse como rompevientos, en postes para cerca y como madera para construcción, leña, tableros de fibras y tableros de partículas, así como para curtir cuero y estabilización de suelos degradados.
Fecha de siembra: 19 de noviembre de 2010.
Fecha de última evaluación: 9 de marzo de 2015.
Ciclo de desarrollo: 1.667 días después de siembra.
Cobertura asociada: *Brachiaria humidicola*.

Agua suministrada

La cantidad total de agua aportada fue de 5.995,2 mm, y el mayor aporte de agua de riego se realizó para el año 2014, con un total de 2.669 mm. La cantidad de agua aportada para la especie durante el 2013 fue similar a la aportada para 2014 (tabla 62).

El valor de Kc para esta especie fue en promedio, en el tiempo de evaluación, 0,6, lo que indica una menor demanda de agua por la especie en comparación con las otras especies forestales evaluadas.

Cantidad de agua aportada	2013	2014	2015	Total
Kc	0,61-0,68	0,68-0,59	0,59-0,51	
m^3	6.611,2	6.804,8	1.747,3	15.163,3
mm	2.641	2.669	685,2	5.995,2

Tabla 62. Riego suministrado a plantas de pino

Química de suelos

Fecha	pH	MO%	P	S	Al+H	Sat	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B
			mg.kg^{-1}		cmol . kg^{-1}	Al%	cmol.kg^{-1}						dS.m^{-1}	mg.kg^{-1}				
2010	4,4	3,6	3,6	5,0	1,3	45,5	0,9	0,4	0,2	0,1	0,0	2,0	0,2	91,0	0,1	8,2	0,2	0,1
2015	6,0	2,9	9,8	4,7	0,0	0,0	0,0	1,7	0,4	0,1	0,3	2,5	0,2	102,1	1,3	12,1	0,4	0,0

Fuente: Laboratorio Nacional de Suelos Agrosavia

Tabla 63. Química de suelos inicial y final de la parcela de pino

En la tabla 63 se presenta el comportamiento de la química de suelos en el área en donde se estableció la parcela de pino.

El pH aumentó de 4,4 a 6,0, disminuyendo la concentración del aluminio en el suelo de 0,9 a 0,0 cmol$^{(+)}$.kg^{-1}, mientras que la dinámica de la CICE en el suelo aumentó de 2,0 a 2,5 cmol$^{(+)}$.kg^{-1} como resultado del incremento de elementos como el calcio, el magnesio y el sodio.

Asimismo, se registró un incremento en la concentración de hierro de 91,0 a 102,1 mg.kg^{-1}, el cual puede insolubilizar elementos como el fósforo y el azufre. De igual forma, elementos como cobre, manganeso y zinc aumentaron su concentración, mientras que la de boro se redujo, generándose una deficiencia del elemento en el suelo.

La concentración actual de azufre también disminuyó, al igual que la de la MO, y la concentración de fósforo se incrementó de 3,6 a 9,8 mg.kg^{-1}.

Física de suelos

Tabla 64. Física de suelo inicial y final de la parcela de pino

Fecha	%	Tensión (bares)					DA	DR	Poros	Textura			
	Saturación	0,1	0,3	1,5	3,0	15,0	g.cm^{-3}	g.cm^{-3}	Total (%)	Arena	Limo	Arcilla	Clase
2010	31,1	29,1	26,0	25,0	24,6	22,6	1,5	2,6	43,0	64,5	18,0	17,5	FA
2015	36,9	27,0	25,2	24,9	23,9	23,3	1,4	2,7	47,8	66,2	17,9	16,0	FA

Fuente: Laboratorio Física de Suelos CI La Libertad Agrosavia

Los resultados de los análisis físicos de suelos se presentan en la tabla 64. La lámina de agua aprovechable por las plantas en los primeros 20 cm de profundidad del suelo fue inicialmente de 19,5 mm, y la densidad aparente disminuyó de 1,5 a 1,4 g.cm^{-3}, mientras que la porosidad total del suelo incrementó de 43,0% a 47,8%, lo que indica que no existió compactación en el suelo. La clase textural del suelo se asocia a una permeabilidad alta y a una retención de humedad baja.

Microbiología

El conteo realizado inicialmente en la parcela de investigación mostró que todas las poblaciones de microorganismos evaluados se encontraban cerca a sus niveles óptimos de unidades formadoras de colonia en el suelo, sobresaliendo la población de bacterias (tabla 65).

2012
2014

Fecha	Bacterias	Actinomicetos	Hongos
2012	4,7E+06	1,1E+0,4	2,3E+0,4
2014	1,46E+07	7,17E+0,3	2,17E+04

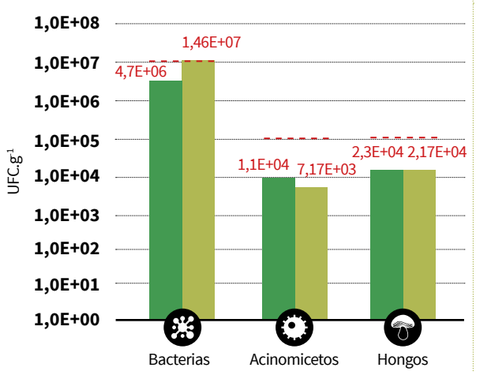


Tabla 65. Conteo de microorganismos en pino (ASA)

Fuente: Laboratorio Control de Calidad de Inoculantes Agrosavia

Para el conteo final, el nivel poblacional de bacterias aumentó 9,93E+06 UFC.g^{-1} respecto a su valor inicial, superando su nivel óptimo. La población de hongos también aumentó 1,33E+03 UFC.g^{-1}. Sin embargo, la dinámica la población de actinomicetos fue distinta, disminuyendo levemente 3,38E+03 UFC.g^{-1}.

Fitometría

Volumen de madera

El volumen de madera por hectárea para la especie de *Pinus caribaea* incrementó en el tiempo, relacionándose con el aumento en altura y diámetro de los árboles (tabla 66). Actualmente, el volumen total de madera por hectárea para esta especie se estima en 33,51 m^3.ha^{-1}.

El mayor incremento de volumen de madera por hectárea se presentó entre el tercer año de evaluación y el cuarto (17,3 m^3.ha^{-1}).

Año	Volumen madera (m^3.ha^{-1})	
	Total (m^3.ha^{-1})	Incremento (m^3.ha^{-1})
1	0,00	0,00
2	1,20	1,20
3	9,53	8,33
4	26,85	17,33
4,5	33,51	6,66

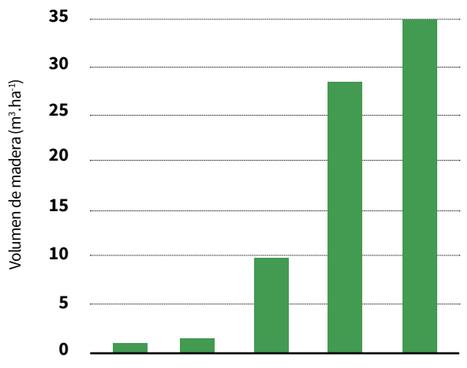


Tabla 66. Volumen de madera árboles en pie de pino bajo condiciones del ASA (2015)

Biomasa y carbono

Durante los años evaluados, la especie de *Pinus caribaea* alcanzó en promedio 24,9 t.ha^{-1} de biomasa, lo cual equivale a 12,5 t.ha^{-1} de carbono. El mayor incremento de biomasa y carbono por hectárea se registró entre el tercer año y el cuarto (tabla 67).

Año	Biomasa (t.ha^{-1})		Carbono (t.ha^{-1})	
	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})	Total (t.ha^{-1})	Incremento (t.ha^{-1})
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,92	0,92	0,46	0,46
3	7,18	6,25	3,59	3,13
4	20,01	12,83	10,00	6,42
4,5	24,91	4,90	12,46	2,45

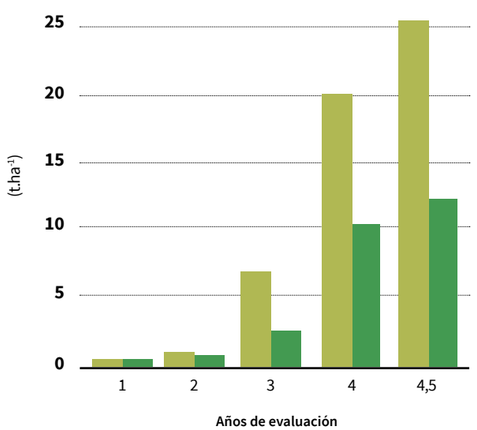


Tabla 67. Biomasa y carbono aéreo en pino bajo condiciones del ASA (2015)

Efectos de las condiciones climáticas

En el ASA se instaló una estación climática a partir del año 2012, en la cual se llevó un registro diario de las variables de interés agronómico tales como: precipitación, evapotranspiración potencial, temperatura, humedad relativa y viento.

A continuación se detallan los registros desde mayo de 2012 hasta 10 de junio de 2015 de las variables relacionadas.

Precipitación

El régimen de precipitación de la zona es monomodal, caracterizándose por presentar eventos de precipitación de alta intensidad en una época del año alternados con una época seca de lluvias mínimas (tabla 68).

La distribución de la precipitación durante los años evaluados fue variable: para el año 2012 y 2013 se registró la mayor cantidad de lluvia en el periodo comprendido desde abril hasta septiembre, mientras que en el año 2014 se registró la menor precipitación anual (1.905,5 mm) respecto a los demás años evaluados. La mayor cantidad de lluvia se concentró durante los meses de abril a junio, y la disponibilidad hídrica durante el segundo semestre (985 mm) fue levemente superior a la del primer semestre (921 mm). El primer semestre de 2015 registró una disponibilidad hídrica (1.215mm) equivalente a la registrada en el segundo semestre durante los años 2012 (1.297 mm) y 2013 (1.245 mm), cuando se presentó la mayor cantidad de lluvia.

	2012	2013	2014	2015
Enero	-	1,2	14,8	131,0
Febrero	-	80,6	38,8	39,8
Marzo	-	100,0	44,6	180,4
Abril	3,8	340,0	387,4	307,8
Mayo	212,0	366,4	119,6	262,0
Junio	115,2	218,0	315,7	294,4
Julio	347,4	243,6	160,0	-
Agosto	264,4	208,6	150,0	-
Septiembre	148,8	220,6	112,6	-
Octubre	195,6	155,0	257,6	-
Noviembre	136,4	370,2	253,2	-
Diciembre	204,6	47,4	51,2	-
Total	1.628,2	1.905,5	1.905,5	1.215,4

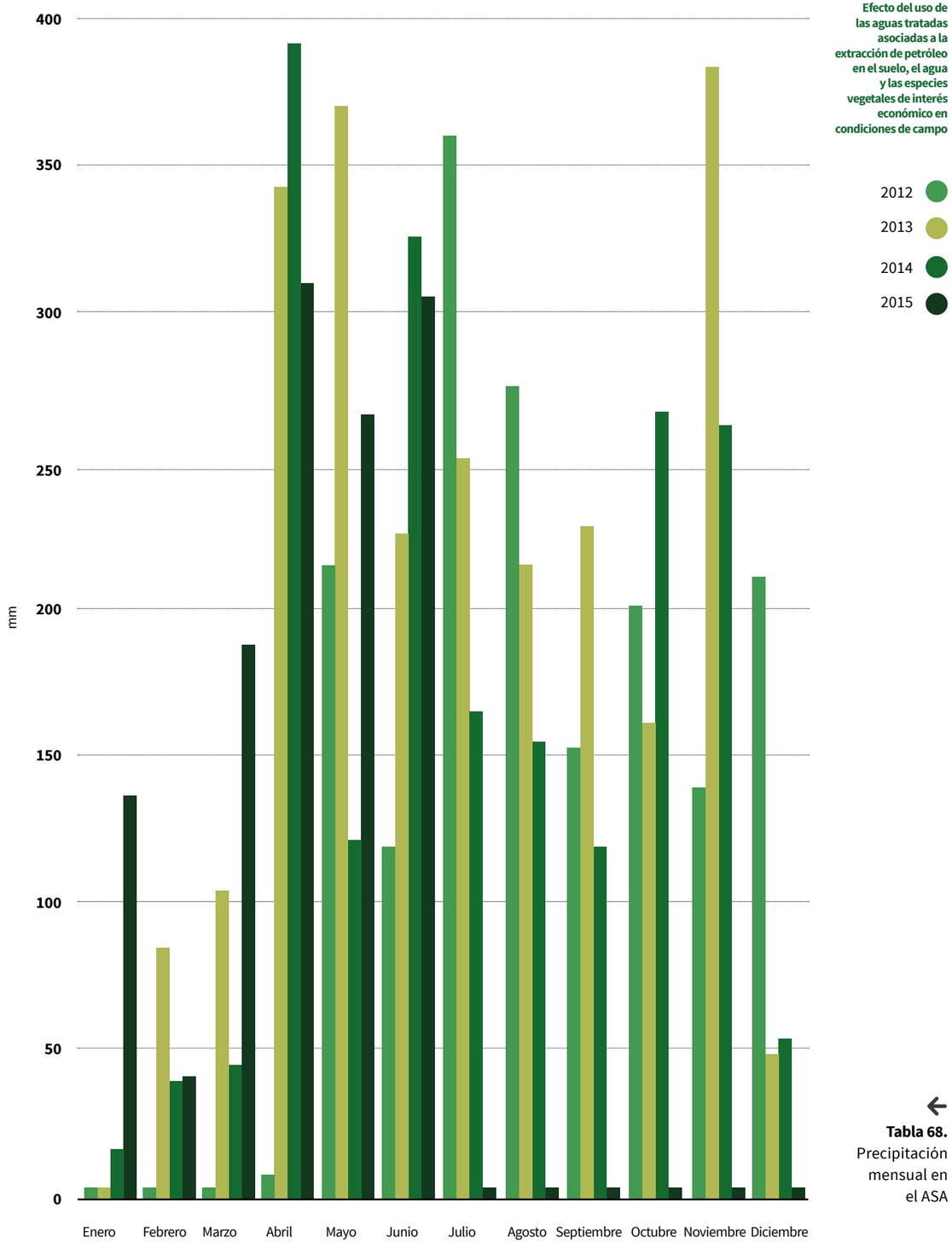


Tabla 68. Precipitación mensual en el ASA

Evapotranspiración potencial

Tal como se refleja en la tabla 69, la evapotranspiración durante los años evaluados fue variable: para los años 2012 y 2013 el mayor nivel de esta variable se registró sobre el segundo semestre; sin embargo, los meses entre julio y septiembre de 2012 y entre enero y marzo de 2013 manifestaron la mayor cantidad de agua evapotranspirada mensual.

	2012	2013	2014	2015
Enero	-	143,1	131,7	115,7
Febrero	-	113,8	145,3	97,5
Marzo	-	85,7	116,7	106,5
Abril	49,0	52,4	123,0	97,0
Mayo	102,5	22,1	122,2	95,1
Junio	96,2	74,4	99,5	36,9
Julio	86,3	96,5	105,3	-
Agosto	99,8	90,3	117,5	-
Septiembre	117,1	92,9	115,3	-
Octubre	97,5	109,2	112,4	-
Noviembre	91,6	81,6	115,0	-
Diciembre	110,7	119,9	90,6	-
Total	850,7	1.081,9	1.3945,5	548,7

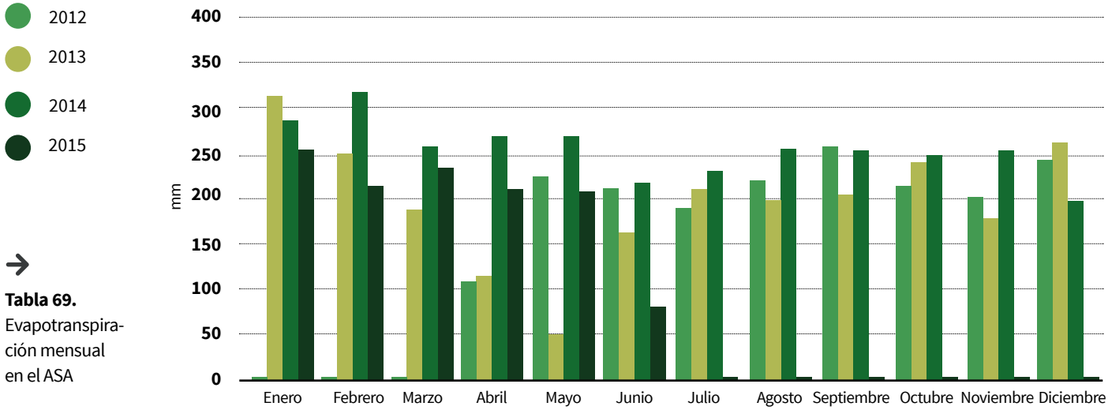


Tabla 69. Evapotranspiración mensual en el ASA

En el año 2014 se registró la mayor evapotranspiración anual (1.394,5 mm) respecto a los demás años evaluados. La mayor cantidad de agua evapotranspirada se concentró durante los meses de enero a marzo, y la cantidad de agua evapotranspirada durante el primer semestre (738 mm) fue superior a la del segundo semestre (656 mm). El primer semestre de 2015 registró una evapotranspiración (549 mm) superior a la registrada en el 2013 (492 mm) y menor a la registrada para el 2014 (738 mm) en el mismo periodo.

Temperatura

La temperatura máxima en la región osciló entre los 30,0-33,6 °C, con el valor más alto registrado en febrero del año 2014 (tabla 70).

Por otro lado, la temperatura mínima varió entre los 21,0-23,3 °C, con el valor más bajo registrado en julio del año 2012 (figura 32). Finalmente, la temperatura promedio oscilo entre los 23,8-28,4°C.

	2012			2013			2014			2015		
	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media
Enero	-	-	-	32,7	22,9	27,2	33,2	23,1	27,5	32,7	22,3	27,5
Febrero	-	-	-	32,0	22,9	26,6	33,7	23,6	27,8	33,6	23,2	28,4
Marzo	-	-	-	31,3	22,4	26,1	32,5	23,4	27,1	33,0	23,3	28,2
Abril	31,0	21,6	25,3	31,4	22,0	25,9	30,8	22,1	25,4	32,1	22,3	27,2
Mayo	29,9	21,3	24,5	29,8	21,7	25,0	31,2	22,2	25,8	31,6	22,4	27,0
Junio	29,2	20,9	24,2	30,1	21,3	24,8	29,4	21,4	24,2	29,9	21,7	25,8
Julio	28,7	20,8	23,9	29,1	20,7	24,0	29,7	21,3	24,2	-	-	-
Agosto	28,9	21,0	24,3	29,6	21,1	24,4	29,3	21,2	24,4	-	-	-
Septiembre	30,9	21,0	24,9	30,8	21,2	24,9	31,6	21,6	25,4	-	-	-
Octubre	31,0	21,5	25,6	31,8	21,6	25,7	30,5	21,8	24,9	-	-	-
Noviembre	32,0	22,2	26,2	31,4	21,7	25,4	31,9	22,2	25,8	-	-	-
Diciembre	31,9	22,5	26,4	31,8	21,9	26,0	32,7	22,5	27,3	-	-	-

Tabla 70. Temperatura mensual en el ASA

El mes de febrero del año 2014 registró los datos más altos de temperatura (máxima, mínima y promedio); el mes de agosto de 2012 registro los datos más bajos de temperatura.

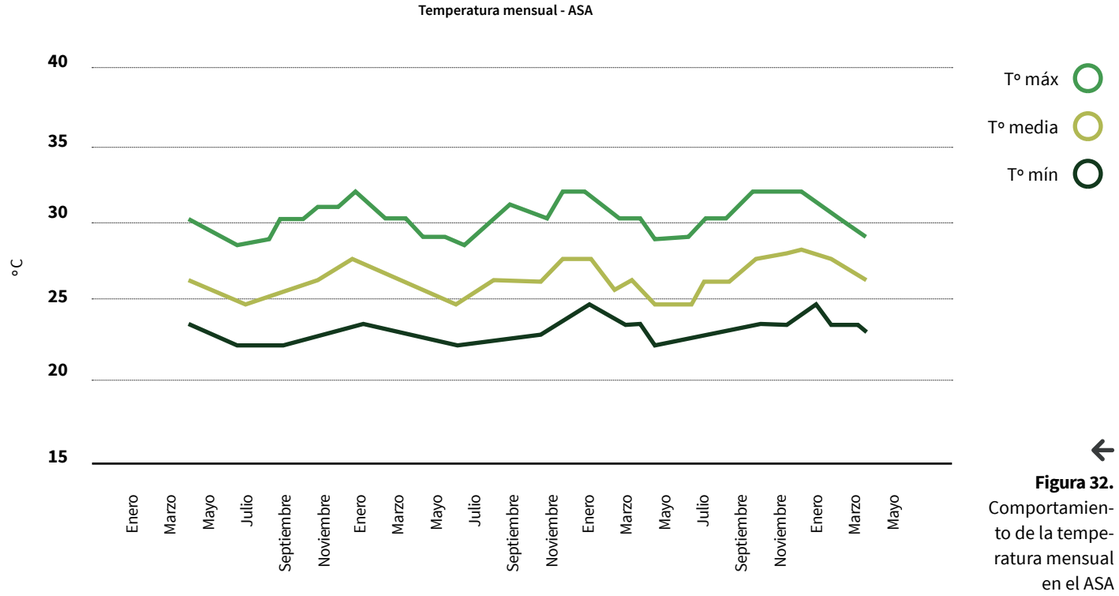


Figura 32. Comportamiento de la temperatura mensual en el ASA

Humedad relativa

La humedad relativa máxima osciló entre el 83,0-100%, y el registro más bajo de esta variable se dio en febrero del año 2014 (tabla 71).

	2012			2013			2014			2015		
	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media
Enero	-	-	-	85,8	44,8	66,0	85,9	42,4	64,9	88,5	48,5	68,5
Febrero	-	-	-	89,1	47,3	69,5	83,0	42,5	61,2	86,2	46,6	66,4
Marzo	-	-	-	97,7	58,3	81,1	89,7	47,3	70,2	87,4	49,3	68,3
Abril	99,8	59,7	85,2	98,5	57,2	79,1	99,0	58,3	83,6	94,6	56,6	75,6
Mayo	99,9	62,4	86,9	99,6	65,3	88,5	98,7	59,7	83,8	94,1	59,5	76,8
Junio	99,6	62,6	86,2	100,0	63,7	87,5	100,0	68,2	90,5	96,0	65,7	80,8
Julio	99,9	62,6	87,8	99,6	63,9	87,6	100,0	66,0	89,9	-	-	-
Agosto	97,0	58,5	84,2	100,0	63,2	88,0	99,7	62,0	86,9	-	-	-
Septiembre	99,4	54,6	82,6	99,4	60,3	85,2	99,8	56,9	85,0	-	-	-
Octubre	98,6	56,5	82,8	99,5	56,3	82,7	99,9	61,4	87,3	-	-	-
Noviembre	96,9	58,1	80,3	99,7	60,8	85,8	100,0	61,7	86,5	-	-	-
Diciembre	94,7	54,2	75,3	96,7	54,4	78,9	92,1	50,6	73,2	-	-	-

Tabla 71. Humedad relativa mensual en el ASA

La humedad relativa mínima, por otro lado, osciló entre el 42,4-68,2%, y la humedad relativa promedio varió entre el 61,2-90,4%. Durante el año 2014 se registraron los datos más bajos y más altos de humedad relativa (máxima, mínima y promedio) de los años evaluados, en los meses de febrero y junio respectivamente. Asimismo, en cada año evaluado se registró una caída de la humedad relativa entre los meses de noviembre a mayo (figura 33).

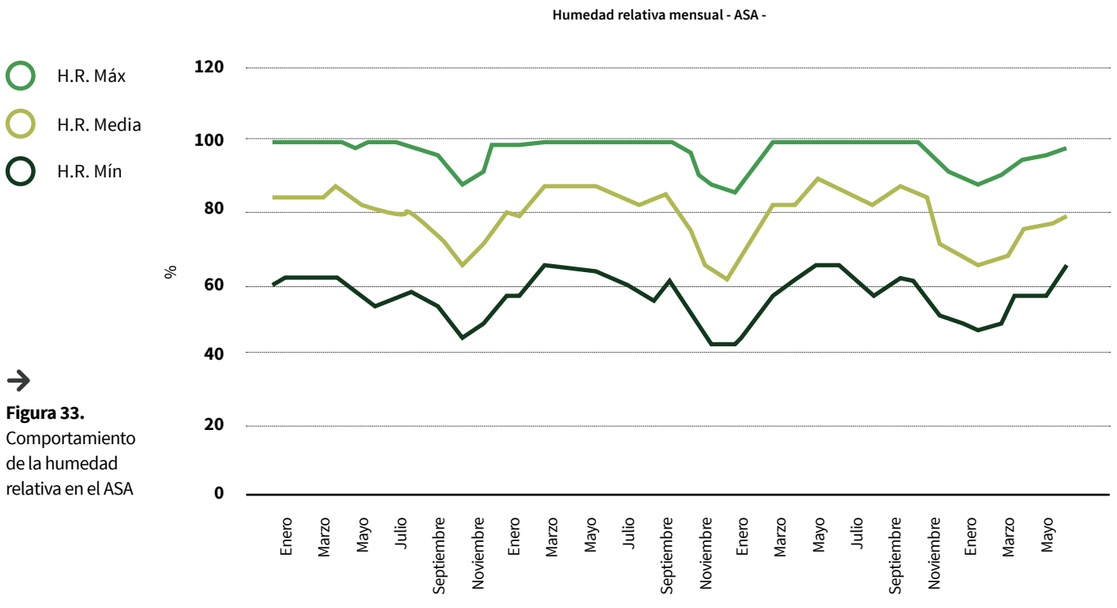


Figura 33. Comportamiento de la humedad relativa en el ASA

Vientos

La velocidad de viento en la zona osciló entre 4,3-5,4 m.s^{-1}, y se observa una disminución progresiva de este parámetro entre enero y junio de 2015 (tabla 72).

Viento	
Mes	(m.s^{-1})
Enero	5,43
Febrero	5,28
Marzo	4,87
Abril	5,12
Mayo	4,71
Junio	4,34

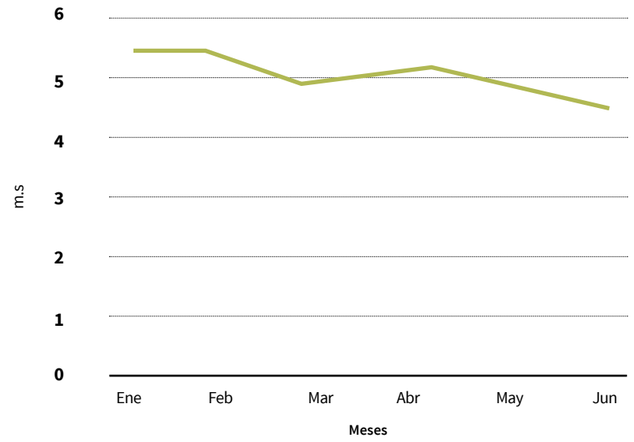


Tabla 72. Viento mensual durante el año 2015 en el ASA[1]

Monitoreo de aguas

Las ATAEP utilizadas en el ASA se han ajustado a las normas legales vigentes, y se ha encontrado que los valores de los parámetros evaluados están muy por debajo de los niveles críticos establecidos, lo cual permite catalogar estas aguas como aguas para uso doméstico y clasificarlas para su uso en riego como C2S1. Por lo tanto, esta agua es apta para irrigación de cultivos, sin restricciones en su utilización (cumple con el artículo 40 del Decreto 1594 para uso agrícola y con la Resolución 1207 de Reúso de Aguas).

Semanalmente, se realizó un monitoreo de la calidad de aguas en 22 sitios del ASA, donde se evaluaron parámetros de rápida determinación como la conductividad eléctrica, la temperatura, los sólidos totales, la resistividad eléctrica y el pH, tomando muestras puntuales. El objetivo fue identificar los efectos del riego de cultivos con ATAEP en las fuentes hídricas superficiales y subterráneas y el cumplimiento de la normatividad ambiental. Para ello el ASA dispuso de una red de siete piezómetros y 15 freatímetros para el seguimiento de la calidad del agua subterránea y de sitios de monitoreo para el control de la calidad del agua en los caños Danta y Bijao. Adicionalmente, se midieron los caudales del caño Danta.

A partir de la aplicación de la Resolución 1207 las conductividades eléctricas en los piezómetros y en el caño Danta disminuyeron debido posiblemente a la menor dotación de agua que llegó al ASA, la cual no sobrepasó los 10.000 barriles de agua por día (bapd), muy por debajo de la que se manejada anteriormente (50.000 bapd). Esto ocasionó que las fugas por percolación y escorrentía se mermaran considerablemente (figuras 34 y 35), disminuyendo la mínima alteración a las aguas freáticas y las superficiales como el caño Danta, que es la fuente de agua donde se depositan los excedentes de drenaje del ASA.

1. No se reportan datos de viento en periodos anteriores debido a la falta de registro.

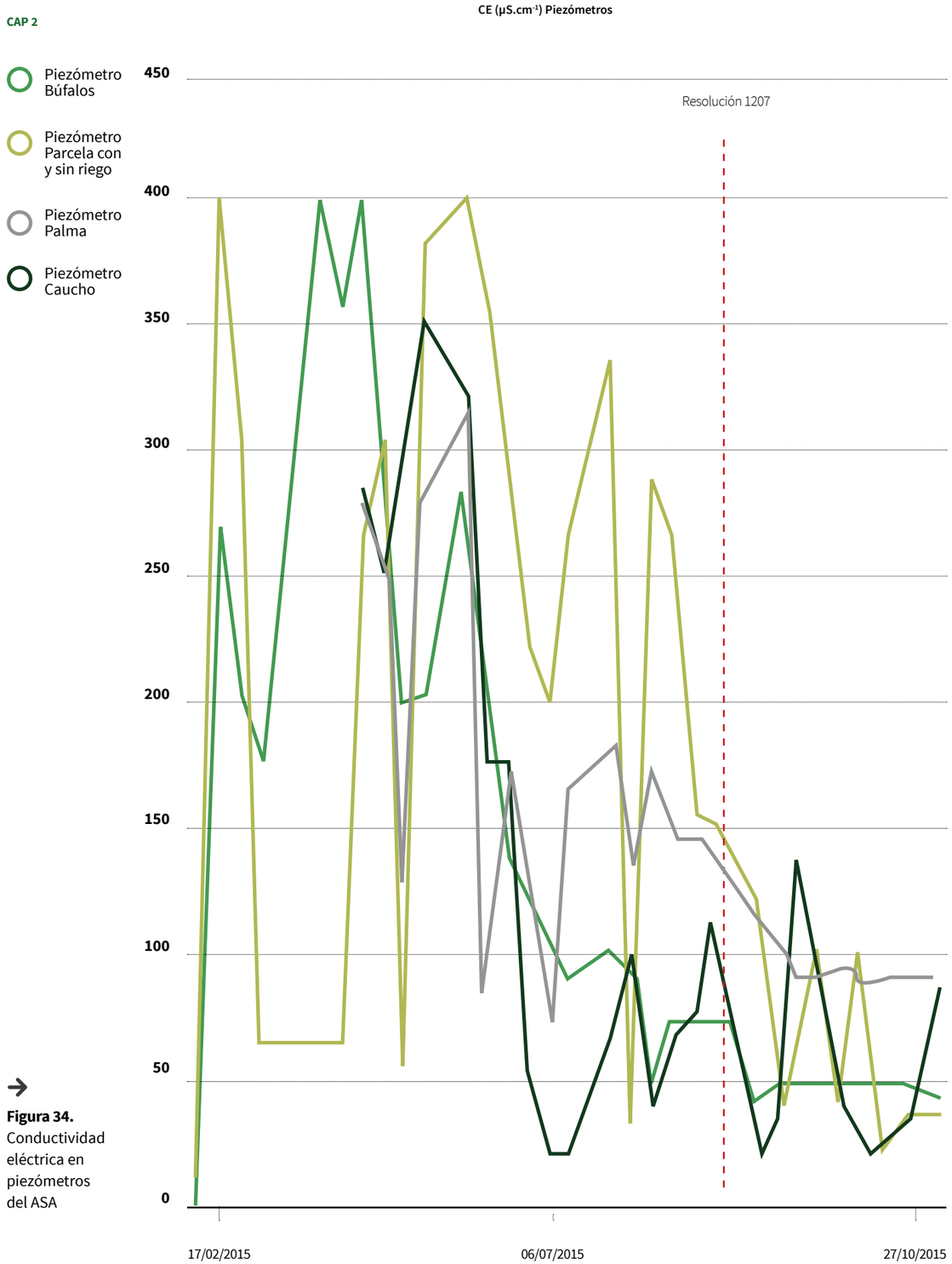


Figura 34. Conductividad eléctrica en piezómetros del ASA

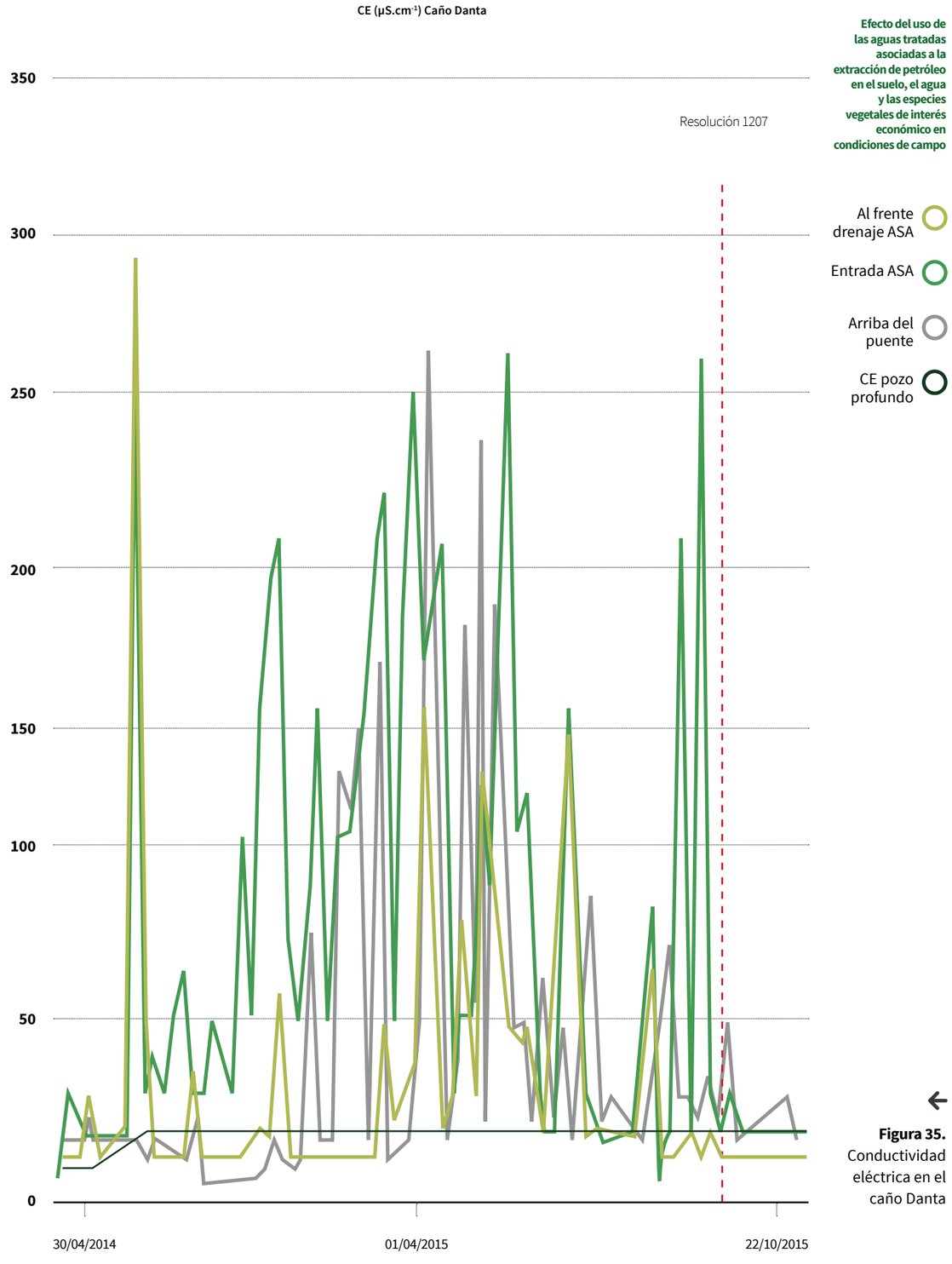


Figura 35. Conductividad eléctrica en el caño Danta



03

Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de influencia del ASA

Viviana Irene Romero Ramírez
Víctor Fabio Luna Mora
Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos

La biodiversidad y la conservación han sido temas importantes dentro del desarrollo productivo de la sociedad. En esa línea, 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.

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 un 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 que permitió identificar el estado de conservación de la zona de estudio y caracterizar a la fauna asociada a este sistema generado antrópicamente. Posterior a la adecuación del área y a la modificación del uso de suelo, se realizó un constante seguimiento de los grupos taxonómicos de estudio para determinar el impacto generado en el área sobre la composición de estos bioindicadores taxonómicos.

Con el seguimiento realizado se ha demostrado que los sistemas productivos que se han establecido en el territorio del ASA son espacios importantes para el aumento en el registro de fauna silvestre típica del piedemonte llanero. Así, las diferentes áreas generadas con la adecuación de suelos permitieron diferenciar estructuras para sitios de nidificación, alimentación, refugio, percha o descanso, entre otras, que facilitaron el flujo de fauna hacia esta pequeña área de la zona en general y dieron lugar a un aumento en la composición de aves, mamíferos, anfibios y reptiles en esta zona de influencia. En este capítulo se discutirán la metodología empleada y los resultados obtenidos en el marco de esta investigación.

Materiales y métodos

Metodología

Avifauna

El principal método utilizado para la observación de aves corresponde a los recorridos de observación o *Visual Encounter Surveys (VES)* (Foster, 2012) dentro de la zona de influencia del proyecto, en horarios previamente establecidos. Para aves, las observaciones se hicieron entre las 06:00 y las 11:00 horas y entre las 16:30 y las 18:30 horas (las especies observadas fuera de este horario se registraron dentro del muestreo, incluyendo las observadas en la noche). Los recorridos tuvieron lugar en pastizales, parcelas del sistema agroforestal y bordes de bosque de los caños Danta y Bijao de la zona que limita con el ASA. Para este grupo se manejó un mayor periodo de observación ya que se tomó como grupo indicador para estimar el cambio en la composición de especies con el cambio en el uso de suelo del ASA.

Mastofauna

Este grupo se dividió en mamíferos voladores y no voladores. Para mamíferos voladores o murciélagos, se manejaron redes de niebla, las cuales se abrieron desde las 19:00 horas hasta las 23:00, revisándolas cada hora hasta completar el horario de muestreo establecido previamente durante 10 días en dos épocas del año (húmeda y seca). Asimismo, se utilizaron 10 trampas Tomahawk para medianos mamíferos y 10 trampas Sherman para pequeños mamíferos.

Estas se dispusieron en senderos de los bosques de ribera y en parcelas forestales, y fueron cebadas y revisadas dos veces por día durante 10 días en dos épocas del año (húmeda y seca). Finalmente, el esfuerzo de muestreo se complementó realizando recorridos por senderos dentro del bosque de ribera de los caños Danta y Bijao, praderas y parcelas forestales, teniendo en cuenta madrigueras, huellas y heces como indicios de la presencia de especies en la zona.

Herpetofauna

Corresponde a los anfibios y reptiles. Para la línea base se utilizaron trampas de caída libre para colectar anfibios, pero los resultados no fueron óptimos, de tal manera que solo se utilizó la observación directa, la cual, si bien requiere un mayor esfuerzo de muestreo, demostró un mejor resultado. En la mayoría de tiempo se realizaron caminatas diurnas y nocturnas abarcando el área del ASA.

Todas las especies observadas se registraron fotográficamente, y luego se identificaron con ayuda de catálogos faunísticos, información secundaria, guías taxonómicas y, en algunos casos específicos, mediante consultas a especialistas de los grupos taxonómicos observados.

Resultados y discusión

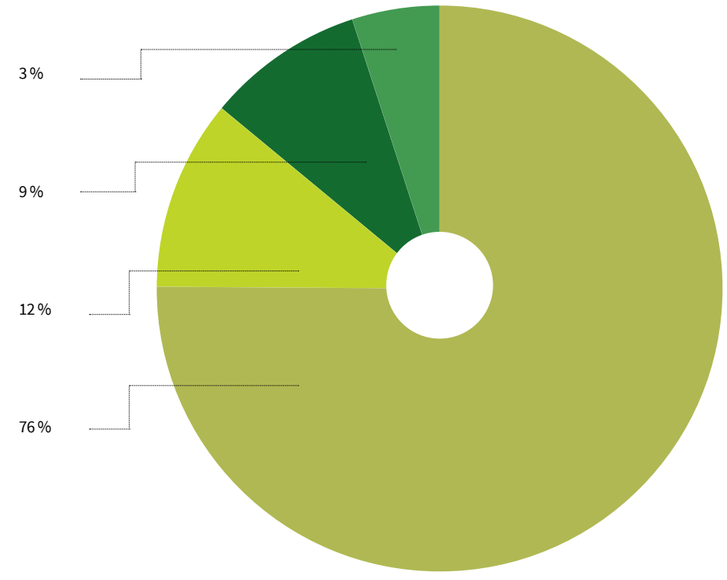
Para la construcción de la línea base se realizaron recorridos de observación de las zonas adyacentes al ASA, especialmente en el caño Danta, desde el nacimiento hasta la desembocadura del río Orotoy, para conocer su estado de conservación. En esta etapa se observaron algunos de los impactos registrados que han afectado la naturalidad del caño. El bosque de ribera que acompaña a esta microcuenca, por ejemplo, presenta una fuerte deforestación causada por la ampliación de las fronteras agropecuarias e industriales, actividades principales de la región (Falcucci, Maiorano y Boitani, 2007; Veneklass, Fajardo y Lozano, 2005).

El cambio de bosque por pasturas es un factor que influye negativamente en este tipo de ecosistema: disminuye el hábitat de las especies asociadas, permite mayor incidencia solar, lo que afecta los ambientes acuático y edáfico, y genera pérdida de amortiguación entre el pastizal, el bosque de ribera y el caño. Esto última se da porque el bosque se convierte en una línea de arbustos y especies herbáceas, una cerca viva que no tiene la capacidad de retener agua y nutrientes, lo que genera un lavado de estos y de productos químicos utilizados para las actividades agropecuarias (herbicidas o insecticidas), perjudicando la calidad del suelo.

Además, el recorrido del cauce es modificado y desviado por canales para beneficiar cultivos adyacentes, y el ganado tiene fácil acceso a esta zona, lo que genera compactación en el suelo y contaminación por concentración de urea o *Escherichia coli*. Asimismo, las fincas aledañas tienen acceso directo a esta microcuenca, de manera que se observaron motobombas instaladas en los fragmentos del nacimiento del caño Danta, lavaderos y lavadoras dentro del caño, y desechos tanto de productos agropecuarios como domésticos, entre otros factores negativos.

Los registros anteriores son las observaciones que se han realizado durante las caminatas en el caño Danta y en algunos fragmentos del caño Bijao, que demuestran el impacto sobre los procesos ecológicos y su efecto en la biodiversidad de la zona y la región en general.

Para la construcción de la línea base en la zona de influencia del ASA, se realizó una caracterización de la cobertura vegetal. Como resultado se obtuvo una mayor dominancia por pastos introducidos de *Brachiaria humidicola* y *Brachiaria decumbens*, los cuales son típicos en la región para el engorde del ganado. También se registraron otras especies asociadas a estos pastizales, pero en menor proporción como *Cyperus* sp. (tote), *Paspalum* sp. (grama) y en la misma proporción de hoja ancha y *Mimosa* sp. (dormilona) (figura 36).



Caracterización temporal de fauna silvestre en el área de influencia del ASA

Figura 36. Porcentaje de abundancia de la cobertura vegetal en el área de influencia (línea base)

Para el registro de fauna silvestre en donde se desarrollaron las diferentes metodologías, se tuvieron en cuenta tres zonas importantes para la observación de los grupos taxonómicos: zona abierta (potrero), bordes de bosque (transición entre bosque de ribera y pastizal) e interior del bosque de ribera. En la figura 37 se observa la abundancia de especies registradas, siendo las aves el grupo más representativo debido a su gran diversidad taxonómica y facilidad de observación en comparación con los otros grupos de vertebrados (Villarreal *et al.,* 2006).

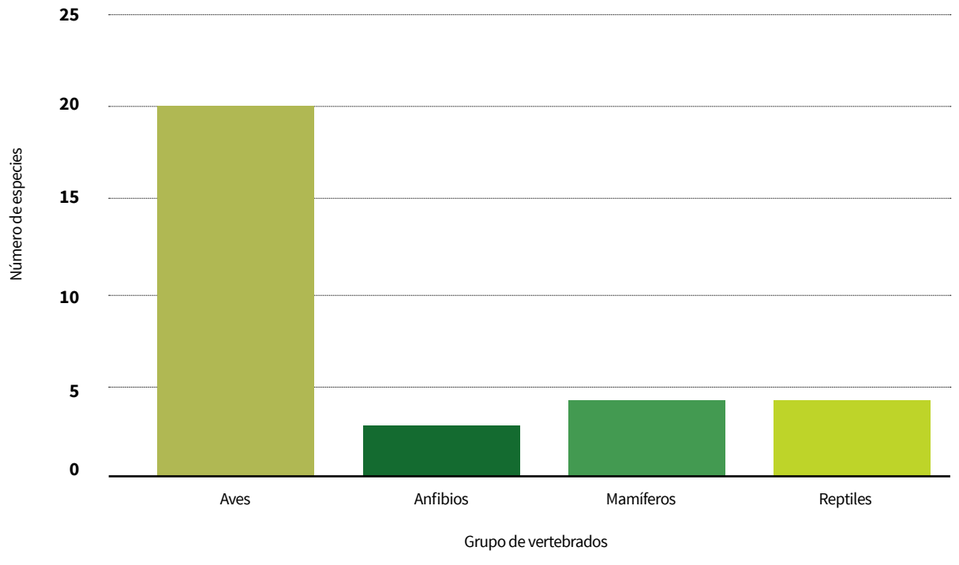


Figura 37. Número de especies observadas en la construcción de la línea base de 2010 en el ASA

Después de la adecuación de tierras en el ASA y el establecimiento de las especies forestales, se delimitaron cuatro zonas: laguna de amortiguación (búfalos), parcelas forestales, sistema silvopastoril y la recuperación por reforestación ecológica de las zonas de ribera del caño Danta y Bijao (límites de la zona de influencia).

Se realizaron los seguimientos faunísticos para determinar el impacto sobre la abundancia de especies por el cambio en el uso del suelo en esta área. Los datos obtenidos se organizaron sobre una matriz previamente establecida, con registros fotográficos que permitieran validar la existencia de la observación a través del tiempo (Villarreal *et al.*, 2006). Sin embargo, cabe anotar que algunas especies son observadas, pero no es posible capturarlas fotográficamente ya que pueden presentar un rápido movimiento de huida, una actividad nocturna o una distancia difícil de alcanzar con el lente de la cámara.

Para los cuatro grupos taxonómicos estudiados se observó un incremento en el número de especies durante los periodos de monitoreo. El cambio en el uso y en la cobertura del suelo generó alternativas para las diferentes actividades de estas especies (el desplazamiento entre fragmentos boscosos de la zona, la construcción de nidos, alimentación, entre otras). Asimismo, es evidente que cada componente del paisaje permite que haya una diversidad de especies con requerimientos ecológicos particulares, de manera que se encuentran tanto especies que habitan cerca de cuerpos de agua, que nidifican en las pasturas, como especies que interactúan en las diferentes parcelas forestales.

En la figura 38 se observa el comportamiento de avifauna durante los periodos evaluados en cuanto a riqueza de especie (número total de especies). Dentro de este grupo, el orden de Passeriformes o comúnmente llamados pájaros cantores (figura 39) presenta un número mayor en cuanto a familias y especies: un total de 9 y 16 respectivamente (figura 40). 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).

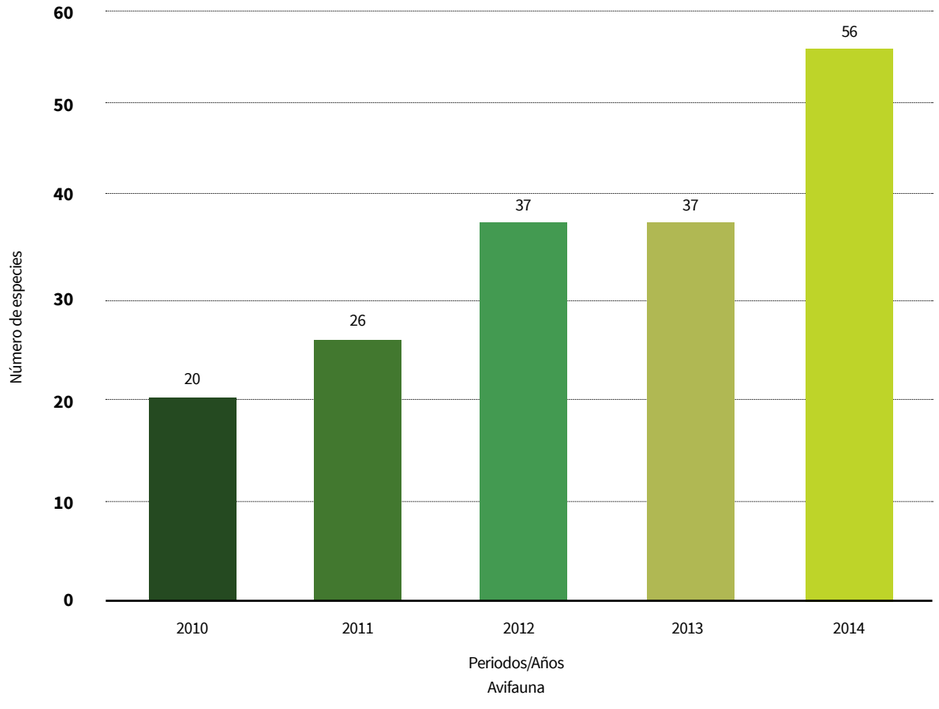


Figura 38. Número de especies de aves registradas en el ASA

También se registraron grupos taxonómicos de baja representatividad, órdenes con una familia y una especie que por lo general son individuos que pueden presentan una mayor restricción ecológica o son de difícil observación o de comportamientos crepusculares, lo que dificulta su observación: *Eurypyga helias* (garza del sol), Trochilidae (colibrí) y *Aramides cajanea* (chilacopis colinegra).





Figura 39. Passeriformes del ASA, *Tangara cayana* (tangara anteada) y *Sicalis flaveola* (canario)

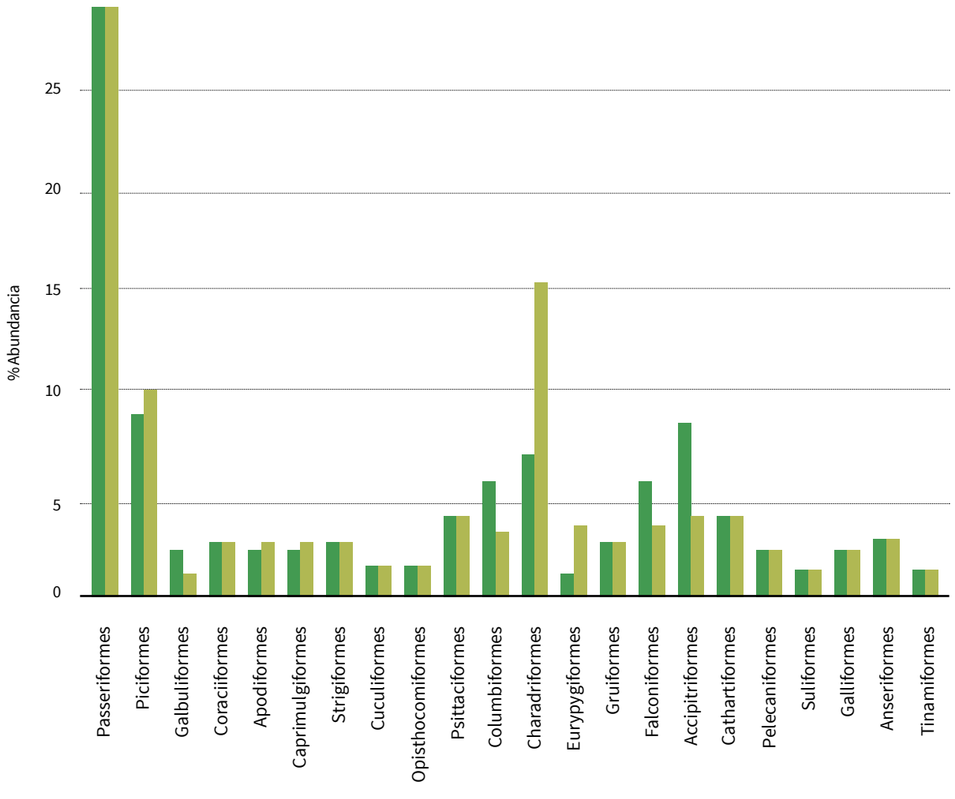


Figura 40. Porcentaje de abundancia respecto a los órdenes observados de avifauna en el ASA (familias y especies)

De igual forma se registraron especies que por sus características fisiológicas tienen una mayor capacidad para un amplio rango de distribución y soportar los cambios de sus hábitats naturales: *Caracara plancus* (caracara), *Aratinga pertinax* (perico carisucio), *Megacops choliba* (currucutú común), *Tyrannus melancholicus* (atrapamoscas) y *Mimus gilvus* (sinsonte) (figura 41).





Figura 41. Especies con amplio rango de distribución

Otros registros son las aves migratorias, las cuales son típicas de la Orinoquia: *Tringa soltaria* (andarríos solitario) y *Tyrannus savana* (sirirí tijereta), las cuales tienen la capacidad de desplazarsen desde las zonas templadas del norte y del sur de América durante el invierno para veranear en el trópico, con el fin de tomar recursos alimenticios necesarios para su supervivencia (McNish, 2007).

En cuanto al registro de mamíferos, se observa un incremento de especies durante los periodos estudiados (figura 42). Al igual que todos los grupos estudiados, la línea base construida tiene una baja representatividad en cuanto al número de especies, asociada a la deforestación y destrucción de hábitats (Medellín, Arita y Sánchez, 1997). Sin embargo, en los diferentes recorridos de los fragmentos de bosques de ribera se observaron madrigueas (presencia de cachicamo) y semillas roídas (presencia de roedores y primates) que permiten suponer que, a pesar de la erosión del ambiente, este aún tiene la capacidad de albergar fauna, especialmente especies con capacidad de soportar los diferentes impactos negativos sobre los ecosistemas.

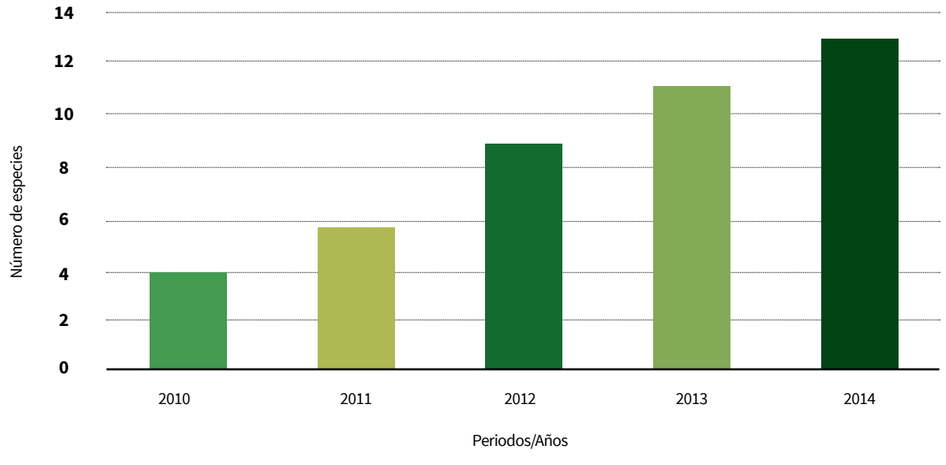


Figura 42. Número de especies de mamíferos registradas en el ASA

El grupo de mamíferos voladores es uno de los más representativos en el ASA, y esto se debe a que son los más abundantes y diversos entre la mastofauna de Colombia, superando a la mayoría de órdenes de mamíferos (figura 43). Su importancia en los ecosistemas radica en cumplir funciones como controladores naturales de plaga, insectos, roedores y otras pequeñas especies, y como agentes dispersores o polinizadores de especies vegetales, permitiendo el mantenimiento sostenible de los diferentes procesos ecológicos en los ambientes naturales (Muñoz, 2001; Medellín *et al*., 1997).

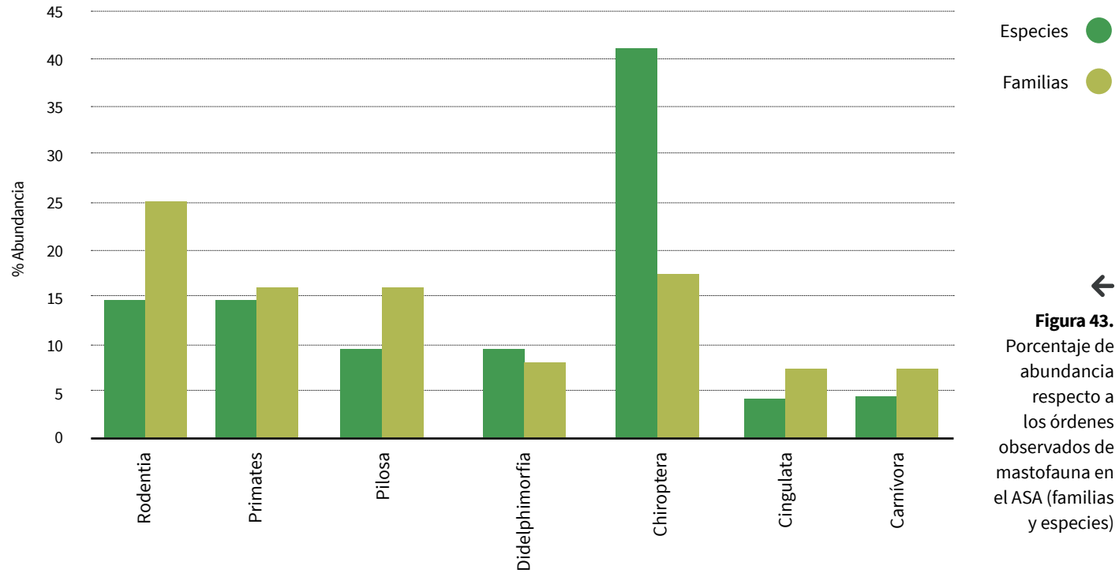


Figura 43. Porcentaje de abundancia respecto a los órdenes observados de mastofauna en el ASA (familias y especies)

El cambio en la estructura vegetal permite un acercamiento entre los fragmentos de los caños Danta y Bijao. Así, especies que se desplazan en grandes distancias encuentran una conexión de estos dos corredores, lo que les permite ampliar su zona de actividad. Especies como *Myrmecophaga tridactylade* (oso palmero), *Saimiri sciureus* (tití) y *Sciurus granatensis* (ardilla de cola roja) han sido registradas en las parcelas forestales del ASA, lo que sugiere que este cambio en el uso de tierras generó un sistema de corredor biológico natural en esta zona (figura 44).





Figura 44. De izq. a der.: *Cebus apella* y *Saimiri sciureus*

En la figura 45 se observa el comportamiento en cuanto a número de especies de anfibios y reptiles para los periodos evaluados. El orden más representativo en cuanto a familias es Squamata, con el 60% respecto a los demás, y en cuanto a especies el grupo de los anuros tiene el mayor número de registros (figura 46), los cuales incluyen sapos y ranas que se pueden encontrar en la mayoría de los continentes.

Estos animales habitan espacios acuáticos y terrestres, lo que les facilita la dispersión de sus especies (Vitt y Caldwell, 2009), y su gran importancia no solo radica en las interacciones en los procesos ecológicos, sino en la vulnerabilidad ante los impactos antrópicos y transformaciones de los ecosistemas, que permite dar cuenta del estado de conservación de un lugar determinado (Acosta, 2000).

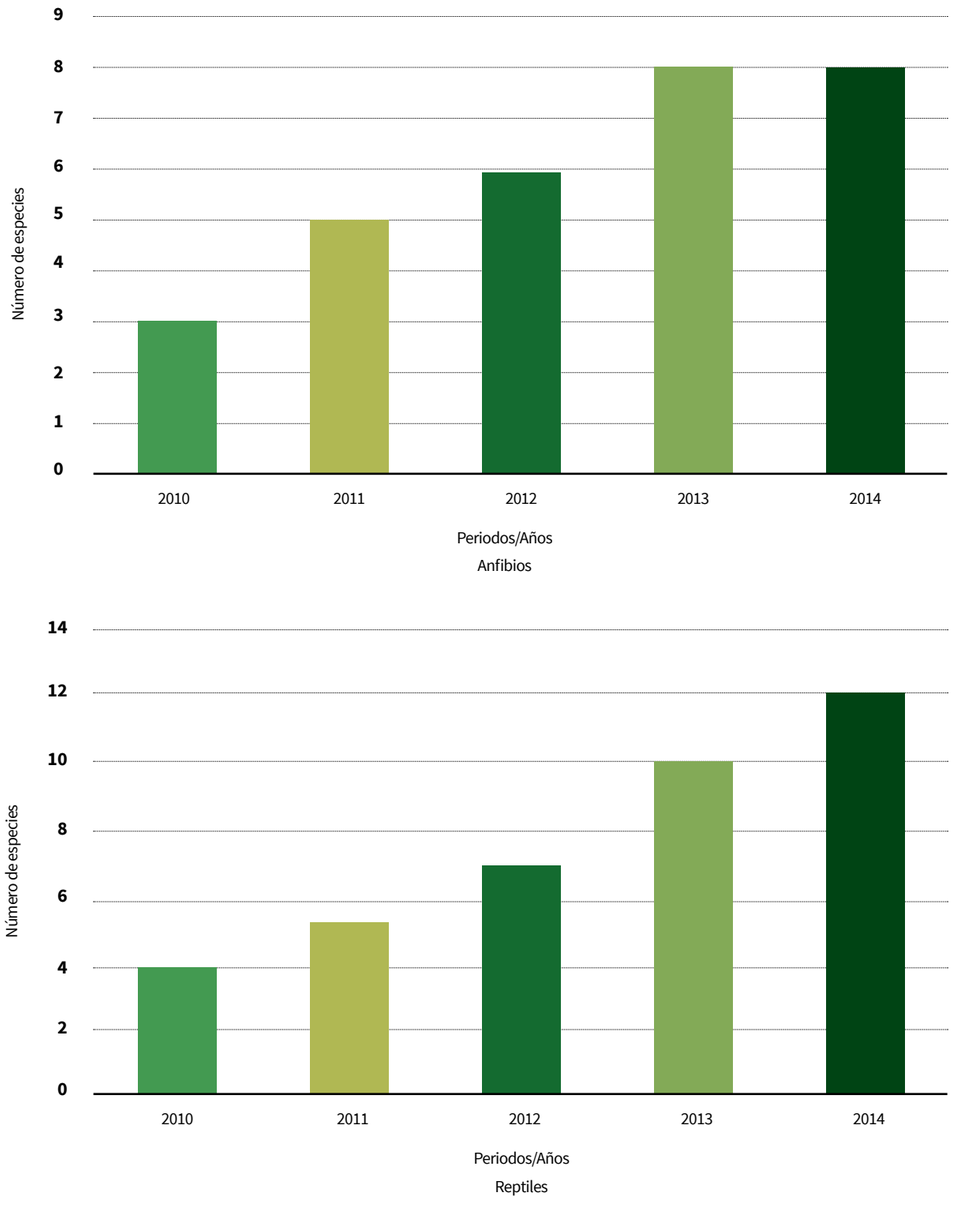


Figura 45. Número de especies de anfibios y reptiles registrados en el ASA

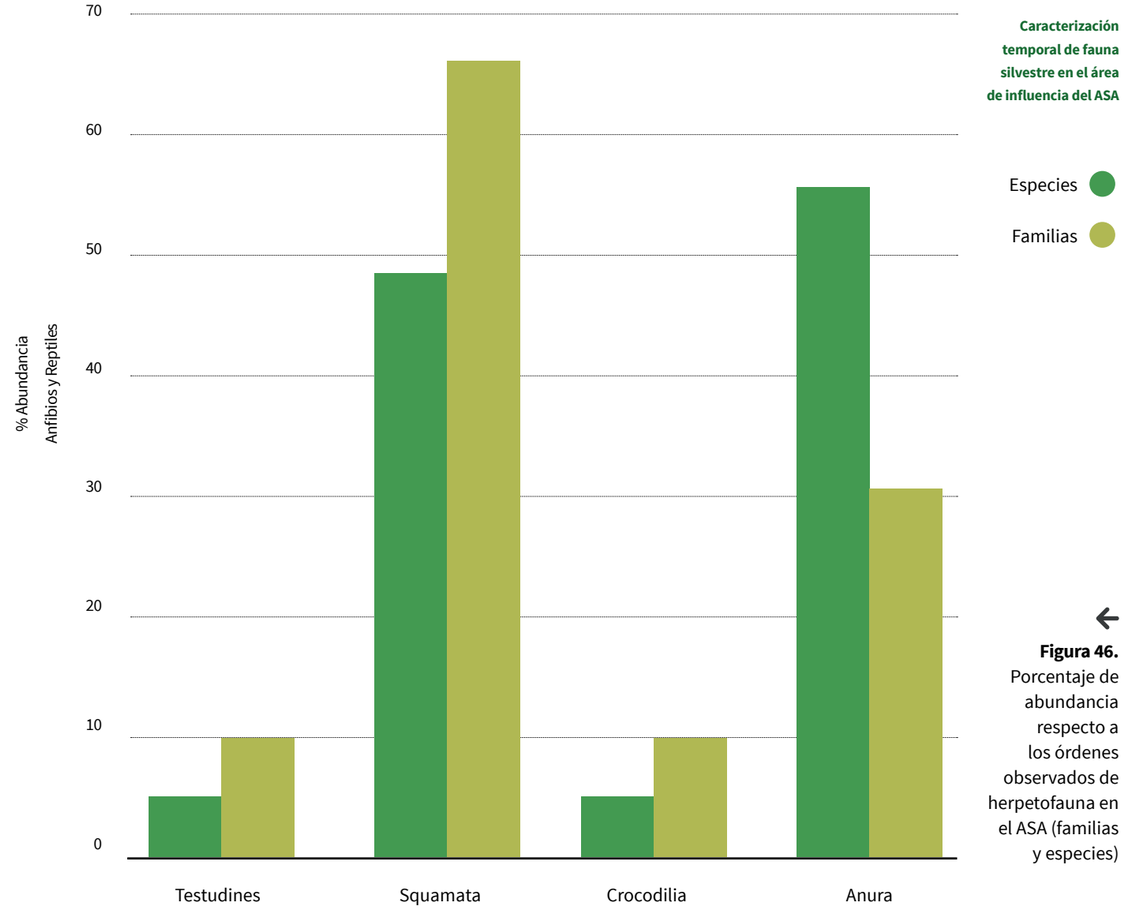


Figura 46. Porcentaje de abundancia respecto a los órdenes observados de herpetofauna en el ASA (familias y especies)

La especie de *Rhinella marina*, vulgarmente conocida como sapo común, es una de las que se observan frecuentemente cerca de las instalaciones del ASA, así como en todo el territorio colombiano. Esto se debe a que sus cualidades físicas y fisiológicas le permiten colonizar fácilmente sitios que han sido impactados antrópicamente. Estos animales presentan piel gruesa, la cual los protege de la pérdida de agua, y la exudación de toxinas por la piel los aleja de animales predadores (Cáceres y Urbina, 2009).

Se observa que los cuerpos de agua como las lagunas de amortiguamiento o las charcas temporales son microhábitas importantes para el crecimiento poblacional de los anuros y algunos reptiles, muchos de los cuales se benefician de estos espacios para el desarrollo de sus estadios larvales. A su vez, el bosque de ribera sigue siendo un sitio frecuente para refugiar especies de herpetos, ya sea en los troncos o en la hojarasca. Otros individuos pueden alternar hábitats dependiendo de los requerimientos que presenten, como lugares abiertos de las praderas y sabanas, en donde las especies más frecuentes son las serpientes cazadoras, o la rana vaquera, la cual recorre estos sitios en búsqueda de sus presas o de refugio.

Se ha reportado que las especies *Dendropsophus mathiassoni* (rana sabanera), *Hypsiboas crepitans* (rana platanera o rana tigre) y *H. punctatus* (ranita verde de pecas rojas) son comunes en sistemas productivos del piedemonte llanero (Cáceres y Urbina, 2009). Sin embargo, *H. crepitans* es la más abundante ya que se puede observar en parcelas forestales, pastizales, bordes de caminos secundarios y cerca de cuerpos de agua (figura 47).











Figura 47.
De izq. a der.: *Rhinella marina, Hypsiboas crepitans, Physalaemus fischeri, Elachistocleis ovalis y Dendropsophus mathiassoni* en el ASA

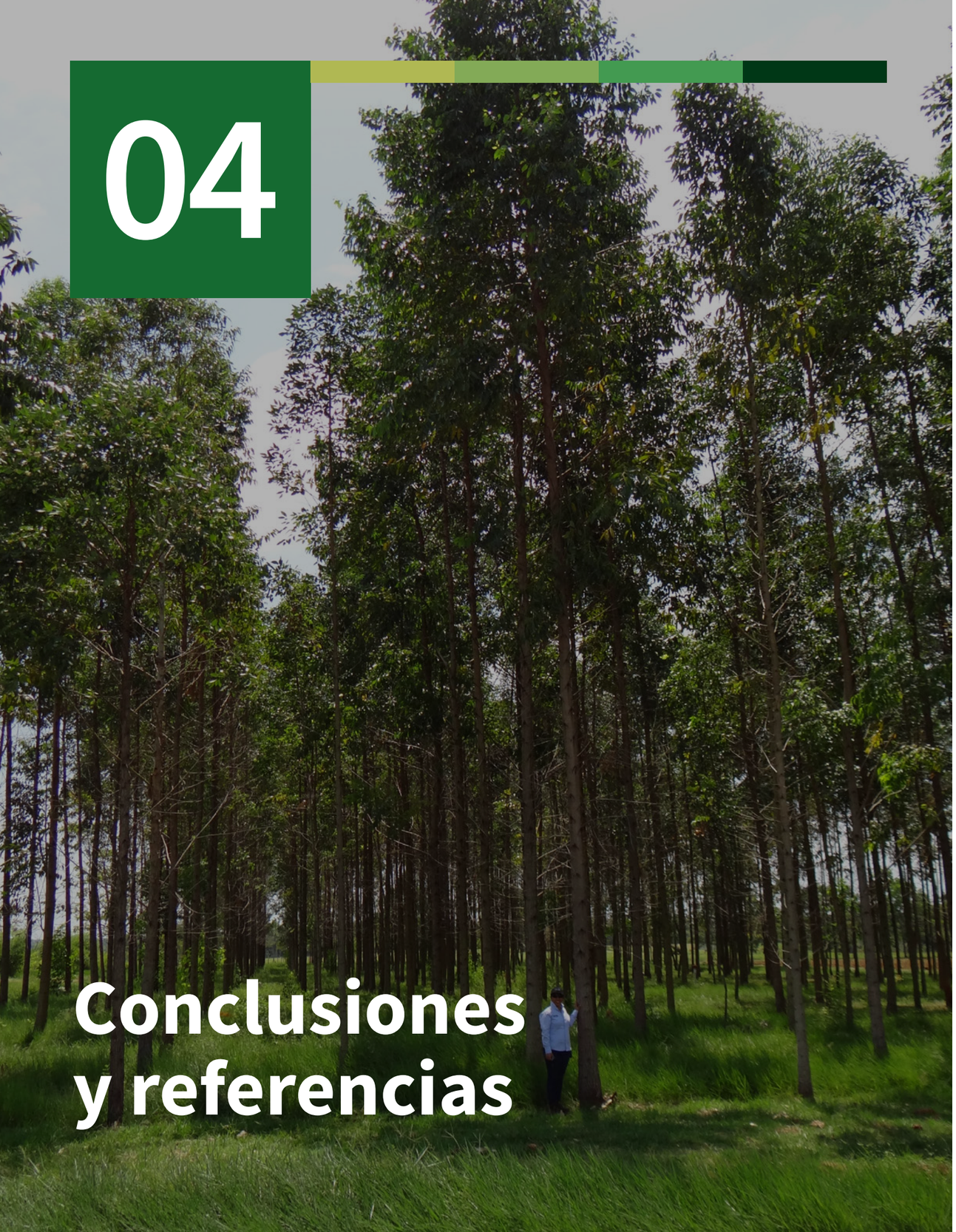
Dentro del grupo de los reptiles, el orden Squamata (serpientes, iguanas, lagartijas, babillas, entre otros) (figura 48) es uno de los más abundante y diversos en el ASA (Vitt y Caldwell, 2009). Al establecerse las lagunas de amortiguación, la tortuga *Podocnemis* cf. *vogli* colonizó esta zona hasta aumentar su población, e igualmente sucede con la babilla, de la cual ya se observan 3-5 individuos en el cuerpo de agua. Este aumento de individuos anfibios hace que serpientes cazadoras como *Liophis lineatus* y *Chironius carinatus* se observen en algunas parcelas forestales, ya que hay una oferta alimenticia para ellas en esta zona, lo que incrementa a su vez la población de otros individuos y, así mismo, genera una cadena en el área de influencia del ASA.







Figura 48.
Podocnemis cf. vogli, Tupinambis teguixin y Liophis lineatus



04

Conclusiones y referencias

Conclusiones

De la investigación adelantada sobre la utilización de ATAEP en condiciones controladas utilizando la técnica de lisímetros con fondo, se puede concluir que no se ha encontrado evidencia de afectación al suelo por la presencia de hidrocarburos derivados del petróleo. Es así como los suelos sometidos a riego con ATAEP no se diferenciaron de los regados con agua normal en lo químico, físico o microbiológico en ninguna de las dos localidades consideradas.

Las propiedades físicas de los suelos susceptibles de cambios por el uso de estas aguas, como son la porosidad, la densidad aparente, la conductividad hidráulica y la estabilidad de agregados, no muestran cambios significativos debidos al uso de ATAEP como riego.

Por la calidad del agua de producción tratada se podrían esperar efectos en las propiedades físicas de los suelos por la presencia de sales como el sodio, que tienden a dispersar el suelo. Sin embargo, en el CI La Libertad se encontró una mejor estabilidad de agregados (estable DPM > 3) cuando se utilizó ATAEP para el riego de los cultivos.

Químicamente, el suelo presenta variaciones significativas debidas solo al uso del agua en sodio y en conductividad eléctrica, y debidas a la combinación de agua y cultivos en pH, calcio, potasio y sodio (agua + fertilización). Todos los tratamientos se presentan como suelos normales ya que poseen conductividad eléctrica (CE) menor de 4 $dS.m^{-1}$ a 25 °C y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) menor de 15%.

La utilización de ATAEP como riego no ha afectado la población de microorganismos del suelo. De hecho, se encontraron mejores condiciones de los microorganismos del suelo cuando se establecieron los cultivos.

Según Uribe (1999), las bacterias del suelo en un suelo agrícola normal se encuentran en un rango entre 13, 8 y 18,4 LN(UFC).g^{-1} de suelo. En comparación, en el CI La Libertad se obtuvieron en condiciones sin cultivo entre 15,2 y 13,9, y en condiciones con cultivo entre 15,4 y 14,9. Asimismo, en Castilla se registró entre 13,4 y 12,7 en suelo desnudo y entre 15,3 y 13,9 en suelo con cultivo. En todos los casos la población de bacterias es la considerada normal para suelos agrícolas.

El mismo autor considera adecuada una población de hongos para un suelo agrícola entre 6,9 y 11,5 LN (UFC).g^{-1} suelo. Así, tanto en el CI La Libertad como en Castilla todas las poblaciones de hongos reportadas estuvieron en el rango de la normalidad (entre 8,7 y 10, 7). Los valores más altos se hallaron en los suelos con cultivo.

Todos los valores de los actinomicetos encontrados, esto es, entre 7,35 y 9,97 LN (UFC).g^{-1} de suelo, estuvieron por fuera de lo considerado para un suelo agrícola normal (entre 11,5 y 16), lo cual es de prever ya que los suelos trabajados son oxisoles de naturaleza ácida (pH < 5) y mantenidos húmedos, lo cual no favorece el crecimiento de los actinomicetos.

Finalmente, las poblaciones de los microorganismos del suelo (hongos, bacterias y actinomicetos) hacen que este sea fértil.Mantener el suelo con cultivo y humedad adecuada favorece sus funciones de descomponer la materia orgánica, haciendo posible la absorción de compuestos y elementos por parte de las plantas.

En los espacios controlados de la investigación, el desarrollo y la producción de los cultivos no se vieron afectados por los tratamientos de agua de riego evaluados.

Las variables altura de planta y diámetro del tallo de los dos ciclos de establecimiento del cultivo de caña de azúcar muestran un comportamiento similar entre tratamientos y cortes respecto a lo reportado en la literatura.

En el primer ciclo de Castilla La Nueva, la primera cosecha en plantilla se realizó a los 209 días, y para el segundo ciclo, a los 243 días (siete y ocho meses respectivamente), lo cual demuestra el rápido crecimiento del cultivo en las condiciones edafoclimáticas a las que fue sometido. Cenicaña (2002) ha definido que el rendimiento promedio para la variedad estudiada, CC 8592, oscila entre 120 y 130 TCH. Los valores experimentales de rendimiento, tanto en el primer ciclo como en el segundo, fueron superiores a estos promedios.

Para pasto elefante, en Castilla La Nueva se encontraron rendimientos por corte superiores a 100 t.ha mostrando los beneficios del riego para esta especie.

En el ASA, con la utilización de ATAEP como riego, no se ha encontrado evidencia de afectación a los cultivos, al suelo, a las fuentes hídricas y a la biota en general del ecosistema.

Los análisis químicos, físicos, microbiológicos y ambientales efectuados periódicamente al suelo no muestran efectos adversos al suelo; por el contrario, con el riego con ATAEP se aportan algunos elementos nutritivos al suelo (Ca, Ma, K) que permiten mejorar sus condiciones para la producción de cultivos.

Así mismo, el cambio de uso del suelo de praderas a bosque permanente ha permitido una recuperación de la biodiversidad del ecosistema, representada en el número de especies que se han reportado periódicamente.

La investigación adelantada utilizando riego para la producción de especies forestales agroenergéticas ha permitido obtener información valiosa sobre el comportamiento de estas especies en suelos ácidos clase VI de baja fertilidad del piedemonte llanero. Los parámetros de desarrollo de las especies en evaluación demuestran el gran potencial de esta actividad para producir biomasas que pueden ser utilizadas para generar alternativas de producción de bioenergía.

Los volúmenes de madera calculados para un período de 4,5 años de crecimiento desde siembra muestran valores superiores a 180 m^3.ha para acacia (198), melina (212) y eucalipto *pellita* (182). Así mismo, se observa biomasa superior a 199 $t.ha^{-1}$ para acacia (239), melina (199) y eucalipto *pellita* (284). Entretanto, el carbono capturado por estas especies en el mismo periodo de crecimiento fue de 142 $t.ha^{-1}$ para eucalipto, 119 $t.ha^{-1}$ para acacia y 99 para melina.

Para las especies yopo, caucho y pino, que son de crecimiento más lento, los valores de volumen de madera fueron de 69, 35 y 33 $m^3.ha^{-1}$, la biomasa fue de 85, 29 y 25 $t.ha^{-1}$, y la captura de carbono fue de 42, 15 y 12 $t.ha^{-1}$ respectivamente.

Todos los valores reportados, comparados con referencias nacionales e internacionales, muestran el efecto positivo del riego en la producción de estas especies forestales y la ruptura de los efectos perjudiciales en estos sistemas de producción de la época seca que se presenta en el piedemonte llanero.

La deforestación y la rápida degradación ambiental durante las últimas décadas han transformado los sistemas ecológicos y el hábitat de muchas especies, ejerciendo una fuerza negativa sobre las poblaciones. Sin embargo, la posibilidad de cambiar el uso del suelo acogiéndose a su capacidad productiva y al ordenamiento de las tierras permite disminuir los riesgos de deterioro del recurso.

La posibilidad de cambiar el uso del suelo acogiéndose a su capacidad productiva y al ordenamiento de las tierras permite disminuir los riesgos de deterioro del recurso.

Los resultados de esta investigación de agricultura bajo riego de ATAEP han permitido generar información valiosa sobre el manejo que se debe dar a los suelos clase VI del piedemonte llanero, seleccionando las especies vegetales que se recomiendan por parte de las instituciones del Estado encargadas del ordenamiento territorial, realizando un monitoreo permanentemente de la evolución de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, recreando el crecimiento, desarrollo y comportamiento de las especies forestales plantadas y registrando cómo el hábitat establecido contribuye a la recuperación del ambiente y la vida silvestre.

Con el establecimiento de los sistemas forestales la recuperación del ecosistema desde el punto de vista faunístico ha sido de tal magnitud que en un corto periodo de cinco años se logró aumentar el número de especies de aves en 280%, de mastofauna en 325%, de anfibios en 266% y de reptiles en 300% con relación a la línea base establecida en 2010.

Así mismo, el cambio en la estructura vegetal permitió un acercamiento entre los fragmentos boscosos de los caños Danta y Bijao, lo que generó un sistema de corredor biológico natural en esta zona, con el beneficio de riqueza genética de las especies nativas.

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 y 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.

José Guillermo Velásquez Penagos
jvelasquez@agrosavia.co

Médico veterinario con maestría en reproducción bovina, suficiencia investigadora en estudios avanzados de fisiología animal y doctorado 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 y la Comunidad Europea, entre otros.

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).

Víctor Fabio Luna Mora
vluna@agrosavia.co

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

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.

Milady Ruiz Nieves
mruizn@agrosavia.co

Ingeniera agrónoma 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 dentro de los proyectos del convenio Agrosavia-Ecopetrol asociadas a cultivos irrigados con ATAEP.

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.

Ruth Lucena Marín Romero
rmarinr@agrosavia.co

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. En la actualidad se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecua**ria** (Agrosavia), donde realiza actividades dentro del convenio Agrosavia-Ecopetrol.

Ricardo Botero Quintero
rijobo140@hotmail.com

Ingeniero agrícola de la Universidad del Valle. Actualmente se desempeña como consultor en temas ambientales y como asesor de plantaciones de palma de aceite.

Referencias

Abboud, S. A. (2000). Toxicity Evaluation of Muds and Cements in Drilling Operations. Curso de posgrado. La Habana, Cuba: MINBAS.

Acero, D. (2005). *Plantas útiles de la cuenca del Orinoco. Parte D: especies útiles del clima cálido*. Bogotá: Ecopetrol y Corporinoquia.

Acosta A. R. (2000). Ranas, Salamandras y Caecilias (Tetrapoda): Anphibia de Colombia. *Biota Colombiana, 1*(3), 289-319. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Agarry, S. E., Solomon, B. O. y Layokun, S. K. (2008). Optimization of process variables for the microbial degradation of phenol by Pseudomonas aeruginosa using response surface methodology. *African Journal of Biotechnology, 7*(14), 2409-2416.

Almansa, E., Bernal, J. y Arguello, O. (2006). *Desarrollo de indicadores físicos de sostenibilidad edáfica*. Plegable divulgativo N.° 48 Corpoica. Villavicencio, Meta, Colombia.

Álvarez, J. A. (2001). *Caracterización de aguas y sedimentos del yacimiento Puerto Escondido*. Geomin.

Álvarez, A. y Díaz, M. (2001). *Alternativas para la remediación de ecosistemas contaminados por hidrocarburos*. La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones del Petróleo.

Álvarez. A., Ramos, E., Fernández, B. y Núñez, A. (2001). *Gestión de residuos sólidos petrolizados*. Estados Unidos: Petróleo Internacional.

Amézquita, E. (2004). La fertilidad física del suelo. En: Congreso Latinoamericano, 16, y Congreso 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 altillanura colombiana*.

Amórtegui, L. (2004). *Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales*. Tesis doctoral, Facultad de Biotecnología, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Anderson, J. e Ingram, J. (1998). *Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook of Methods*. 2ª ed.

Andrades, M. y Martínez, M. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*. La Rioja, España: Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones.

Annadurai, G., Ling, L. Y. y Lee, J. F. (2008). Statistical optimization of medium components and growth conditions by response surface methodology to enhance phenol degradation by Pseudomonas putida. *Journal of Hazardous Materials, 151*(1), 171-8.

Appelo, C. A. J. y Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam: Balkema.

ARPEL (1997). *Manejo de desechos*. Komex International.

Arthur, J., Langhus, B. y Patel, C. (2005). *Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies*. Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos: All Consulting, LLC.

Bacic, M. K. y Yoch, D. C. (1998). In vivo characterization of Dimetilsulfoniopropionate Lyase in the Fungus Fusarium lateritium. *Applied Environmental Microbiology, 64*(1), 106-111.

Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Ewin, T., Killeen, T. J., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Lloyd, J., Monteagudo, A., Neill, D. A., Patiño, S., Pitman, N. C. A., Silva, J. N. M. y Martínez, R.V. (2004). Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology, 10*, 545-562.

Banco de Occidente (2005). *La Orinoquia de Colombia*. Cali, Colombia: Comité Editorial Banco de Occidente.

Bandyopadhyay, K., Das, D. y Maiti, B. R. (1998). Kinetics of phenol degradation using Pseudomonas putida MTCC 1194. *Bioprocess Engineering, 18*(5), 373-77.

Banerjee, A. y Ghoshal, A. K. (2010). Phenol degradation by Bacillus cereus: pathway and kinetic modeling. *Bioresource Technology, 101*(14), 5501-7.

Barkley, N. P. (1991). Debris washing system removes PCBs, herbicides. *Tech Trends, EPA 540/M-91/002* (5).

Barrera, J., Suárez, D. y Melgarejo, L. (2010). Capítulo II. Análisis de crecimiento en plantas. En: L. Melgarejo (ed.), *Experimentos en fisiología vegetal* (pp. 25-38). 1ª ed. Universidad Nacional de Colombia.

Baver, L. D., Gardner, W. H. y Gardner, W. R. (1973). *Física de suelos*. 1ª ed. México: UTEHA.

Bavière, M. (1993). *Remediation of soils contaminated by petroleum products with surfactants*. First World Congress on Emulsion. EDS, París.

Bayona, M. (2017). *Minería a profundidad, una perspectiva objetiva sobre la minería bien hecha.* Recuperado de https://www.vanguardia.com.

Becker, V. O. (1976). Microlepidopteros asociados con *Carapa*, *Cedrela*, y *Swietenia* en Costa Rica. En J. L. Whitemore (ed.), *Studies on the shootborer, Hypsipyla grandella (Zeller), Lep.:Pyralidae, CATIE Misc* (pp. 75-101). Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Belloso, C. (1998). Biodegradación de suelos contenidos en terrarios. En: XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

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.

Bennett, W. F. (1993). Plant Nutrient Utilization and Diagnostic Plant Symptoms. En W. F. Bennett, *Nutrient Deficiencies & Toxicities in Crop Plants* (pp. 1-7). 1ª ed. Minnesota, Estados Unidos: APS Press.

Berger, A. R. y Iams, W. J. (eds.) (1996). *Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems*. Rotterdam: A. A. Balkema.

Boronat, J. (2001). *Suelos contaminados: nuevas tecnologías y aplicaciones en el tratamiento de residuos*. Brasil: Jornadas Fórumambiental.

Bushnell, L. D. y Hass, H. F. (1941). The utilization of certain hydrocarbons by microorganisms. *Journal of Bacteriology, 41*(5), 653-73.

Caballero-Mellado, J., Onofre-Lemus, J., Estrada-de Los Santos, P. y Martínez-Aguilar, L. (2007). The tomato rhizosphere, an environment rich in nitrogen-fixing Burkholderia species with capabilities of interest for agriculture and bioremediation. *Applied and Environmental Microbiology, 73*(16), 5308-19.

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.

Campbell, C. R. (2000). *Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States*. Estados Unidos: NC Department of Agriculture and Consumer Services.

Cardona, E., Ríos, L y Peña, J. (2012). Disponibilidad de variedades de pastos y forrajes como potenciales materiales Lignocelulósicos para la producción de bioetanol en Colombia. *Información Tecnológica, 23*. Medellín, Colombia.

Carls, M. G. *et al.* (2001). Persistence of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill. *Marine Environmental Research, 51*(2), 167-190.

Castro, P. *et al.* (2007). Abundancia y Biomasa de Organismos Edáficos en Tres usos del Terreno en el Altiplano de Pasto, Colombia. *Acta Agronómica, 56*(3), 127-130.

Cenicaña (2002). *Características Agronómicas y de Productividad de la variedad Cenicaña Colombia CC – 8592*. Serie técnica No. 30. Cali, Colombia.

Chaîneau, C. H., Rougeux, G., Yéprémian, C. y Oudot, J. (2005). Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial populations in the soil. *Soil Biology and Biochemistry, 37*(8), 1490-1497.

Chaves, M. E. y Santamaría, M. (eds.) (2006). *Informe sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998-2004*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

CIPP (1999). *Regulación Ambiental de CUPET 01/95 (Revisión 2). Manejo de Residuales durante la perforación de pozos de petróleo en tierra (onshore)*. La Habana, Cuba.

Colwell, R. K. (2013). *Estimates Statistical Estimation of Species Richeness and Shared Species from Samples. Version 9.1.0.*

Conen, F. y Smith, A. (1998). A re-examination of closed flux chamber methods for the measurement of trace gas emissions from soils to the atmosphere. *European Journal of Soil Science, 49*, 701-707.

Contreras, E. M., Albertario, M. E., Bertola, N. C. y Zaritzky, N. E. (2008). Modelling phenol biodegradation by activated sludges evaluated through respirometric techniques. *Journal of Hazardous Materials, 158*(2-3), 366-74.

Cordova-Rosa, S. M., Dams, R. I., Cordova-Rosa, E. V., Radetski, M. R., Corrêa, A. X. R., y Radetski, C. M. (2009). Remediation of phenol-contaminated soil by a bacterial consortium and *Acinetobacter calcoaceticus* isolated from an industrial wastewater treatment plant. *Journal of Hazardous Materials, 164*(1), 61-6.

Cursi, E. y Calleja, C. (2000). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos*. Mendoza, Argentina: UE.

Decaens, T. *et al.* (2003). Impacto del uso de la tierra en la macrofauna del suelo de los llanos orientales de Colombia. En: J. Jiménez y R. Thomas, *El arado natural. Las comunidades de macroinvertebrados del suelo en las sabanas neotropicales de Colombia* (pp.21-45). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Decaens, T. *et al.* (2006). The Values of Soil Animals for Conservation Biology. *European Journal os Soil Biology, 42*, 23-38.

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, M. J. (2004). *El Meta – Colombia*. Imeditors.

Díaz, E., Jiménez, J. I. y Nogales, J. (2013). Aerobic degradation of aromatic compounds. *Current Opinion in Biotechnology, 24*(3), 431-442.

Dixon, R. (2004). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases. *Agroforestry Systems, 31*, 99-116.

Dong, X., Hong, Q., He, L., Jiang, X. y Li, S. (2008). Characterization of phenol-degrading bacterial strains isolated from natural soil. *International Biodeterioration and Biodegradation, 62*(3), 257-262.

Durell, G., Røe Utvik, T., Johnsen, S., Frost, T. y Neff, J. (2006). Oil well produced water discharges to the North Sea. Part I: Comparison of deployed mussels (*Mytilus edulis*), semi-permeable membrane devices, and the DREAM model predictions to estimate the dispersion of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Marine Environmental Research, 62*(3), 194-223.

El-Naas, M. H., Al-Muhtaseb, S. A. y Makhlouf, S. (2009). Biodegradation of phenol by *Pseudomonas putida* immobilized in polyvinyl alcohol (PVA) gel. *Journal of Hazardous Materials, 164*(2-3), 720-5.

EPA (1995). *Guía del ciudadano: La extracción de vapores del suelo y la aspersión de aire*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996a). *Guía del ciudadano: Desechos sólidos y respuesta en situaciones de emergencia (5102G)*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996b). *Guía del ciudadano: El enjuague del suelo in situ*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996c). *Guía del ciudadano: El lavado del suelo*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996d). *Guía del ciudadano: La desorción térmica*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996e). *Guía del ciudadano: La extracción con solventes*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996f). *Medidas fitocorrectivas*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1996g). *Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1999a). *Bibliography for Innovative Site Clean-Up Technologies*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (1999b). *The Hazardous Waste Clean-Up Information (CLU-IN) World Wide Web Site*.

EPA (2001a). *Guía del ciudadano: Descontaminación de suelos contaminados*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (2001b). *Guía del ciudadano: Tecnología de Restauración Ambiental*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

EPA (2001c). *Treatment Technologies*.

EPA (2014). *Program to Protect Underground Sources from Injection of Fluids Associated with Oil and Gas Production Needs Improvement*. Report to Congressional Requesters.

Ercoli, E. y Gálvez, J. (2001). *Tratamiento biológico ex situ de residuos semisólidos de oleoductos*. Argentina: Laboratorio de Bioprocesos, Universidad Nacional de Cuyo.

Ercoli, E., Di Paola, M. y Cantero, J. (2000). *Análisis y Evaluación de parámetros críticos en biodegradación de hidrocarburos en suelo*. Argentina: Laboratorio de Bioprocesos, Universidad Nacional de Cuyo.

Ercoli, E., Gálvez, J., Müller, R. y Stottmeister, U. (2001).*Tratamiento intensivo de suelos biorremediados en reactor AIRLIFT*. Leipzig, Alemania.

Ercoli, E., Fuentes B. J., Gilobert, M., Galvez, J. y Aarreghini, M. (2001). *Tratamiento biológico de lodos de refinería*. Argentina: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

Errampalli, D., Trevors, J. T., Lee, H., Leung, K., Cassidy, M., Knoke, K., Marwood, T., Shaw, K., Blears, M. y Chung, E. (1997). Biorremediation: A Perspective. *Journ. of Soil Contamination, 6*(3), 207-218.

Escobar J. J. y Ronquillo, O. (2012). *Respuesta a la fertilización orgánica con el uso de Biol y potásica inorgánica en King grass (Pennisetum purpureum) para estimación energética de potencial productivo de biogás*. Zamorano, Honduras.

Espinosa, F., Argenti, P., Gil, J., León, L. y Perdomo, E. (2001). Evaluación de pasto King Grass en asociación con leguminosas forrajeras. *Revista Zootecnia*. CENIAP.

Fajardo, M. D. y Urbina, F. (1998). *Colombia Orinoco – Biogeografía de la Orinoquia Colombiana*. Recuperado de www.banrepcultural.org/blaavirtual/faunayflora/orinoco/orino4f.htm.

Fakhru'l-Razi, F. R., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R., Madaeni, S. S. y Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials, 170*(2-3), 530-51.

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 (1981). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos*. Vol. 2. Recuperado de http://www.fao.org/docrep/016/ap354s/ap354s00.PDF.

FAO (2007). Estructura del suelo. Recuperado de HYPERLINK "http://WWW.FAO.org" WWW.FAO.org HYPERLINK >FI>FAO_training>General>x6706s>x6706s07.

FAO (2009). *Guía para la descripción de suelos.*

Fernández, F. (2003). *Introducción a las hormigas de la región neotropical*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Flores, N. (2001). Utilización de lodos residuales en la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos. VI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Pachuca, México.

Flórez, A. (2003). *Colombia: Evolución de sus Relieves y Modelados*. Universidad Nacional de Colombia.

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.

Fuentes, A. y Massol, D. (2002). *Manual de laboratorios ecología de microorganismos, Parámetros físico - químicos salinidad*. Puerto Rico: Recinto Universitario de Mayagüez.

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).

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: Agrosavia.

Gatchett, A. (1993). *Soil washing technology removes organics from fine and coarse grained soil*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Gatchett, A. (1994). *Fluid Extraction - biological degradation of organics*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Geng, A., Soh, A. E. W., Lim, C. J. y Loke, L. C. T. (2006). Isolation and characterization of a phenol-degrading bacterium from an industrial activated sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology, 71*(5), 728-35.

Ghanem, K. M., Al-Garni, S. M. y Al-Shehri, A. N. (2009). Statistical optimization of cultural conditions by response surface methodology for phenol degradation by a novel *Aspergillus flavus* isolate. *African Journal of Biotechnology, 8*(15), 3576-3583.

Ghazali, F. M., Rahman, R. N. Z. A., Salleh, A. B. y Basri, M. (2004). Biodegradation of hydrocarbons in soil by microbial consortium. International *Biodeterioration and Biodegradation, 54*(1), 61-67.

Gregorczyz, A. (1991). The logistic function, its aplication to the description and prognosis of plan growth. *Acta Societatis Botanicorum Polonial, 60*(1-2), 67-76.

Griffiths, M. W. (2001). The biology and ecology of *Hypsipyla* shoot borers. En R. B. Floyd y C. Hauxwell (eds.), *International Workshop on Hypsipyla shoot borers in Meliaceae* (pp. 74-80). ACIAR Proceedings N.º 97.

Harlin, C. (1991). *Photochemical oxidation reduces organics*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2254.

Hilty, S. y Brown, W. (2009). *Guía de las Aves de Colombia*. Colombia: Asociación Colombiana de Ornitología (ACO).

Huising, E. *et al.* (2012). Diseño y Estrategias de Muestreo para la Evaluación de la Biodiversidad del Suelo. En F. Moreira *et al.*, *Manual de Biología de Suelos Tropicales. Muestreo y Caracterización de la Biodiversidad Bajo Suelo* (pp. 53-90). México: Instituto Nacional de Ecología.

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.

IDEAM (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

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.

INTA (2012).*¿Qué debemos tener en cuenta para incorporar la caña de azúcar en la dieta de nuestros animales?* Rafaela, Argentina: Proyecto Lechero. EEA.

Jain, R. K., Kapur, M., Labana, S., Lal, B., Sarma, P. M., Bhattacharya, D. y Thakur, I. S. (2005). Microbial diversity: application of microorganisms for the biodegradation of xenobiotics. *Current Science, 89*(1), 10.

Jiménez, J. *et al*. (2003). La Macrofauna del Suelo. Un Recurso Natural Aprovechable pero Poco Conocido. En J. Jiménez y R. Thomas, *El Arado Natural. Las Comunidades de Macroinvertebrados del Suelo en las Sabanas Neotropicales de Colombia* (pp. 1-19). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Kattan, H., Serrano, H. y Aparicio (1996). Aves de Escalete: Diversidad, Estructura Trófica y Organización Social. *Cespedesia, 21*(68), 920.

Kotresha, D. y Vidyasagar, G. M. (2007). Isolation and characterisation of phenol-degrading *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 4996. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 24*, 541-7.

Laredo, M. A. (1988). *Tabla de contenido nutricional en pastos y forrajes de Colombia*. Medellín: ICA - Colanta.

Lavelle, P. (1997). Faunal Activities and soil Processes: Adaptative Strategies that Determine Ecosystem Function. *Advances in Ecological Research, 27,* 93-122.

Leahy, J. y Colwell, R. R. (1990). Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiology Review, 54*, 305-15.

Lieth, H. y Markert, B. (1990). *Element Concentration Cadasters in Ecosystems. Methods of Assessment and Evaluation*. Weinheim: VCH.

Lin, J., Reddy, M., Moorthi, V. y Qoma, B. E. (2008). Bacterial removal of toxic phenols from an industrial effluent. *African Journal of Biotechnology, 7*(13), 2232-8.

Lora, R. (1998). Propiedades físicas y químicas del suelo. Memorias I Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Editora Guadalupe Ltda. Villavicencio.

Löser, C., Seidel, H., Zehnsdorf, A. y Stottmeister, U. (1998). Microbial degradation of hidrocarbons in soil during aerobic/anaerobic changes and under purely aerobic conditions. *Appl. Microbiol. Biotechnol, 49*, 631-636.

Luque, J. (1995). *Características edáficas de suelos afectados por derrames de petróleo*. BIP.

Lynch, J. N. S. y Rodríguez, H. (1994). Photosynthetic Nitrogen-Use Efficiency in relation to leaf longevity in common bean. *Crop Science, 34*, 1284-1290. Madison, Wisconsin, Estados Unidos.

Macías, F. y Calvo De Anta, R. (2009). *Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de Galicia*. Santiago de Compostella, España: Xunta de Galicia.

Manrique, R., Ramírez, J., Rangel, M. y Bayona, A. (2008). *Buenas prácticas agrícolas para el manejo agronómico de la caña de azúcar (Sacharumm spp.), con destinos a la producción de panela y otros usos alternativos como el alcohol carburante*. 1ª ed. Bogotá: Agrosavia.

Martínez, G. (1977). *Aguas residuales industriales. Teorías, aplicaciones y tratamiento*. Addison-Wesley.

Masque, C., Nolla, M., Bordons, A., Tarragona, D., y Barcelona, U. D. (1987). Selection and adaptation of a phenol-degrading strain of Pseudomonas. *Biotechnology Letters, 9*(9), 655-60.

McCray, M., Rice, R. W., Ezenwa, I. V., Lang, T. A. y Baucum, L. (2011). *Nutrición en caña de azúcar. Uso del análisis foliar, rangos y valores críticos de nutrientes para caña de azúcar. Hojas maduras*.

McNish, T. (2007). *Las aves de los llanos de la Orinoquía*. Bogotá.

Meckes, M. y De Percin, P. (1992). *SITE Demo Program Technologies in ATTIC*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Medellín, R., Arita, H. y Sánchez, O. (1997). *Identificación de los Murciélagos de México. Clave de Campo*. México: Asociación Mexicana de Mastozoología.

Mesa, L., Orjuela, J., Ortega, A. y Sandoval, J. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87-98.

Michałowicz, J. y Duda, W. (2007). Phenols – sources and toxicity. *Polish Journal of Environmental Studies, 16*(3): 347-62.

Mohite, B. V., Jalgaonwala, R. E., Pawar, S. y Morankar, A. (2010). Isolation and characterization of phenol degrading bacteria from oil contaminated soil. *Innovative Romanian Food Biotechnology, 7*, 61-5.

Montenegro, H. y Malagón, D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá: IGAC.

Morales, J. y Sarmiento, L. (2002). Dinámica de los Macroinvertebrados Edáficos y su Relación con la Vegetación en una Sucesión Secundaria en el Páramo Venezolano. *Ecotrópicos, 15*(1), 99-100. Sociedad Venezolana de Ecología.

Munson, R. D. y Nelson, W. L. (1986). Principles and Practices in Plant Analysis. En L. M. Walsh y J. D. Beaton (Eds.). *Soil Testing and Plant Analysis*. 6a Ed. Madison, Estados Unidos: SSSAJ.

Muñoz, J. (2001). *Los Murciélagos de Colombia. Sistemática, Distribución, Descripción, Historia Natural y Ecología*. Editorial Universidad de Antioquia.

Naresh, B., Honey, P. y Vaishali, S. (2012). Biodegradation of phenol by a bacterial strain isolated from a phenol-contaminated site in India. *Research Journal of Environment Sciences, 1*(1), 46-9.

Narro Farías, E. (1994). *Física de suelos con enfoque agrícola.* México: Editorial Trillas.

Osorio, W. (2012). Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad de nutrientes en suelos ácidos del trópico. *Revista Suelos Ecuatoriales, 41*(1), 74-91.

Pashanasi, B. (2001). Estudio Cuantitativo de la Macrofauna del Suelo en Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en la Amazonía Peruana. *Folia Amazónica, 12*(1-2), 75- 97.

Paumier, V. (1997). *Estudio de la geoquímica ambiental de piscinas receptoras de residuales de perforación en el yacimiento Pina*. Tesis de Lic. Química, La Habana.

Percin, P. (1992). *SITE Demo Program Technologies in ATTIC*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Percin, P. (1993). *Low temperature thermal process for pesticides and other organic compounds*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Peters, M., Franco, L., Schmidt, A. e Hincapié, B. (2011). *Especies forrajeras multipropósito: opciones para productores del trópico americano*. Cali, Colombia: CIAT.

Pinzón, A. y Romero, M. (1998). Transformación de las Propiedades Físicas y Químicas por la Acción de la Lombriz de Tierra: *Eisenia fetida*. *Revista Suelos Ecuatoriales, 28*, 278-283.

Quan, X., Shi, H., Liu, H., Wang, J. y Qian, Y. (2004). Removal of 2,4-dichlorophenol in a conventional activated sludge system through bioaugmentation. *Process Biochemistry, 39*(11), 1701-7.

Quezada, J. (2004). *Metodologías para Medir el Balance de Gases Invernadero*. Universidad de Chile.

Quintero Durán, R. (1995). *Fertilización y nutrición. En Cenicaña, El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 153-177). Cali, Colombia.

Quiroz, T. (2009). *Cambios en la estabilidad estructural de un mollisol tratado con vinaza*. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias Línea de Investigación Suelos, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.

Ramírez, J. (1964). Investigación preliminar sobre la biología, ecología y control de *Hypsipyla grandella* Zeller. *Boletín del Instituto Forestal Latino-Americano, Mèrida, Venezuela, 16*, 54-77.

Rangel, J. y Velázquez, A. (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En J. O. Rangel-Ch., P. Lowy y M. Aguilar (eds.), *Colombia. Diversidad biótica II: tipos de vegetación en Colombia* (pp. 59-87). Bogotá, Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, IDEAM, Universidad Nacional de Colombia.

Ren, J., Lin, W. T., Shen, Y. J., Wang, J. F., Luo, X. C. y Xie, M. Q. (2008). Optimization of fermentation media for nitrite oxidizing bacteria using sequential statistical design. *Bioresource Technology, 99*(17), 7923-7.

Renjifo, L., Franco, A., Álvarez-López, M., Álvarez, M., Borja, R., Botero, J., Córdoba, S., De la Zerda, S., Didier, G., Estela, F., Kattan, G., Londoño, E., Márquez, C., Montenegro, M., Murcia, C., Rodríguez, J., Samper, C. y Weber, W. (2000). *Estrategia nacional para la conservación de las aves de Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

República del Perú (s.f.). *Manual ambiental para el diseño y construcción de vías*. Dirección General del Medio Ambiente, Ministerio de Transporte, Comunicaciones, Vivienda y Construcción.

Reyes, G., Brown, S., Chapman, J. y Lugo, A. E. (1992). *Wood densities of tropical tree species*. Nueva Orleans: US Department of Agriculture, Forest Service.

Riley, P. (2001). *Methods for extinguishing petroleum - based fires, suppressing petroleum released vapors and cleaning petroleum contaminated surfaces* (WO 01/47817). C02F.

Rincón, Á., Bueno, G., Álvarez de León, M., Pardo, O., Pérez, O. y Caicedo, S. (2010). *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos*. Agrosavia.

Riopaila-Castilla (2007). *El cultivo de la caña de azúcar. Manual práctico de consulta*.

Riveros, A. S. (1983). La Orinoquia colombiana. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia,* 36(118).

Rock, S. y Jackson, L. (1997). *Phytoremediation of organics Action Team*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Rodríguez, R. (1984). *Producción de biomasa de Poro (Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F Cook) y King Grass (Pennisetum purpureum * P. typhoides) intercalados, en función de la densidad de siembra y la frecuencia de poda del poro*. Turrialba, Costa Rica.

Rodríguez, S. y Carrasquel (1983). *Pasto Elefante (Pennisetum purpureum, Schumacher)*. FONAIAP Divulga. Venezuela.

Rodríguez, C. S., Bodisco, V., Capo, E. y Novoa, L. G. (1973). *Comparación de seis cultivares de Pasto Elefante (Pennisetum purpureum). Agronomía Tropical*, XXIII(6), 555-567.

Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S. y Sanz, J. (2006a). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid, España: Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía.

Rodríguez, H. N. S., Peña, C., J., Dávila, P. G. A. y Bernal, R. J. (2006b). Manejo de la fertilización nitrogenada en el algodonero y el maíz utilizando la determinación de clorofila como una aproximación a la agricultura por sitio específico en el Valle del Cauca. . XIII. Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Santafé de Bogotá D.C. Hotel Tequendama. (Póster). Artículo Publicado en memorias del Congreso CD-Room- Comisión I – Fertilidad.

Rojas, S. (2009). *Análisis bromatológico pasto elefante morado (Pennisetum purpureum).*

Romero, J. (2009). *Análisis de agua*. 3ª ed. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rondón, M. (2000). *Land use and balances of greenhouse gases in Colombian Tropical Savannas*. Ph. D. Tesis, Cornell University, Estados Unidos.

Rondón, M. (s.f.).*Effects of land use change in the Llanos of Colombia on fluxes of Methane and Nitrous Oxide, and on radiative forcing of the atmosphere. Case study assessment of integrated GWP for key tropical agroecosystems*.

Roussos, S. y Perraud, I. (1996). *Fisiología y bioquímica de microorganismos utilizados en procesos de fermentación en medio sólido. Fronteras en Biotecnología y Bioingeniería.* Galindo.

Royer, M. (1990). *Soil Incineration*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Ruiz, N. *et al.* (2008). *Soil Macrofauna Field Manual. Technical Level*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Rychkova, E. y Blinnikov, V. (2006). The Effect of Anthropogenic Activity on Soil Macrofauna in the Area of the I.F. Turgenev Memorial Museum “Spasskoe l Lutovinovo”. *Eurasia Soil Science, 39*(5), 512-515.

Salinas, J. y Valencia, C. (1983). *Oxisoles y Ultisoles en América Tropical I. Distribución, importancia y propiedades físicas*. Cali, Colombia: CIAT.

Santschi, P. H. (2001). Historical contamination of PAHs, PCBs, DDTs, and heavy metals in Mississippi River delta, Galveston Bay and Tampa Bay sediment cores. *Marine Environmental Research, 52*(1), 51-79.

Saracino, C., Ercoli, E., Gálvez, J. y Videla, O. (2001). *Evaluacion de dos ASTRA C.A.P.S.A. *años de experiencias de campo en Biorremediación de suelos*. Argentina: Laboratorio de Bioprocesos, Universidad de Cuyo.

Sarkar, D., Ferguson, M., Datta, R. y Birnbaum, S. (2005). Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. *Environmental Pollution, 136*(1), 187-95.

Segura, F. y Norato, T. (1994). *Recursos herbáceos y arbóreos con potencial nutritivo para bovinos*. Ibagué: ICA-Agrosavia.

Semple, K. T., Reid, B. J. y Fermor, T. R. (2001). Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Pollution, 112*(2), 269-283.

Seoanez, M. (2000). *Residuos: problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción*. Barcelona: Ediciones Mundi-Prensa.

Sierra, M., Martínez, F. J. y Aguilar, J. (2007). Líneas de base para oligoelementos y evaluación de riesgo ambiental en suelos de Almería (SE España). Geoderma, 139(1-2).

Sikkema, J., De Bont, J. A. y Poolman, B. (1995). Mechanisms of membrane toxicity of hydrocarbons. *Microbiological Reviews, 59*(2), 201-22.

Singleton, V. L. y Rossi, J. A. Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture, 16*, 144-158.

Soil Science Society of America (SSSA). (2008). *Glossary of soil science terms.*

Solomon, J. D. (1995). *Guide to insect borers of North American broadleaf trees and shrubs*. Agriculture Handbook 706. Washington, D. C.: US Department of Agriculture, Forest Service.

Sridevi, V., Lakshmi, M. V. V. C. y Swamy, A. V. N. (2011). Implementation of response surface methodology for phenol degradation using *Pseudomonas putida* (NCIM 2102). *Journal of Bioremediation & Biodegradation, 02*(02).

Stanbury, P. F., Whitaker, A. y Hall, S. J. (1986). Media for industrial fermentations. En *Principles of Fermentation Technology* (pp. 93-122). Oxford: Pergamon Press.

Stern, E. (1998). *Sediment decontamination Program for the Port of New York and New Jersey*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Strauss, H. S. (1997). Is Biorremediation a Green Technology. *Journ. of Soil Contamination, 6*(3), 219-225.

Swift, M. *et al.* (2012). El Inventario de la Biodiversidad Biológica del Suelo. Conceptos y Guía General. En F. Moreira *et al.*, *Manual de Biología de Suelos Tropicales. Muestreo y Caracterización de la Biodiversidad Bajo Suelo* (pp. 29-52). México: Instituto Nacional de Ecología.

Tarlera, S. (2010). *Arroz y Gases efecto invernadero*. Recuperado de http://www.aca.com.uy/revista/Revista%20nro.%2062/Arroz%20y%20gases%20de%20efecto%20invernadero.pdf.

Tibbetts, P. J. C., Buchanan, I. T., Gawel, L. J. y Large, R. (1992). A comprehensive determination of produced water composition. En J. P. Ray y F. R. Engelhardt (eds.), *Produced Water: Technological/Environmental Issues and Solutions* (pp. 97-113). Nueva York: Plenum Publishing Corp.

Trujillo, E. (2007). *Guía de reforestación: Los árboles: Adaptación, características, madera, usos, rendimientos, silvicultura, producción en vivero; Guía de plantación y manejo silvicultural*.

UN Water. (2017). *Informe Mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos de las Naciones Unidas - Las aguas residuales: el recurso desaprovechado. Cifras y datos.*

UNEP (1992). *Chemical Pollution: A Global Overview*. Ginebra, Italia: IRPTC.

University of Alberta (2000). *The reclamation of agricultural soils after oil spills. Part 1. Research Department of Soil Science*. Canadá: The University of Alberta.

Uribe, L. (1999). *Uso de indicadores microbiológicos del suelo: ventajas y limitaciones.* San José de Costa Rica: Congreso de Suelos.

Veneklass, E., Fajardo, A. y Lozano, J. (2005). Gallery Forest Types and their Enviromental Correlates in a Colombian Savanna Landscape. *Ecography, 28*, 236-252.

Villar, R., Ruiz-Robleto, J., Quero, J., Poorter, F., Valladares, F. y MarañÓn, T. (2004). Tasas de crecimiento en especies leñosas aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En F. Valladares (ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (pp. 191-227). Barcelona.

Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H,. Ospina, M. y Umaña, A. (2006). *Manual de Métodos para el Desarrollo de Inventarios de Biodiversidad*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Vitt, L. y Caldwell, J. (2009). *Herpetology. An Introductory Biology fo Anphibians and Reptiles*. Boston, Estados Unidos: Elsevier Inc.

Walworth, J. L. y Reynolds, C. M. (1995). Bioremediation of a petroleum-contaminated cryic soil: effects of phosphorus, nitrogen, and temperature. *Journal of Soil Contamination, 4*(3), 299-310.

WHO (1993). *Guidelines for drinking water quality*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

Yang, C. y Lee, C. (2007). Enrichment, isolation, and characterization of phenol-degrading *Pseudomonas resinovorans* strain P-1 and Brevibacillus sp. strain P-6. *International Biodeterioration and Biodegradation, 59*(3), 206-10.

Yare, B. *et al.* (1997). *Sediments Remediation Action Team*. Estados Unidos: Organismo para la Protección del Medio Ambiente.

Zaldívar, N. *et al.* (2007). Macrofauna Edáfica en Tres Sistemas Ganaderos. Centro Agrícola. *Agroecología, 34*(2), 75-79.

Zamora, R. y Solano, R. (1994). *Evaluación de la sacharina seca (caña enriquecida) como suplemento en la alimentación de vacas lecheras en la época seca. Agronomía mesoamericana.* Turrialba, Costa Rica: CATIE/SAREC.

Zamudio, R. y Cedeño, J. (2001). *Biorremediación de Recortes de Perforación de Pozos Petroleros*. Monterrey, México: ITESM.



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

ecopetrol

9 789585 461697